

Aktuelle Themen der Reaktorsicherheitsforschung in Deutschland

Fachtagung der KTG-Fachgruppen
"Sicherheit kerntechnischer Anlagen"
"Thermo- und Fluidodynamik" und
"Betrieb von kerntechnischen Anlagen"

Rosendorf, 3. - 4. April 2006



Kerntechnische
Gesellschaft e. V.



Forschungszentrum
Rossendorf

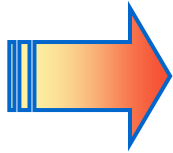
Aktuelle Themen der Reaktorsicherheitsforschung in Deutschland

Fachtagung der KTG-Fachgruppen

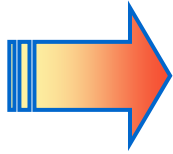
**Sicherheit kerntechnischer Anlagen
Thermo- und Fluidodynamik
Betrieb von kerntechnischen Anlagen**

Rossendorf, 3. – 4. April 2006

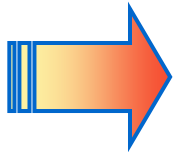




**Aktueller Stand der Analysen zu
Borverdünnungsszenarien in Druckwasserreaktoren
und zur
Verstopfung der Sumpfansaugsiebe
durch abgelöstes Isolationsmaterial**



**Auswirkungen auf Sicherheitsnachweise und
Anlagenbetrieb**



**Möglichkeiten, Perspektiven und Grenzen von
Methoden der Computational Fluid Dynamics**

Inhaltsübersicht

Impressum

Vorwort

Themenübersicht

Zusammenfassender Bericht

Teilnehmerverzeichnis

Veranstalter

Forschungszentrum Rossendorf e. V.
Institut für Sicherheitsforschung
Postfach 51 01 19
D-01314 Dresden

Telefon: +49 351 260 3470
Telefax: +49 351 260 3440

<http://www.fz-rossendorf.de>

Mitglied der Leibniz Gemeinschaft

Programmkomitee

F.-P. Weiß, Forschungszentrum Rossendorf e. V., Dresden
H. Fabian, KTG Fachgruppe Sicherheit kerntechn. Anlagen, Erlangen
E. Grauf, SE safe and efficient, Talheim
S. Kliem, Forschungszentrum Rossendorf e. V., Dresden
V. Noack, RWE Power AG, Essen
H. Ohlmeyer, Vattenfall Europe Nuclear Energy GmbH, Hamburg
U. Rohde, Forschungszentrum Rossendorf e. V., Dresden
W. Scholtyssek, Forschungszentrum Karlsruhe, Karlsruhe
U. Stoll, Framatome ANP GmbH, Erlangen
V. Teschendorff, GRS mbH, Garching

Sponsor

Der Fachtag wurde von der Vattenfall Europe Nuclear Energy GmbH (VENE) und vom Kompetenzverbund Kerntechnik unterstützt.

Teilnehmer

Ein Teilnehmerverzeichnis befindet sich im Anhang.

Herausgeber, Copyright

Prof. Frank-Peter Weiß; Direktor des Instituts für Sicherheitsforschung im Forschungszentrum Rossendorf e.V., Dresden

Redaktion:

Gundula Grundmann, Forschungszentrum Rossendorf e.V., Dresden

Vorwort

Der Fachtag fand am 03. und 04. April 2006 im Forschungszentrum Rossendorf (FZR) e.V. bei Dresden statt.

Die Veranstaltung widmete sich mit der Borverdünnung in Druckwasserreaktoren bzw. mit der Verstopfung der Sumpfansaugsiebe durch freigesetztes Isolationsmaterial schwerpunktmäßig zwei Themen der Reaktorsicherheit, die auch in aktuellen Aufsichtsverfahren eine Rolle spielen. Eingebettet in den internationalen Kontext wollten die Veranstalter die sicherheitstechnische Bedeutung dieser Themen für die deutschen Anlagen beleuchten und die Auswirkungen auf die zu erbringenden Sicherheitsnachweise und den Anlagenbetrieb darstellen. Dabei kamen Gutachter, Vertreter der Forschung, Hersteller und Betreiber gleichermaßen zu Wort.

Der Fachtag sollte den Teilnehmern aber insbesondere vermitteln, welche Beiträge die privat und öffentlich finanzierte Reaktorsicherheitsforschung zur Aufklärung der jeweiligen Ereignisabläufe und ihrer sicherheitstechnischen Bedeutung geleistet hat.

In diesem Forschungskontext spielen, auch international, die Methoden der so genannten Computational Fluid Dynamics (CFD) eine zunehmende Rolle. Deshalb widmete sich eine Sitzung den Grundlagen, Möglichkeiten und Grenzen von CFD-Methoden. Dabei wurden u. a. Anwendungen zur Borvermischung und zum Verhalten von Mineralwolle im Sumpf präsentiert.

Das Programm wurde mit der Besichtigung von Versuchsanlagen des FZR abgerundet.

Die organisatorische Durchführung des Fachtages hatte das Institut für Sicherheitsforschung des FZ Rossendorf übernommen. Wesentliche Unterstützung leistete das Programmkomitee, in dem Mitglieder der drei beteiligten Fachgruppen vertreten waren.

Die Vorträge sind auf dieser CD sowie in einem in diesem Sammelband publiziert.

gez. Prof. Frank-Peter Weiß
Direktor des Instituts für Sicherheitsforschung im Forschungszentrum Rossendorf e.V.

KTG-Fachtag
Aktuelle Themen der Reaktorsicherheitsforschung in Deutschland
3.-4. April 2006

Besichtigung der Versuchseinrichtungen - *Visit of the Facilities*

TOPFLOW

TOPFLOW ist eine Thermofluidodynamik-Versuchsanlage für grundlegende Untersuchungen zu Zweiphasenströmungen. Experimente mit fortgeschrittener Instrumentierung (Gittersensoren, Tomografie, optische Hochgeschwindigkeitskameras) zielen auf die Modellbildung zur Beschreibung des Massen-, Impuls- und Energieaustauschs an der Grenzfläche zwischen der Gas- und der Flüssigphase sowie auf die Beschreibung der Dynamik der Zwischenphasengrenzfläche selbst. Die Modelle werden für die Ertüchtigung von CFD-Codes benötigt. Die Anlage verfügt über einen 4 MW-Elektrokessel und kann ein Wasser-Dampf-Gemisch bis 7 MPa und 286 °C bereitstellen. Ein spezieller großmaßstäblicher Drucktank dient zur Durchführung von Versuchen bis 5 MPa mit einer neuartigen Technik des Druckausgleichs.

TOPFLOW is a thermal fluiddynamic test facility for fundamental studies in the field of gas-liquid two-phase flows. Experiments with advanced instrumentation (wire-mesh sensors, tomography, optical high-speed observations) aim at the development of models for the mass, momentum and energy exchange at the gas-liquid interface as well as for the description of the dynamic behavior of the interfacial area. The models are implemented into CFD codes to improve their two-phase capabilities. The test facility has a maximum power of 4 MW and can produce a steam-water mixture at up to 7 MPa and 286 °C. A special large-scale autoclave is used to perform experiments in pressure equilibrium up to 5 MPa.

ROCOM

ROCOM ist eine Anlage zur Untersuchung der Kühlmittelvermischung. Mit Hilfe einer räumlich und zeitlich hochauflösenden Messtechnik wird am 1:5 Modell des Primärkreislaufes eines Druckwasserreaktors vom Typ KONVOI die Kühlmittelvermischung untersucht. An Hand von ausgewählten Experimenten werden die in der Versuchsanlage ablaufenden Vermischungsvorgänge von der Hauptkühlmittelleitung bis zum Eintritt in den Reaktorkern anschaulich dargestellt und erklärt.

The coolant mixing in the primary circuit of a KONVOI type pressurized water reactor is investigated at the 1:5 scaled test facility ROCOM using high-resolution measurement technique. The phenomena affecting coolant mixing from the cold leg up to the reactor core entrance will be presented and explained on basis of selected experiments.

γ -Tomographie

Mit Hilfe der Gammatomographie ist es möglich, Phasenverteilungen in Druckgefäßen, Rohrleitungen oder Chemiereaktoren zu messen. Dafür wurde im Institut für Sicherheitsforschung ein hochauflösender Gammatomograph entwickelt und aufgebaut. Mit diesem werden zum Beispiel Dampfgehaltsverteilungen in SWR-Brennelementbündeln untersucht.

Distributions of two phases can be measured in pressure vessels, pipes and chemical reactors with the help of γ -tomography. A high resolution γ -tomograph was developed in the Institute of Safety Research. Void distributions in BWR fuel assemblies are investigated as an example.

Magnetohydrodynamik

Die Magnetohydrodynamik (MHD) befasst sich mit der Wechselwirkung elektrisch leitfähiger Flüssigkeiten mit Magnetfeldern. Ein hohes Anwendungspotenzial besteht in Metallurgie und Kristallzüchtung durch die kontaktlose Beeinflussung von Transportprozessen in den Schmelzen. Grundlagenuntersuchungen beschäftigen sich mit dem Dynamo-Effekt der Erzeugung eines Magnetfeldes durch strömendes Metall. In den MHD-Labors können Flüssigmetallkreisläufe mit Natrium, Blei oder der bei Raumtemperatur flüssigen Legierung GalSn besichtigt werden.

Magneto-hydrodynamics (MHD) deals with the interaction of magnetic fields with electrically conducting fluids. On the one hand the contactless interference of melts possible by MHD offers smart applications in metallurgy and crystal growth. On the other hand basic research in this field is related to the so called dynamo effect, i.e. the generation of a magnetic field by a flowing metal, which is one important step to improved understanding of the magnetic field of the earth. In the MHD labs, different liquid metal loops can be visited which are operated with sodium, lead, and the eutectic GalSn being liquid at room temperature.

Teilnehmerliste

KTG-Fachtagung "Aktuelle Themen der Reaktorsicherheitsforschung in Deutschland"

am 3.und 4. April 2006 im Forschungszentrum Rossendorf

Titel	Name	Vorname	Firma	Ort
Prof.	Adam	Ernst	i. R.	Dresden
	Alt	Sören	Hochschule Zittau/Görlitz (IPM)	Zittau
Dr.	Antony-Spies	Peter	i. R.	Liederbach
	Baier	Peter	E.ON Kernkraft GmbH	Krumbach
	Balling	Markus	EKK E.ON Kernkraft GmbH	Hameln
Dr.	Becker	Frank	E.ON Kernkraft GmbH, Bereich Anlagen- und Systemtechnik	Hannover
Dr.	Bergbauer	Walter	TÜV Süd Industrie Service GmbH	München
	Blessing	Hartwig	Framatome ANP GmbH	Erlangen
	Bodenbender	Hans	Hess. Ministerium f. Umwelt, ländl. Raum und Verbraucherschutz	Wiesbaden
Dipl.-Phys.	Böhlke	Steffen	TU Dresden, Fak. MW, Inst. F. Energiewesen	Dresden
Dipl.-Ing.	Bornemann	Jörg-Thomas	TÜV Süd Industrie Service GmbH	München
	Brand	Bernhard	Framatome ANP GmbH	Erlangen
	Brettner	Matthias	Physikerbüro Bremen	Bremen
	Burbach	Thomas	EnBW Kraftwerke AG, Kernkraftwerk Philippsburg	Philippsburg
	Burger	Markus	E.ON Kernkraft GmbH	Grafenrheinfeld
Dr.	Carl	Helmar	Forschungszentrum Rossendorf e. V.	Dresden
Dr.	Charzewski	Cornelia	TÜV Energie- und Systemtechnik GmbH B-W	Mannheim
	Dietz	Georg	E.ON Kernkraft GmbH	Grafenrheinfeld
	Dusmann	Dietmar	GfS Gesellschaft für Simulationsforschung mbH	Essen
Dipl.-Phys.	Eder	Dieter	RWE Nukem GmbH, NIS Ingenieure	Alzenau
	Ehlers	Lars	EnBW Kraftwerke AG, Kernkraftwerk Neckarwestheim	Neckarwestheim
	Enders	Rolf	RWE Power AG Kraftwerk Biblis, PB	Biblis
Dr.	Fabian	Hermann	i. R.	Erlangen
Dr.	Fischer	Karsten	Becker Technologies GmbH	Eschborn

Titel	Name	Vorname	Firma	Ort
Dr.	Fischer	Kurt	Framatome ANP GmbH	Erlangen
Dr.	Frank	Thomas	ANSYS Germany GmbH	Otterfing
Dr.	Gall	Uwe	Vattenfall Europe Nuclear Energy GmbH	Hamburg
Dipl.-Ing.	Geske	Jochen	EnBW Kraftwerke AG, Kernkraftwerk Philippsburg	Philippsburg
	George	Carsten	Kernkraftwerk Gundremmingen GmbH	Gundremmingen
	Gocht	Thoralf	Hochschule Zittau/Görlitz (IPM)	Zittau
Dr.	Görtz	Rudolf	Bundesamt für Strahlenschutz	Salzgitter
	Gradic	Helmut	E.ON Kernkraft GmbH, KKV	Stadland
Dr.	Grahn	Alexander	Forschungszentrum Rossendorf e. V.	Dresden
Dr.-Ing.	Grauf	Eberhard	safe and efficient	Talheim
Dr.	Grundmann	Ulrich	Forschungszentrum Rossendorf e. V.	Dresden
	Gruszczynski	Dariusz	KNG E.ON Kernkraft GmbH	Görlitz
	Gutheil	Jürgen	TÜV Nord EnSys Hannover	Hannover
	Hannes	Herbert	RWE Power AG Kraftwerk Biblis, Abt. HR	Biblis
Dipl.-Ing.	Hansen	Asmus	RWE Power AG Kraftwerk Biblis	Biblis
	Hecker	Arne	EKK E.ON Kernkraft GmbH	Düsseldorf
Prof.	Heinzel	Volker	Forschungszentrum Karlsruhe GmbH	Eggenstein-Leopoldshafen
	Herrmann	Wolfgang	A. EN. INVENT AG	München
Dipl.-Ing.	Heuer	Hans-Jürgen	RWE Power AG Kraftwerk Biblis	Biblis
	Hofmeister	Jan	RWE Power AG	Essen
Dr.	Höhne	Thomas	Forschungszentrum Rossendorf e. V.	Dresden
	Holzbauer	Helmut	TÜV Energie- und Systemtechnik GmbH B-W	Filderstadt
	Joachim	Helmut	TÜV Energie- und Systemtechnik GmbH B-W	Mannheim
Dipl.-Ing.	Kalk	Andreas	Westinghouse Electric Germany	Mannheim
Prof.	Karwat	Helmut	i. R.	Pullach
Dr.	Kästner	Wolfgang	Hochschule Zittau/Görlitz (IPM)	Zittau
	Kehr	Bernd	RWE Power AG Kraftwerk Biblis, Abt. HR	Biblis
	Kistner	Burkhard	EnBW Kraftwerke AG, Kernkraftwerk Philippsburg	Philippsburg
Dr.	Kliem	Sören	Forschungszentrum Rossendorf e. V.	Dresden
	Königstein	Egon	Framatome ANP GmbH	Offenbach/Main

Titel	Name	Vorname	Firma	Ort
	Kratzsch	Alexander	Hochschule Zittau/Görlitz (IPM)	Zittau
Dr.	Krause	Christian	Bundesamt für Strahlenschutz; RSK-Geschäftsstelle	Bonn
Dipl.-Ing.	Krause	Horst	i. R.	Radebeul
Dr.	Krepper	Eckhard	Forschungszentrum Rossendorf e. V.	Dresden
	Kretzschmar	Thomas	TUD Kernenergetik	Dresden
Dipl.-Ing.	Kreuzer	Peter	E.ON Kernkraft GmbH, Kernkraftwerk Isar, EKK KKI	Essenbach
	Kursawe	Hans-Michael	Framatome ANP GmbH	Erlangen
	Lalczkò	Gábor	Forschungszentrum Rossendorf e. V.	Dresden
cand.-Ing.	Langer	Felix-O.	TUD	Dresden
Dr.	Laue	Tanja	TÜV Nord EnSys Hannover GmbH & Co. KG	Hannover
Dipl.-Ing.	Lipp	Carsten	EnBW Kraftwerke AG	Philippsburg
	Löwenberg	Matthias	RWE Power AG	Essen
Dr.	Lucas	Dirk	Forschungszentrum Rossendorf e. V.	Dresden
	Ludwig	Holger	Framatome ANP GmbH, Abt. NGPS7	Erlangen
Prof.	Lützow	Klaus	i. R.	Waltersdorf
	Mandl	Rafael	Framatome ANP GmbH, Abt. NGPS7	Erlangen
Dr.	Maqua	Michael	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH	Köln
	Marx	Hermann-Josef	RWE Power AG Kraftwerk Biblis, PB	Biblis
Dipl.-Ing.	Matzig	Bert	ESN Energie Systeme Nord GmbH GmbH	Raisdorf
	Meirich	Peter	RWE Power AG Kraftwerk Biblis, PB	Biblis
	Melssen	Ralf	EnBW Kernkraft GmbH, KKW Philippsburg	Philippsburg
Dipl.-Ing.	Möckel	Bernd	IBH Ingenieurgesellschaft mbH	Ludwigshafen
Dipl.-Ing.	Münch	Siegfried	IBH Ingenieurgesellschaft mbH	Ludwigshafen
Dr.	Münch	Wolfgang	TÜV Süd Industrie Service GmbH	München
Dr.	Nie	Markus	Framatome ANP GmbH	Erlangen
Dr.	Noack	Volker	RWE Power AG	Essen
Dipl.-Ing.	Ohlmeyer	Hermann	VENE Vattenfall Europe Nuclear Energy GmbH	Hamburg
	Papukchiev	Angel	TU München, Lehrstuhl für Reaktordynamik	Garching
	Pasler	Carsten	Framatome ANP GmbH	Offenbach/Main
	Pirzer	Franz	E.ON Kernkraft GmbH, Kernkraftwerk Isar, EKK KKI TP2	Essenbach

Titel	Name	Vorname	Firma	Ort
	Pointner	Winfried	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH	Garching
	Rebohm	Harold	TÜV Nord EnSys Hannover GmbH & Co. KG	Hannover
	Reichel	Christoph	TÜV Süd Industrie Service GmbH	München
Dr.	Reichenbach	Detlev	AREVA	Moscow / Russia
	Remshardt	Michael	EnBW Kernkraft GKN	Neckarwestheim
Dipl.-Ing.	Ressel	Sven	EON Kernkraft GmbH, KKW Unterweser	Stadland
Dr.	Richei	Andreas	EON Kernkraft GmbH, KKW Unterweser	Stadland
Dr.	Röhrmoser	Anton	Zentrale Wissenschaftliche Einrichtung FRM-II	Garching
Dr.	Rohde	Ulrich	Forschungszentrum Rossendorf e. V.	Dresden
Dr.	Roßbach	Detlev	Framatome ANP GmbH	Erlangen
Dipl.-Ing.	Roßner	Lars	E.ON Kernkraft GmbH	Hannover
	Roth	Thomas	KSG Kraftwerk-Simulator-Gesellschaft mbH	Essen
	Sailer	Michael	Öko-Institut e. V.	Darmstadt
	Samuel	Torsten	Framatome ANP GmbH	Erlangen
Dr.	Sanchez	Victor	Forschungszentrum Karlsruhe GmbH	Eggenstein-Leopoldshafen
	Sander	Ulrich	EnBW Kernkraft GmbH, Kernkraftwerk Neckarwestheim	Neckarwestheim
	Sauer	Frank	E.ON Kernkraft GmbH, Bereich Anlagen- und Systemtechnik	Hannover
Dr.	Schäfer	Frank	Forschungszentrum Rossendorf e. V.	Dresden
Dr.-Ing.	Schaffrath	Andreas	TÜV Nord SysTec GmbH & Co. KG	Hamburg
	Scheuerer	Martina	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH	Garching
Dipl.-Ing.	Schlägl	Frank	TÜV Süd Industrie Service GmbH	München
Dr.	Schnur	Peter	Niedersächsisches Umweltministerium, Ref. 11	Hannover
	Scholtysek	Werner	Forschungszentrum Karlsruhe GmbH	Karlsruhe
Dr.	Scholz	Dieter	TÜV Energie- und Systemtechnik GmbH B-W	Mannheim
Dr.	Schöner	Peter	TÜV Süd Industrie Service GmbH	München
Dr.	Schramm	Berthold	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH	Köln
Dipl.-Ing.	Schulze	Frank	E.ON Kernkraft GmbH, Kernkraftwerk Isar, EKK KKI	Essenbach
	Schulze	Hartmut	KSG / Gesellschaft für Simulatorschulung mbH	Essen
	Schürmann	Thomas	EnBW Kernkraft GmbH, KKW Philippsburg; ZR06.39	Philippsburg
Dr.	Schuster	Christoph	TU Dresden, Inst. f. Energietechnik, Prof. Kernenergietechnik	Dresden

Titel	Name	Vorname	Firma	Ort
	Schwarz	Wolfgang	EnBW Kernkraft GmbH, Kernkraftwerk Neckarwestheim	Neckarwestheim
	Seeliger	André	Hochschule Zittau/Görlitz (IPM)	Zittau
	Seewald	Michael	Gesellschaft für Simulatorschulung mbH	Essen
	Seidel	Tobias	Technische Universität Dresden	Dresden
Dr.	Shang	Jianming	TÜV Energie- und Systemtechnik GmbH B-W	Mannheim
	Sippel	Lothar	TÜV Energie- und Systemtechnik GmbH B-W	Filderstadt
	Solisch	Tom Oliver	ESN Energie Systeme Nord GmbH	Raisdorf
Dipl.-Ing.	Spengler	Peter	RWE Nukem GmbH	Alzenau
Dr.	Steinbrück	Martin	Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Technik und Umwelt	Karlsruhe
Dipl.-Ing.	Stengert	Eckhard	RWE Power AG Kraftwerk Biblis	Biblis
Dipl.-Ing.	Stepan	Helmut	TÜV Süd Service GmbH	München
Dipl.-Ing.	Stoll	Uwe	Framatome ANP GmbH	Erlangen
Dr.	Streubel	Gerd	TÜV Industrie Service GmbH, TÜV Süd Gruppe, Region Nordost	Dresden
	Strunz	Matthias	TÜV Energie- und Systemtechnik GmbH B-W	Filderstadt
Dipl.-Ing.	Stüber	Joachim	Kernkraftwerk Brokdorf GmbH & Co. OHG	Uetersen
	Sühnel	Tobias	Forschungszentrum Rossendorf e. V.	Dresden
	Teschendorff	Victor	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH	Garching
Dr.	Tietsch	Wolfgang	Westinghouse Electric Germany GmbH	Mannheim
	Tittel	Thomas	E.ON Kernkraft GmbH	Hannover
Dr.	Traichel	Anke	Hochschule Zittau/Görlitz (IPM)	Zittau
	Umminger	Klaus	Framatome ANP GmbH	Erlangen
	Vauth	Thorsten	E.ON Kernkraft GmbH	Hannover
	Vortriede	Axel	TÜV Nord EnSys Hannover GmbH & Co. KG	Hannover
	Waas	Ulrich	Framatome ANP GmbH, Abt. NGPS7	Erlangen
Dr.	Weber	Matthias	Niedersächsisches Umweltministerium	Hannover
Prof.	Weiss	Frank-Peter	Forschungszentrum Rossendorf e. V.	Dresden
	Wiedemann	Ulrich	Bayr. Staatsmin. f. Umwelt/Gesundh./Verbrauchersch. (StMUGV)	München
Dr.	Wilhelm	Oliver	EnBW Kraftwerke AG, Nukleartechnik	Philippensburg
Dipl.-Ing.	Wohlstein	Ralf	E.ON Kernkraft GmbH	Hannover
Prof.	Yadigaroglu	George	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich	Zürich /Schweiz; USA

KTG-Fachtagung

Aktuelle Themen der Reaktorsicherheitsforschung in Deutschland

3. und 4. April 2006

Zusammenfassender Bericht

E. Grauf; U. Stoll; V. Teschendorff; F.-P. Weiß

Am 3. und 4. April 2006 fand im Forschungszentrum Rossendorf ein KTG-Fachtag zum Thema „Aktuelle Themen der Reaktorsicherheitsforschung in Deutschland“ statt. Dieser Fachtag wurde gemeinsam von den Fachgruppen „Thermo- und Fluidodynamik“, „Sicherheit kerntechnischer Anlagen“ und „Betrieb von kerntechnischen Anlagen“ veranstaltet und war ausdrücklich auch auf die Fortbildung der Mitarbeiter in den Anlagen, bei den TÜV und bei den Behörden angelegt.

Mehr als 140 Teilnehmer haben den Fachtag besucht (Bild 1). Die Fachgruppen danken an dieser Stelle der Vattenfall Europe Nuclear Energy (VENE) und dem Kompetenzverbund Kerntechnik für die freundliche Unterstützung der Veranstaltung.



Bild 1: Teilnehmer des KTG-Fachtags „Aktuelle Themen der Reaktorsicherheitsforschung in Deutschland“ am 3. und 4. April 2006 im Forschungszentrum Rossendorf.

Der Fachtag wurde mit einem Vortrag des RSK-Vorsitzenden **Michael Sailer** eröffnet, der den aktuellen Forschungsbedarf aus Sicht der RSK beleuchtete. Er wies insbesondere auf die notwendige Verbesserung der Validierung von Rechenprogrammen für die sicherheitstechnische Nachweisführung und auf die Verbesserung der Methoden für die Unsicherheitsanalysen hin. Darüber hinaus ging er auf Kenntnisdefizite zu Alterungsprozessen bei passiven Komponenten, elektrischen und leittechnischen Einrichtungen ein und betonte in diesem Zusammenhang die Bedeutung des Erfahrungsrückflusses aus stillgelegten Anlagen. Neben den Themen, die der anschließende Fachtag im Detail aufgriff, sieht die RSK weiteren Forschungsbedarf ebenso bei der Zuverlässigkeitsbewertung digitaler Leittechnik, der Verifikation repräsentativer Werkstoffeigenschaften und beispielsweise bei der Erarbeitung einer exemplarischen Erdbeben-PSA in Analogie zum Schweizer PEGASOS-Projekt unter Berücksichtigung der Empfehlungen aus NUREG-6372.

Im anschließenden Vortragsprogramm widmete sich der Fachtag den Themen

- Kenntnisstand zu unterstellten Borverdünnungstransienten in DWR
- Verstopfung der Sumpfansaugsiebe durch abgelöstes Isolationsmaterial und
- Methoden der Computational Fluid Dynamics (CFD) in der Reaktorsicherheit

Der Fachtag wurde mit Besichtigungen von Versuchseinrichtungen des Forschungszentrums Rossendorf abgeschlossen.

Sitzung I (Berichterstatter: V. Teschendorff)

Kenntnisstand zu unterstellten Borverdünnungsszenarien in DWR

Die erste Vortragsreihe der Fachtagung befasste sich mit dem Themenkomplex „Kenntnisstand zu unterstellten Borverdünnungsszenarien in DWR“. Die Thematik ist seit mehreren Jahren Gegenstand von experimentellen Untersuchungen, theoretischen Analysen und sicherheitstechnischen Stellungnahmen.

Der einleitende Vortrag „**Borverdünnungsszenarien und ihre sicherheitstechnische Bedeutung**“ von **W. Pointner** (GRS) erläuterte die Problemstellung und den Stand der bisher erreichten Nachweisführung. Borsäure wird als Neutronenabsorber im Primärkreis von Druckwasserreaktoren eingesetzt. Unter normalen Betriebsbedingungen werden damit Abbrand und Xenonvergiftung innerhalb der vorgegebenen Reaktivitätsmargen kompensiert. Falls im Nichtleistungsbetrieb oder im Verlauf eines Störfalls nach Reaktorschnellabschaltung die Borkonzentration im Kern absinkt, könnte es zur Rekritikalität mit entsprechendem Anstieg der Reaktorleistung kommen. Es ist nachzuweisen, dass im Verlauf dieses so genannten Borverdünnungsereignisses Rekritikalität nicht eintritt, bzw. dass es nicht zu Kernschäden kommt.

Deborierungsstörfälle können entweder durch eine unbeabsichtigte Borverdünnung im Nichtleistungsbetrieb (Instandhaltungsvorgänge) oder bei Störfällen mit kleinem Leck und Kondensatbildung im Primärkreis auftreten. Analysen unter Genehmigungsrandbedingungen für deutsche Druckwasserreaktoren haben gezeigt, dass bei kleinen Lecks auf der kalten Seite mit kaltseitiger Hochdruckeinspeisung und bei Lecks auf der heißen Seite bei heißseitiger Hochdruckeinspeisung die größten Pfropfen von niedrigboriertem Kondensat in den Kühlschleifen, vorzüglich im Pumpenbogen, gebildet werden.

Das deutsche Regelwerk enthält Forderungen zur Unterkritikalität bei Störfällen. Die BMI-Kriterien fordern, dass der Reaktorkern so ausgelegt ist, dass prompte Rückkopplungseigenschaften schnelle Reaktivitätsanstiege soweit abfangen, dass keine sicherheitstechnisch bedeutsamen Schäden am Reaktorkern und im Kühlkreislauf eintreten. Die RSK-Leitlinien erlauben Rekritikalität bei Störfällen mit maximaler Abkühlgeschwindigkeit (z. B. Frischdampfleitungsbruch). Für Deborierungsereignisse ist nach Meinung der GRS Rekritikalität nicht zugelassen. Die Nachweisführung stützt sich auf Experimente und Analysen ab. Integralversuche in der PKL-Anlage liegen zum Verhalten der Kühlkreisläufe vor. Ergebnisse zur Vermischung im Reaktordruckbehälter beim Einsetzen des Naturumlaufs liefert die ROCOM-Anlage (vgl. dazu Vorträge in derselben Sitzung). Zur Vermischung im Ringraum wurden zusätzlich Großversuche aus dem früheren Versuchsprogramm UPTF-TRAM herangezogen. Die Übertragung auf den Reaktorfall erfolgte mit Hilfe des Rechenprogramms ATHLET, dessen Eignung an Hand von Nachrechnungen zu PKL- und UPTF-Versuchen nachgewiesen wurde. Herr Pointner fasste die bisher vorliegenden Erkenntnisse wie folgt zusammen: Die Szenarien und Phänomene bei Deborierungsstörfällen sind weitgehend in Experimenten (PKL, UPTF, ROCOM) untersucht worden. Es bestehen jedoch Unsicherheiten bei der Übertragung der Versuchsergebnisse auf die Realanlagen aufgrund von Skalierungseffekten. In einer Stellungnahme von TÜV und GRS wurden minimale Borkonzentrationen angegeben, die sich bei Leckstörfällen mit Reflux-Condenser-Bedingungen im Primärkreis lokal und kurzzeitig am Kerneintritt einstellen: 800 ppm für kaltseitiges Leck, 850 ppm für heißseitiges Leck. Für Reaktorkerne, die eine höhere globale Borkonzentration zur Einhaltung der Unterkritikalität erfordern, sind fallspezifische Nachweise erforderlich.

Der Beitrag „**Borverdünnung durch Störfälle mit Reflux-Condenser-Betrieb: Erkenntnisgewinn und sicherheitstechnische Einordnung aus Betreibersicht**“ von V. Noack (RWE) und R. Wohlstein (e.on) beleuchtete zunächst die Historie der Diskussion in Deutschland von 1992 bis heute. Zur deterministischen Behandlung wird angemerkt, dass den Untersuchungen eine Reihe von Postulaten zugrunde gelegt wurde, die insgesamt eine zwar auslegungsgemäße, aber relativ unwahrscheinliche Überlagerung von Anfangsbedingungen darstellen. Dazu gehören insbesondere die Verfügbarkeit der Einspeisungen, Lage und Querschnitt des Lecks und der Kernzustand. Zudem wird in den Analysen nicht von allen Vermischungsmechanismen Kredit genommen. In der Realität besteht deshalb noch ein erheblicher Abstand zur Kritikalität, wenn die in den Analysen ermittelte minimale Konzentration der kritischen entspricht. Aus einer schutzzielorientierten Betrachtung ergibt sich überdies, dass für die Einhaltung des Schutzziels „Kontrolle der Reaktivität“ der Erhalt der Unterkritikalität nicht zwingend erforderlich ist.

Eine probabilistische Betrachtung der Reflux-Condenser-Abläufe muss mindestens die Häufigkeit der unterstellten Primärkreislecks, die Wahrscheinlichkeiten für den Störfalleintritt bei Zyklusbeginn und für die Unverfügbarkeiten der Sicherheitseinspeisestränge berücksichtigen. Dabei ergibt sich, dass die Reflux-Condenser-Szenarien aus probabilistischer Sicht nur eine geringe Bedeutung für das Sicherheitsniveau deutscher DWR-Anlagen besitzen. Ein Vergleich mit dem Vorgehen in den USA zeigt, dass Borverdünnungsszenarien durch Reflux-Condenser-Betrieb dort probabilistisch bewertet und als sehr unwahrscheinlich eingestuft wurden. Eine Rekritikalität wird in den USA zugelassen.

Abläufe mit Borverdünnung beim kleinen Leck wurden experimentell mit den 4-Loop-Versuchsanlagen UPTF (1992 – 1997, Mischungsverhalten zur Verifizierung von S/KWU-Analysen), PKL (ab 1996, Umlaufverhalten, Pfropfengröße, Borkonzentration bis RDB-Eintritt) und ROCOM (Mischverhalten im RDB) sowie analytisch mit den Codes S-RELAP5, DEIO-MIX und PHOENICS umfassend untersucht. Die PKL-Versuche zeigten insbesondere, dass ein gleichzeitiger Start des einphasigen Naturumlaufes nicht möglich ist. Zur Aufborierung im RDB-Ringraum und im unteren Plenum wurden

zum einen analytische Untersuchungen mit dem CFD-Code PHOENICS durchgeführt. Zum anderen wurde diese Frage an der ROCOM-Anlage experimentell untersucht. Die Untersuchungen liefern Borkonzentrationen am Kerneintritt im Bereich von 1200ppm für den Fall heißseitiges Leck und heißseitige Notkühlein speisung, bzw. von 1700 ppm für das kalt/kalt Szenarium und bestätigten damit die aus UPTF abgeleitete Vermischungsintensität in ihrer Größenordnung. Zur Frage, inwieweit Ergebnisse aus Versuchen an der PKL-Anlage auf Realanlagen übertragen werden können, vertreten die Autoren die Auffassung, dass qualitative Versuchsergebnisse vollständig übertragbar sind, da die PKL-Anlage gerade für die Untersuchung des Umlaufverhaltens ausgelegt ist. Die quantitativen Ergebnisse halten sie ebenfalls für übertragbar, wobei allerdings gewisse Unsicherheiten bestehen. Diese Unsicherheiten werden jedoch durch die großen, in den Untersuchungen eingestellten konservativen Randbedingungen abgedeckt. Insgesamt wird festgestellt, dass alle Untersuchungen den Erhalt der Unterkritikalität für alle heute eingesetzten Kernbelastungen bestätigten. Änderungen an der Anlagentechnik, an den Fahrweisen oder in den Betriebsunterlagen waren und sind deshalb nicht erforderlich.

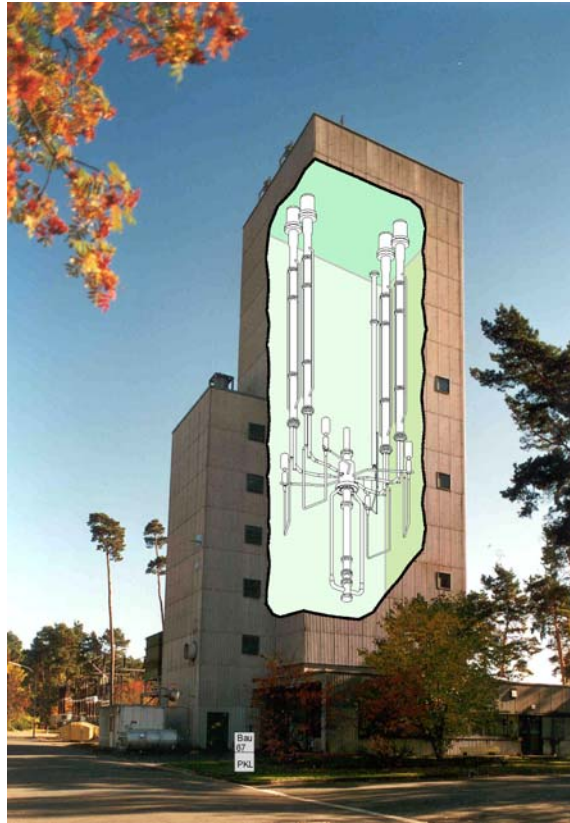


Bild 2: Die PKL-Versuchsanlage in Erlangen bildet die Thermohydraulik eines 1300 MWe-DWR im Höhenmaßstab 1:1 nach.

Der Vortrag „**PKL-Experimente zur Deborierung durch Reflux-Condenser-Betrieb**“ von **K. Umminger** und Th. Mull (AREVA NP) stellte die umfangreichen experimentellen Untersuchungen an der Integralversuchsanlage dar. Die Großversuchsanlage PKL (Bild 2) ist die skalierte Nachbildung eines KWU-Druckwasserreaktors mit einer elektrischen Leistung von 1300 MW. Die Anlage bildet die gesamte Primärseite und wesentliche Teile der Sekundärseite der Referenzanlage im Höhenmaßstab 1:1 nach. Volumina, Leistungen und Massenströme sind im Maßstab 1:145 skaliert. Die Versuchsanlage verfügt über 4 Primärkreisstränge, die symmetrisch um den RDB angeordnet sind. Der Reaktorkern wird durch 314 elektrisch beheizte Stäbe mit einer Gesamtleistung von 2,5 MW entsprechend 10 % Nennleistung simuliert. Der Maximaldruck der Primärseite ist auf 45 bar begrenzt.

In den Versuchsserien PKL III E und F wurden bis heute insgesamt 8 Integralversuche durchgeführt. Dabei kam erstmals eine neue Messtechnik für die Borkonzentration zum Einsatz. In 3 Versuchen erfolgte die Einspeisung von Notkühlwasser symmetrisch in alle 4 Primärkreisschleifen. In 4 Versuchen wurde die Verfügbarkeit von 2 von 4 Sicherheitseinspeisepumpen unterstellt. In einem weiteren Versuch wurde im Rahmen einer Parameterstudie die Ansammlung von Kondensat systematisch in Abhängigkeit vom primärseitigen Wasserinventar untersucht. Die im Vortrag dargestellten Ergebnisse konzentrierten sich auf die Versuche mit asymmetrischer Bespeisung, da das Auftreten von Reflux-Condenser-Bedingungen und damit die Ansammlung von Kondensat in den deutschen Anlagen nur bei eingeschränkter Verfügbarkeit der Sicherheitseinspeisungen zu erwarten ist.

Die Versuche haben bestätigt, dass im DWR unter Reflux-Condenser-Bedingungen mit der Ansammlung von schwach boriierten Kondensatpfropfen gerechnet werden muss. Die Versuche zeigen aber auch, dass die maximal mögliche Größe schwach borierter Pfropfen deutlich kleiner ist als ursprünglich angenommen wurde. Die maximale Ausdehnung von Kondensatpfropfen ist auf das Volumen eines Pumpenbogens und eines Teils der Dampferzeuger-Austrittskammer begrenzt. Alle bisher durchgeführten PKL-Versuche hatten gemeinsam, dass bei den jeweils unterstellten Randbedingungen Naturumlauf nach bzw. beim Wiederauffüllen des Primärkreises zeitlich versetzt zwischen den einzelnen Schleifen einsetzte, so dass die Kondensatpfropfen aus den einzelnen Schleifen den Reaktordruckbehälter (RDB) nicht gleichzeitig erreichten.

Beim Beginn von Umlauf in solchen Schleifen, die von Beginn der Transiente an mit Notkühlwasser bespeist wurden, trat in keinem Versuch eine deutliche Absenkung der Borkonzentration am Eintritt in den RDB auf. Auch in den nicht mit Notkühlwasser bespeisten Schleifen führten Vermischungsvorgänge dazu, dass die gemessene, minimale Borkonzentration am RDB-Eintritt deutlich über der minimalen Borkonzentration der ursprünglich in den Schleifen gebildeten Kondensatpfropfen lag. Selbst bei einer Maximierung der Größe der Kondensatpfropfen durch ungünstige Annahmen hinsichtlich Leckgröße und Einspeisekonfiguration bei kaltseitiger Einspeisung sank die Borkonzentration am RDB-Eintritt beim Beginn von Naturumlauf nur kurzzeitig ab und erreichte dabei einen Minimalwert von 350 ± 100 ppm.

Nach zusätzlichen Ausführungen zur Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse auf Reaktoranlagen wurde abschließend festgestellt, dass die Ergebnisse der PKL-Versuche weltweit die einzige belastbare experimentelle Datenbasis zum DWR-Systemverhalten bei Borverdünnungs-Szenarien darstellen.

Über „**Experimente an der Versuchsanlage ROCOM zur Kühlmittelvermischung bei Wiederanlauf der Naturzirkulation**“ berichtete **S. Kliem**, Koautoren T. Sühnel, H.-M. Prasser, F.-P. Weiss (FZR). Um Aussagen über die sich am Kerneintritt ergebende minimale Borkonzentration zu erhalten, wurden an der Versuchsanlage ROCOM (Rossendorf Coolant Mixing) Experimente (Bild 3) zur Quantifizierung der Vermischung innerhalb des RDB durchgeführt. Das Reaktormodell aus Plexiglas bildet einen KONVOI-Reaktor im Längenmaßstab 1:5 nach. Einbauten wie die Untere Gitterplatte und die Siebtonne bzw. der Kernschemel sind für die Vermischungsuntersuchungen im Detail nachgebildet. In den vier Umwälzschleifen kann das Anlaufen des Naturumlaufts durch regelbare Pumpen individuell gesteuert werden. Zwischen jeweils zwei pneumatisch gesteuerten Schiebern in den Schleifen wird der deborierete Pfropfen vorgelegt. Der Mangel an Borsäure wird durch Natriumchlorid als Tracersubstanz im Experiment dargestellt. Die Instrumentierung nutzt den linearen Zusammenhang zwischen der Konzentration des Salztracers und der elektrischen Leitfähigkeit. Spezielle Gittersensoren, die eigens für die Vermischungsuntersuchungen im FZR entwickelt wurden, sind das Kernstück der messtechnischen Ausstattung des Versuchsstandes. Die engmaschige Anordnung von



Bild 3: Rossendorf Coolant Mixing Test Facility (ROCOM) zur Untersuchung der Kühlmittelvermischung in DWR.

individuell gesteuert werden. Zwischen jeweils zwei pneumatisch gesteuerten Schiebern in den Schleifen wird der deborierete Pfropfen vorgelegt. Der Mangel an Borsäure wird durch Natriumchlorid als Tracersubstanz im Experiment dargestellt. Die Instrumentierung nutzt den linearen Zusammenhang zwischen der Konzentration des Salztracers und der elektrischen Leitfähigkeit. Spezielle Gittersensoren, die eigens für die Vermischungsuntersuchungen im FZR entwickelt wurden, sind das Kernstück der messtechnischen Ausstattung des Versuchsstandes. Die engmaschige Anordnung von

Messpunkten ermöglicht es, ein räumliches Bild der Konzentrationen im Ringraum und unterem Plenum aufzuzeichnen.

In mehreren Versuchsserien wurde die Kühlmittelvermischung im RDB nach einem Störfall mit kleinem Leck untersucht. Die Randbedingungen wurden aus PKL-Experimenten abgeleitet und mit zusätzlichen Konservativitäten versehen, z.B. durch Vorlegen von Pfropfen derselben Größe in benachbarten Schleifen und durch gleichzeitigen Eintritt der Pfropfen in den Ringraum. Im Falle des Versuchs zur Lecklage im kalten Strang mit kaltseitiger Notkühlein speisung schichten sich die minderborierten Pfropfen im oberen Bereich des Ringraumes auf und werden der nach unten durchdringenden Notkühlwassersträhne beigemischt und dabei aufboriert. Eine weitere Erhöhung der Borkonzentration erfolgt beim Transport durch das untere Plenum. In der Kerneintrittsebene wird minderboriertes Kühlmittel nur im Außenbereich registriert (dies gilt auch für das heiß/heiß Szenarium). Der an einer einzelnen Brennelementposition in einer sehr kurzen Zeitspanne gemessene Minimalwert der Borkonzentration beträgt 1785 ppm. Diese geringe Absenkung bleibt auf die äußeren drei Brennelementreihen in einem Sektor der Kerneintrittsebene beschränkt. Im inneren Bereich der Kerneintrittsebene kommt es zu keiner Veränderung der anfänglichen Borkonzentration von 2500 ppm. Es konnte gezeigt werden, dass die Vermischung des Notkühlwassers bis zum Eintritt in den unteren Ringraum den auf Basis von UPTF-Experimenten entwickelten Modellen entspricht.

Der abschließende Beitrag „**Sicherheitsnachweise und Auswirkungen auf den Reaktorbetrieb**“ von **H. Ludwig** und U. Stoll, (AREVA NP) griff noch einmal die wesentlichen Ergebnisse aus den PKL-Experimenten zum Systemverhalten auf. Hauptgegenstand der Betrachtungen war die Übertragung der Erkenntnisse auf die reale DWR-Anlage. Für das Systemverhalten ist diese Übertragbarkeit sichergestellt. So lassen sich beispielsweise Massenströme beim Naturumlauf in den einzelnen Schleifen auf Reaktorverhltnisse hochrechnen. Die Vermischung der niedrig borierten Wasserpfropfen mit höher boriertem Kühlmittel stellt den entscheidenden Mechanismus zur Beherrschung der Deborierungsszenarien dar. Nachdem die vorhandenen Computercodes diese Vermischung bisher nicht zweifelsfrei berechnen können, bilden ROCOM-Ergebnisse, die mit Hilfe generischer Skalierungsgesetze zu übertragen sind, hierzu die wichtigste Bewertungsgrundlage. Einen zusätzlichen Akzent setzte der Vortrag, indem er nicht nur auf die konservativen Randbedingungen der Analysen bei Thermohydraulik und Systemverfügbarkeit einging, sondern diese durch Angaben zur Reaktivität ergänzte. So stellt z.B. die postulierte Xenon-Konzentration nach Lastwechsel eine weitere Konservativität dar. Zusammenfassend stellen die Autoren fest, dass die experimentellen Ergebnisse, auf Reaktorverhltnisse übertragen, eine deutlich höhere minimale Borkonzentration zeigen als der bisher von den Gutachtern als gesichert anerkannte Minimalwert von 800 bzw. 850 ppm.

Sitzung II (Berichterstatter: E. Grauf)

Verstopfung der Sumpfansaugsiebe durch abgelöstes Isolationsmaterial

Die zweite Vortragsreihe der Fachtagung befasste sich mit dem Themenkomplex „Verstopfung der Sumpfsiebe durch abgelöstes Isolationsmaterial“. Diese Thematik hatte in den letzten beiden Jahren eine besonders hohe Aktualität in den Reaktorsicherheitsdiskussionen und sie hat auch einen engen Bezug zu Strömungs- und Sedimentationsphnomen. Eine Reihe von Versuchen zur Thematik wurde u.a. an der Hochschule Zittau/Görlitz durchgeführt und durch theoretische Analysen des Forschungszentrums Rossendorf ergänzt. Der Tagungsort war damit wie geschaffen für die Präsentation dieses Themas.

Im ersten Vortrag „**Das Barsebäck Ereignis: Ablauf, Bedeutung und Folgen**“ erläuterte **M. Maqua** (GRS) (Bild 4) die Historie der Thematik. Deren Anfänge reichen zurück bis in die 70-er Jahre, in denen erste Untersuchungen und Diskussionen zum Thema „Sumpfsiebverstopfung“ vor allem in den USA stattfanden. Die Thematik rückte 1992 mit dem Kühlmittelverlustereignis im KKW Barsebäck – einem schwedischen Siedewasserreaktor – ins Rampenlicht der Sicherheitsforschung. Bei diesem Störfall war es nach dem Übergang in den Sumpfbetrieb zur Verblockung von Sumpfsieben gekommen. Dem Schichtpersonal gelang es zwar mittels geeigneter Prozeduren die verstopften Sumpfsiebe frei zu spülen, gleichwohl wurde die Problematik blockierter Sumpfansaugsiebe evident. In den skandinavischen Ländern wurden in der Folge des Ereignisses rasch umfangreiche Maßnahmen zur Verhinderung von Sumpfsiebverstopfungen eingeleitet, so wurde u.a. die Fläche der Sumpfsiebe deutlich vergrößert. In der BRD aber auch in anderen Ländern wurde die Thematik geraume Zeit, vor allem für DWR Anlagen, mit niedriger Priorität behandelt



Bild 4: M. Maqua (GRS) eröffnet mit seinem Vortrag die Sitzung zur Thematik „Verstopfung der Sumpfansaugsiebe durch abgelöstes Isolationsmaterial“.

aber 2002 auch als Folge internationaler Expertendiskussionen in der BRD intensiver untersucht. Hierzu wurde eine Reihe von Großversuchen initiiert, deren Ergebnisse dazu führten, dass in einigen Anlagen vor allem in den Jahren 2003 und 2004 die Fläche der Sumpfsiebe vergrößert und die Maschenweite der Siebe verringert wurde. Ferner wurden Isoliermaterialien ausgetauscht. Die Reaktorsicherheitskommission hatte im August 2004 ihre Stellungnahme von 1998 überarbeitet und dabei eine Wertung der bis dahin vorliegenden Versuchsergebnisse und der umgesetzten Maßnahmen vorgenommen. Es blieben allerdings noch einige Fragen offen, z.B. die Folgen von Korrosion an Einbauteilen, die Auswirkungen von Verschmutzungen und der Ablagerung von Korrosionsprodukten (thin bed effect) im Langzeitverhalten etc.. Die Thematik ist somit noch nicht endgültig abgeschlossen. In der Diskussion wurde betont, dass der Klärungsprozess hier zu Lande relativ lange Zeit in Anspruch nahm, dass aber im Vergleich zu anderen Ländern die Problematik in deutschen Anlagen deutlich unkritischer war, da die Freisetzungsraten von Isoliermaterial wegen kleinerer Leckannahmen und höherwertiger Isolierkonstruktionen geringer ist als bei Reaktoren vergleichbarer Leistung im Ausland. Ferner sei wegen fehlender Containment-sprühung mit einem geringeren Isoliermaterialeintrag in den Sumpf zu rechnen.

Im seinem Beitrag „**Untersuchungen zu DWR: Freisetzungen des Isolationsmaterial, Transport zum Sumpf, Verhalten im Sumpf, Siebbelegung und Langzeiteffekte**“ berichtete **U.Waas** (AREVA NP) über die bei AREVA NP durchgeführten Versuche (Bild 5) und deren wesentliche Ergebnisse. Die bereits in der vorangegangenen Diskussion aufgeführten Argumente hinsichtlich geringerer Freisetzungsraten und niedrigerer Transportraten wurden in den Versuchen quantifiziert. So ist in den deutschen Anlagen mit einem um eine Größenordnung geringeren Eintrag von fragmentiertem



Bild 5: Versuche der AREVA NP zur Freisetzung und Fragmentierung von Isolationsmaterial.

Isoliermaterial zu rechnen als in den meisten ausländischen Druckwasserreaktoren. In den Versuchen konnte das Ablagerungsverhalten der fragmentierten Isoliermaterialien quantifiziert werden. Dabei zeigte sich, dass die verschiedenen Typen von Isoliermaterialien deutliche Unterschiede im Ablagerungsverhalten aufweisen. Neben diesen seit geraumer Zeit schon bekannten Ergebnissen berichtete U. Waas über neuere Ergebnisse zum Langzeitverhalten. Es stellte sich heraus, dass insbesondere infolge der Freisetzung von Korrosionsprodukten aus verzinkten Einbauteilen wie Gitterrosten die Druckverluste an den Sumpfsieben bei Auslegungsbedingungen, d. h. bei abdeckender Isoliermaterialfreisetzung, nach 10 bis 15 Stunden Sumpfbetrieb deutlich zunehmen können. Die langsame zeitliche Entwicklung dieses Mechanismus erlaube nach Meinung des Herstellers die rechtzeitige Einleitung von Gegenmaßnahmen per Hand, um die Beläge auf den Sumpfsieben zu entfernen. In der Diskussion wurde vor allem die Notwendigkeit einer messtechnischen Überwachung der Sumpfsiebe (Differenzdrucküberwachung) sowie die Praktikabilität der Handmaßnahmen zur Beseitigung von Sumpfsiebelägen diskutiert.

Im nachfolgenden Beitrag „**Untersuchungen zu SWR Anlagen bezüglich Fragmentierung von Isolationsmaterialien, Transport in die Druck- und Kondensationskammer, Siebbelegung und Langzeiteffekten**“ berichteten H.Ohlmeyer (VENE) und W. Kästner (IPM Zittau) über die Untersuchungsprogramme für Siedewasseranlagen. H. Ohlmeyer trug vor, dass man für die SWR-Anlagen bereits 1993 im Wesentlichen in Kenntnis der skandinavischen Erfahrungen sowie eigener Versuchsreihen eine Bewertung der Sumpfsiebproblematik vorgenommen habe. Dabei habe sich gezeigt, dass auf Grund sehr unterschiedlicher Anlagenkonstruktionen generische Aussagen für SWR kaum möglich sind, sondern für jede Anlage eigene Betrachtungen erforderlich sind. Darüber hinaus gibt es Unterschiede gegenüber den DWR Anlagen, die die sicherheitstechnische Bedeutung beim SWR reduzieren. So sind beispielsweise die Sicherheitsbehälter kleiner, die Wege für das Einspülen freigesetzten Isoliermaterials in die Kondensationskammer sind komplexer, das Kühlmittel enthält keine Borsäure (Korro-

sionseffekte sind deshalb von untergeordneter Bedeutung) und die geodätischen Zulaufverhältnisse für die Nachkühlpumpen sind günstiger als bei DWR Anlagen. In Kenntnis der neueren Versuchsergebnisse aus DWR-Anlagen, insbesondere der Erkenntnis, dass die Fragmentierung der Isoliermaterialien zu kleineren Partikelgrößen führt als zuvor angenommen, wurden einige zusätzliche Versuchsreihen initiiert. Diese Versuche ergaben zwar höhere Druckverluste als in den vorangegangenen Versuchsreihen aus den 90-er Jahren aber immer noch ausreichende Randbedingungen für einen gesicherten Betrieb der Nachkühlpumpen. In der Diskussion wurde u.a. nach der Bewertung der Versuchsergebnisse durch die Gutachter gefragt; diese stehe noch aus; die Übergabe der Ergebnisse stehe aber unmittelbar bevor.

Im letzten Beitrag dieser Themenreihe informierten **V. Noack** (RWE) und H. Ohlmeyer (VENE) über „**Vorsorge- und Nachrüstmaßnahmen in deutschen Kernkraftwerken: Auswirkungen auf den Anlagenbetrieb und die Störfallbeherrschung**“. Im Kern seines Vortrages verwies Noack einerseits auf die geringe Eintrittswahrscheinlichkeit eines Kühlmittelverlust-Ereignisses in deutschen Anlagen wegen besserer Werkstoffwahl und Qualitätssicherung und andererseits auf die mit dem KKW Barsebäck nicht vergleichbaren anlagentechnischen Randbedingungen wie etwa Isolierungsqualität und Sauberkeitsbedingungen. Unter realistischen Annahmen sei eine Verblockung der Sumpfsiebe durch Isoliermaterialien nicht zu besorgen und ausreichend Schadensvorsorge getroffen. Gleichwohl habe man sich zur Abdeckung der Regelwerksanforderungen für Nachrüstmaßnahmen wie Vergrößerung der Sumpfsiebe, Reduzierung von Maschenweiten und Austausch von Isoliermaterialien entschlossen. Derzeit werde auf Grund der letzten Versuchsergebnisse zum Langzeitverhalten noch über Maßnahmen zur Überwachung der Sumpfsiebe nachgedacht. Insgesamt sei die zeitliche Abhandlung des Themas im Lichte der geringen Eintrittswahrscheinlichkeit eines solchen Ereignisses angemessen gewesen. Aus der anschließenden Diskussion ließ sich vor allem eine Erkenntnis extrahieren: die Sumpfsiebthematik wird, insbesondere angesichts der jüngsten Versuchsergebnisse, noch einige Zeit im Fokus der Reaktorsicherheitsforschung stehen.

Sitzung III (Berichterstatter: U. Stoll)

Methoden der Computational Fluid Dynamics (CFD) in der Reaktorsicherheit

Der dritte Themenkomplex „Methoden der Computational Fluid Dynamics (CFD) in der Reaktorsicherheit“ hatte zum Ziel, die stark zunehmende Bedeutung des Themas anhand von 5 Fachvorträgen zu beleuchten. Dabei sollten die heute vorhandenen Möglichkeiten, aber auch die Grenzen der CFD-Codes dargestellt werden.

Den Eröffnungsvortrag hatte **Prof. G. Yadigaroglu** (ETH Zürich), emeritierter Professor der ETH Zürich und weltweit anerkannter Experte auf dem Gebiet der Thermohydraulik und Thermodynamik übernommen. Er referierte unter dem Titel „**Computational Fluid Dynamics and Computational Multi-Fluid Dynamics for Reactor Safety: Prospects and Examples**“. Zu Beginn ging er auf den Begriff der „computational cascade“ ein, um hervorzuheben, dass nicht nur einer Codefamilie die Zukunft gehört. Die Codes, die im micro-scale Bereich eingesetzt werden, sind als CFD-Codes einzuordnen. Anwendungen auf Komponentenebene erfolgen mit meso-scale Codes, während im macro-scale Bereich die klassischen Systemcodes wie RELAP und ATHLET eingesetzt werden. Cross-scale interactions sollten zwischen den verschiedenen Programmfamilien in allen Richtungen möglich sein.

Im weiteren Verlauf zeigte Prof. Yadigaroglu einige konkrete Anwendungsfälle. Dabei wies er insbesondere darauf hin, dass nicht immer die micro-scale CFD-Codes die beste Übereinstimmung mit experimentellen Daten zeigen.

Er schätzte ein, dass die CFD-Codes heute für einphasige Themenstellungen eine Qualität erreicht haben, die einen Einsatz auf dem Gebiet der Reaktorsicherheit und die Anwendung in Genehmigungsverfahren zuließe. Bei den zweiphasigen (CMFD-) Codes ist es nach seiner Meinung noch ein weiter Entwicklungsweg bis zu diesem Niveau. Er glaubt aber, dass insbesondere mit der Entwicklung der nächsten Generation von Reaktoren (GEN IV) die Anforderungen an den Einsatz solcher Codes steigen und deshalb große Fortschritte auf diesem Gebiet zu erwarten sind.

Anschließend stellte **M. Scheuerer** (GRS) den „**Aufbau und die Ziele des deutschen CFD- Forschungsverbundes Reaktorsicherheit**“ vor. Unter diesem Titel arbeiten koordiniert durch die GRS die ANSYS Germany GmbH, die Forschungszentren Karlsruhe und Rossendorf und verschiedene Universitäten an der Weiterentwicklung von CFD-Codes.

Im CFD-Forschungsverbund werden sowohl theoretische, wie auch experimentelle Arbeiten durchgeführt. Die Referenzversuchsanlage TOPFLOW (Transient Two-Phase Flow Test Facility) (Bild 6) wird im Forschungszentrum Rossendorf betrieben. Der Schwerpunkt liegt insbesondere bei der Entwicklung und Validierung von Zweiphasenmodellen. Frau Scheuerer konnte im Vortrag überzeugende Arbeitsergebnisse aus dem Forschungsverbund präsentieren. Sie ging auch auf die Entwicklung und konsequente Anwendung der Best Practice Guidelines für die Anwendung von CFD-Codes ein, mit denen eine hohe Qualität der Ergebnisse sichergestellt werden kann.



Bild 6: Transient Two-Phase Flow Test Facility (TOPFLOW) für Experimente zu transienten Zweiphasenströmungen bei reaktortypischen Parametern.

Nachfolgend sprach **T. Höhne** (FZ Rossendorf) über „**CFD-Analysen zur Kühlmittelvermischung in DWR**“. Auftriebsdominierte Strömungen können sich in DWR insbesondere unter Naturumlaufbedingungen und gleichzeitiger Einspeisung von Notkühlwasser in den RDB bei einem postulierten Leckstörfall einstellen. Derartige Bedingungen liegen bei Deborierungs- bzw. Pressurized-Thermal-Shock Szenarien (PTS) vor. Deshalb lag ein Schwerpunkt der Arbeiten auf der Nachrechnung von Versuchen an der ROCOM-Anlage. In seinem Vortrag stellte er Ergebnisse sowohl für ein PTS-Experiment, als auch für ein Experiment zur Borverdünnung vor. In beiden Fällen konnte eine sehr gute Übereinstimmung zwischen experimentellen Daten und Ergebnissen von Rechnungen mit einem CFD-Code erreicht werden. Die Qualität der Rechenergebnisse hängt maßgeblich von der Wahl des Turbulenzmodells ab.

An einem weiteren Anwendungsbeispiel zeigte T. Höhne den enormen Fortschritt der CFD-Codes in den letzten 5 Jahren auf. Während 2001 die Vermischung beim Auffüllen eines Flutbehälters mittels CFD-Code nicht belastbar berechnet werden konnte, liegen heute Ergebnisse für diesen Fall vor, die gut mit den Messwerten übereinstim-

men. Dieser Fortschritt basiert auch auf der konsequenten Anwendung der so genannten Best Practice Guidelines.

In Fortführung des Themas der zweiten Sitzung des Fachtages gingen **E. Krepper** (FZ Rossendorf) und seine Koautoren aus Rossendorf und aus dem IPM Zittau in ihrem Vortrag „**CFD-Simulation von Mineralwollpartikeln in der Sumpfstromung**“ auf die theoretischen Arbeiten in Rossendorf und die Experimente am IPM Zittau (Bild 7) ein. Schwerpunkte des Projektes sind die Modellierung des Partikeltransportes, der Sedimentation und Resuspension von Mineralwollpartikeln und die Modellierung des Differenzdruckaufbaus an den Sieben durch die Ablagerung von Mineralwollpartikeln. Des Weiteren wird untersucht, wie ein in die Wasservorlage eintauchender Wasserstrahl die Verteilung der Mineralwollpartikel im Wasservolumen und dabei insbesondere die Sedimentation beeinflusst. Er zeigte auf, wie im engen Zusammenspiel von Experimentatoren und Codeentwicklern auch komplizierte Vorgänge, wie z.B. Sedimentation und Resuspension sowie der Einfluss des unter die freie Oberfläche eintauchenden Wasserstrahls auf diese Phänomene heute numerisch beschrieben werden können. Mit den Arbeiten werden Werkzeuge zur Verfügung gestellt, die die Beantwortung zahlreicher mit der Problematik im Zusammenhang stehender praktischer Fragestellungen ermöglichen.

Im letzten Vortrag berichtete **T. Frank** (ANSYS Germany GmbH) über die „**Entwicklung und Validierung von CFD-Modellen für Zweiphasenströmungen**“. Frank zeigte noch einmal sehr eindrucksvoll welche Schritte unternommen werden, um ein Zweiphasen-CFD Modell zu entwickeln und zu validieren. Die Arbeiten aus dem CFD-Forschungsverbund Reaktorsicherheit reichen von der detaillierten experimentellen Untersuchung über die mathematisch-physikalische Modellbildung, die Modellimplementierung und Verifikation bis hin zur Validierung der Modelle an Strömungen in vereinfachten Modellgeometrien. Für die Modellentwicklung und Validierung ist die Beachtung der Best Practice Guidelines von besonderer Bedeutung, um in jeder Phase der Modellentwicklung zwischen experimentell und messtechnisch bedingten Fehlereinflüssen, numerischen Fehlern und Modellfehlern eindeutig differenzieren zu können. Zudem wurde darauf hingewiesen, dass Experimente für die Entwicklung und Validie-



Bild 7: Zittauer Ringkanal zur Untersuchung der Suspension und Sedimentation von Mineralwollpartikeln in der Sumpfstromung.

rung von CFD-Modellen mit neuartiger Zweiphasenmesstechnik ausgestattet sein sollten, die eine hohe räumliche und zeitliche Auflösung der Gasgehaltsverteilung erlaubt. Mit den in Rossendorf entwickelten Gittersensoren steht eine solche Messtechnik zur Verfügung. Abschließend wurde ein Beispiel gezeigt, wie ein derartig entwickeltes und validiertes Mehrphasenmodell auf eine komplexe dreidimensionale Strömung angewandt wird und so zu sehr guten Berechnungsergebnissen führt. Auch hier ist die sehr enge Zusammenarbeit zwischen Experimentatoren und Codeentwicklern zu sehen, die es erst ermöglicht, solche Werkzeuge zu schaffen.

Insgesamt konnte in der Sitzung gezeigt werden, wie auf dem Gebiet der CFD-Codes aktuelle Fragestellungen und Anforderungen der Reaktorsicherheitsforschung die Codeentwicklung entscheidend vorangetrieben haben. CFD-Codes sind heute imstande bei der Beantwortung eines Teils der Fragen zur Reaktorsicherheit zu helfen. Allerdings darf nicht vergessen werden, dass für die qualifizierte Anwendung von CFD-Codes erfahrenes Personal, die Einhaltung Best Practice Guidelines und eine gute experimentelle Basis notwendige Voraussetzungen sind.

Themen der Sitzungen und Vorträge

- 1 Forschungsbedarf zum Betrieb laufender Anlagen aus Sicht der RSK**
M. Sailer, Öko-Institut e. V., Darmstadt

SITZUNG I

Sitzungsleiter: V. Teschendorff, GRS mbH, Garching

Kenntnisstand zu unterstellten Borverdünnungsszenarien in DWR

- I - 2 Borverdünnungsszenarien und ihre sicherheitstechnische Bedeutung**
W. Pointner, GRS mbH, Garching
- I - 3 Borverdünnung durch Störfälle mit Reflux-Condenser-Betrieb: Erkenntnisgewinn und sicherheitstechnische Einordnung aus Betreibersicht**
*R. Wohlstein, E.ON Kernkraft GmbH, Hannover;
Dr. V. Noack, RWE Power AG, Essen*
- I - 4 PKL-Experimente zur Deborierung durch Reflux-Condenser-Betrieb**
K. Umminger, Th. Mull, FANP GmbH, Erlangen
- I - 5 Experimente an der Versuchsanlage ROCOM zur Kühlmittelvermischung bei Wiederanlauf der Naturzirkulation**
S. Kliem, T.Sühnel, H.-M. Prasser, F.-P. Weiß, FZR e. V., Dresden
- I - 6 Sicherheitsnachweise und Auswirkungen auf den Reaktorbetrieb**
U. Stoll, H. Ludwig, FANP GmbH, Erlangen

SITZUNG II

Sitzungsleiter: E. Grauf, safe and efficient, Talheim

Verstopfung der Sumpfansaugsiebe durch abgelöstes Isolationsmaterial

- II - 7 Das Barsebäck-Ereignis: Ablauf, Bedeutung und Folgen**
M. Maqua, GRS mbH, Köln

- II - 8 **Untersuchungen zu DWR: Freisetzung des Isoliermaterials, Transport zum Sumpf, Verhalten im Sumpf, Siebbelegung und Langzeiteffekte**
U. Waas, FANP GmbH, Erlangen

- II - 9 **Untersuchungen zu SWR-Anlagen bezüglich Fragmentierung des Isolationsmaterials, Transport in Druck- und Kondensationskammer, Siebbelegung und Langzeiteffekten**
H. Ohlmeyer, VENE GmbH, Hamburg; W. Kästner, HS Zittau/Görlitz, IPM, Zittau

- II - 10 **Vorsorge- und Nachrüstmaßnahmen in deutschen Kernkraftwerken: Auswirkungen auf den Anlagenbetrieb und die Störfallbeherrschung**
V. Noack, RWE Power AG, Essen; H. Ohlmeyer, VENE GmbH, Hamburg

SITZUNG III

Sitzungsleiter: U. Stoll, FANP GmbH, Erlangen

Methoden der Computational Fluid Dynamics (CFD) in der Reaktorsicherheit

- III - 11 **Computational Fluid Dynamics and Computational Multi-Fluid Dynamics for Reactor Safety: Prospects and Examples**
G. Yadigaroglu, ETH Zürich, Schweiz

- III - 12 **Der deutsche CFD-Verbund: Ziele und Vorhaben**
M. Scheuerer, GRS mbH, Garching

- III - 13 **CFD-Analysen zur Kühlmittelvermischung in DWR**
*T. Höhne, R. Vaibar, U. Rohde, F.-P. Weiss, FZR e. V., Dresden
V. Noack, RWE Power AG, Essen*

- III - 14 **CFD-Simulation von Mineralwollpartikeln in der Sumpfstromung**
*Krepper, A. Grahn, FZR e. V., Rossendorf;
W. Kästner, IPM, Zittau*

- III - 15 **Entwicklung und Validierung von CFD-Modellen für Zweiphasenströmungen**
*T. Frank, ANSYS Germany GmbH, Otterfing;
D. Lucas, H.-M. Prasser, E. Krepper, Jun-Mei Shi, FZR e. V., Dresden*

Entwicklung und Validierung von CFD-Modellen für Zweiphasenströmungen

Thomas Frank, ANSYS Germany GmbH, Otterfing

Dirk Lucas, Hans-Michael Prasser, Eckhard Krepper, Jun-Mei Shi,
Forschungszentrum Rossendorf e. V., Dresden

ENTWICKLUNG UND VALIDIERUNG VON CFD-MODELLEN FÜR ZWEIPHASENSTRÖMUNGEN

Thomas Frank¹, Dirk Lucas², Horst-Michael Prasser², Eckhard Krepper², Jun-Mei Shi²

1 Thomas.Frank@ansys.com, ANSYS Germany GmbH, Otterfing

2 Forschungszentrum Rossendorf e.V., Institut für Sicherheitsforschung

1. Einleitung

„Computational Fluid Dynamics“-Codes ist der Oberbegriff für Rechenprogramme zur mehrdimensionalen numerischen Strömungssimulation. Sie beruhen auf den strömungsmechanischen Grundgleichungen, partiellen Differentialgleichungen, die bis vor einigen Jahren mit Ausnahme von wenigen Spezialfällen als praktisch unlösbar galten. Mit der heute verfügbaren Rechentechnik und fortgeschrittenen numerischen Methoden können jedoch bereits komplizierte Strömungsfelder, wie sie unter anderem in der Automobil- und Luftfahrtindustrie auftreten, berechnet werden. Der Vorteil: An Stelle empirischer Berechnungsformeln, die immer nur für einen bestimmten Anwendungsfall galten, kann auf ein universelles Rechenmodell zurückgegriffen werden. Dadurch werden aufwendige Experimente eingespart, die früher beispielsweise in Windkanälen durchgeführt werden mussten. Durch Eingabe der geometrischen Daten des zu untersuchenden Objekts kann das CFD-Programm leicht an die Randbedingungen der jeweiligen Aufgabenstellung angepasst werden, ohne dabei immer wieder neue Modellgleichungen entwickeln zu müssen.

Von dem, was bei reinen Gas- oder Flüssigkeitsströmungen schon breite Anwendung findet, ist man im Fall zwei- oder mehrphasiger Strömungen jedoch noch weit entfernt. Wenn, wie beispielsweise in einem Kernreaktor, ein Zweiphasengemisch aus Dampf und Wasser die Bannelemente kühlt, dann müssen zusätzlich die Wechselwirkungen zwischen den beiden beteiligten Phasen beschrieben werden. Dort findet ein Austausch von Masse, Impuls und Energie statt. Wie Bild 1 zeigt, ist die Struktur dieser Phasengrenzfläche sehr komplex. Auch bei wachsender Rechenleistung ist es nicht möglich, die rasch veränderliche Gestalt dieser Grenzfläche zu berechnen. Stattdessen wird auf das Zweifluidmodell zurückgegriffen, bei dem angenommen wird, dass an jedem Ort beide Phasen mit einem gewissen Volumenanteil gleichzeitig präsent sind. Wichtige Strukturmerkmale der Phasengrenzfläche werden dann durch Parameter, wie Blasengrößen und Blasenanzahldichten wiedergegeben. Der Schwerpunkt der Forschung liegt auf der Erstellung von Modellgleichungen, die notwendig sind, um die Intensität der Wechselwirkungen an der Phasengrenze in Abhängigkeit von diesen Strukturparametern zu berechnen.

Im Rahmen einer Initiative des BMWA zur „Entwicklung und Anwendung von CFD-Programmen für Phänomene im Kühlkreislauf von Leichtwasserreaktoren“ werden Arbeiten zur Ertüchtigung des Codes CFX von ANSYS gemeinsam vom Institut für Sicherheitsforschung des Forschungszentrum Rossendorf (FZR) und dem Codeentwickler, der ANSYS Germany GmbH durchgeführt. Ausgehend von experimentellen Daten, die an der TOPFLOW-Versuchsanlage des FZR mit innovativer, hochauflösender Messtechnik gewonnen werden, erfolgt die Entwicklung neuer Modelle und Konzepte. Diese werden mit vereinfachten Methoden getestet und nach erfolgreichem Test vom Codeentwickler in CFX implementiert. Anschließend erfolgt die gemeinsame Validierung der Modelle an Hand experimenteller Daten.


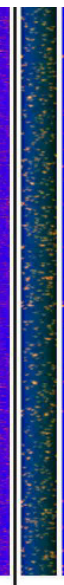
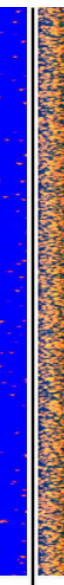
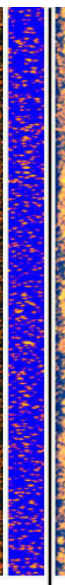
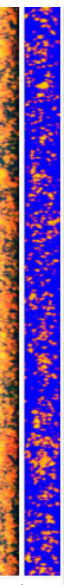
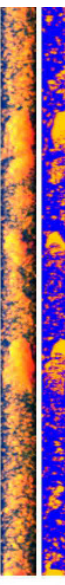
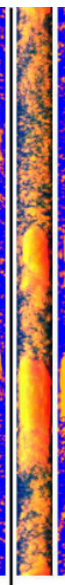
	Nr.	J_L [m/s]	J_G [m/s]	Strömungsform
	1	4,047	0,2190	fein dispers
	2	0,405	0,0096	Blasenströmung mit Wandmaximum
	3	0,405	0,0574	Blasenströmung im Übergangsbereich
	4	1,017	0,2190	Blasenströmung mit Mittenmaximum
	5	1,017	0,3420	Blasenströmung mit bimodaler Blasen-größenverteilung
	6	1,017	0,5340	Pfropfenströmung
1 2 3 4 5 6				

Bild 1: Virtuelle Seitenansichten (linke Säulen) und Schnittbilder durch die Mittelebene des Rohrs (rechte Säulen) für verschiedene Blasenströmungen

Dieses Vorgehen soll im folgenden am Beispiel der Entwicklung von Modellen für adiabate Blasenströmungen demonstriert werden. Ausgangspunkt sind hierbei Experimente für eine aufwärtsgerichtete vertikale Rohrströmung. Für die spezielle Strömung wurden Modelle für den Impulsaustausch zwischen den Phasen sowie für Blasenkoaleszenz und Zerfall getestet. Aus Untersuchungen mit einem stark vereinfachten Modell wurde die Notwendigkeit eines inhomogenen Mehrblasenklassenmodells abgeleitet. Das gemeinsam erarbeitete Konzept wurde dann den CFX implementiert. Weiterhin konnten Empfehlungen für die zu verwendenden Modelle für Blaskäfte abgeleitet werden. Die Validierung des CFX-Codes mit diesen Modellen erfolgte zuerst ebenfalls an Hand von Experimenten für die Rohrströmung, anschließend wurde die Geometrieunabhängigkeit an Experimenten für ein dreidimensionales Strömungsfeld getestet.

2. Impulsaustausch zwischen den Blasen und der Flüssigkeit

Die hier vorgestellten Arbeiten beziehen sich auf den Spezialfall adiabater Blasenströmungen ohne Phasenübergang. In diesem Fall muss lediglich der Impulsaustausch zwischen den Phasen berücksichtigt werden. Dieser kann durch s.g. Blaskräfte, also durch Ansätze für die auf eine Dampfblase wirkenden Kräfte, beschrieben werden. Die Modelle („closure laws“) für diese Blaskräfte dürfen entsprechend der Forderung nach Geometrieunabhängigkeit nur von lokalen Parametern der Strömung, nicht aber von globalen Geometrieparametern abhängen. Die Schwierigkeiten der Modellierung erwachsen daraus, dass diese Blaskräfte nicht nur von den Parametern des Strömungsfelds der Flüssigkeit, sondern auch von der Struktur der Phasengrenzfläche selbst, also der Blasengröße und -form abhängen [1]. Diese Struktur ist äußerst komplex und kann nicht in allen Details im Sinne einer direkten numerischen Simulation modelliert werden [2,3].

Die Entwicklung und Validierung der Modelle für die Blaskräfte erfolgt auf Grundlage experimenteller Daten, die an der Versuchsanlage TOPFLOW mit dem sogenannten

Gittersensor in der benötigten hohen Zeit- und Ortsauflösung zur Verfügung stehen [4]. Die Modellentwicklungen und Validierungen erfolgten bisher am Beispiel der aufwärtsgerichteten Luft/Wasser bzw. Wasser/Wasserdampf-Strömung in vertikalen, zylindrischen Rohren. Diese spezielle Strömung ist durch die klar definierten Randbedingungen gekennzeichnet. Die Zylindergeometrie und die Möglichkeit die Entwicklung der Strömung über die Rohrlänge zu beobachten bieten weitere Vorteile. Quantitative Vergleiche können für ableitbare zeitgemittelte Verteilungen wie z.B. radiale Gasgehaltsprofile oder Blasengrößenverteilungen durchgeführt werden [5]. Die Gültigkeit der entwickelten Modelle ist aber nicht auf Rohrströmungen begrenzt.

Die Experimente für eine stationäre Rohrströmung erfolgten für verschiedene Rohrdurchmesser (DN50 und DN200) an der TOPFLOW-Anlage [6]. Die Volumenstromdichten für Flüssigkeit und Gas (J_L und J_G) wurden in weiten Bereichen variiert. Es wurden verschiedene radiale Geometrien der Einspeisung und verschiedene Durchmesser der Einspeiseöffnungen untersucht. Die Messungen erfolgten bei unterschiedlichen Abständen zwischen Gaseinspeisung und Messebene. Damit liegt eine äußerst umfangreiche Datenbasis für die Modellierung vor.

In den Arbeiten wurden die Drag-Kraft, die virtuelle Massenkraft, die Lift-Kraft, die Wandkraft und die turbulente Dispersionskraft berücksichtigt. Die Drag-Kraft modelliert die Reibung zwischen den Gasblasen und der Flüssigphase. Zusammen mit der Auftriebskraft bestimmt sie die Aufstiegsgeschwindigkeit der Blasen gegenüber der Flüssigkeitsströmung. Aber auch bei allen anderen Relativbewegungen zwischen den Gasblasen und der Flüssigkeit spielt sie eine Rolle. Die virtuelle Massenkraft berücksichtigt, dass stets ein Teil der die Blase umgebenden Flüssigkeit mitgerissen wird, was eine Korrektur der beschleunigten Masse erfordert. Die Lift-Kraft wirkt quer zur Strömungsrichtung und ist proportional zum Gradienten der Flüssigkeitsgeschwindigkeit:

$$\vec{F}_L = -C_L \rho_l \alpha (\vec{w}_g - \vec{w}_l) \times \text{rot}(\vec{w}_l).$$

In dieser Gleichung bezeichnet C_L den dimensionslosen Lift-Kraft Koeffizienten, für den verschiedene empirische Ansätze in der Literatur zu finden sind, ρ_l ist die Dichte der Flüssigkeit, α der Gasvolumenanteil und w_g bzw. w_l sind die Geschwindigkeiten der Gas- bzw. Wasserphase. Die Lift-Kraft spiegelt komplexe Wechselwirkungen zwischen der Blase und dem Geschwindigkeitsfeld der Flüssigkeit wider [7]. Der Koeffizient C_L hängt stark von der Blasengröße ab und ändert nach der Korrelation von Tomiyama [8] für Luft-Wasser Strömungen bei Umgebungsbedingungen bei einem Blasendurchmesser von ca. 5,8 mm sein Vorzeichen. In der aufwärtsgerichteten Rohrströmung wirkt die Lift-Kraft für kleinere Blasen in Richtung Rohrwand, für größere in Richtung Rohrmitte.

Die Wandkraft wirkt hingegen immer in Normalenrichtung von der Wand weg. Sie beschreibt Kraftwirkungen auf Grund von Deformationen der Blasen im wandnahen Scheerfeld und auf Grund wandnaher Turbulenz. Die turbulente Dispersionskraft bewirkt eine Vergleichmäßigung der räumlichen Verteilung der Blasen.

In der aufwärtsgerichteten Rohrströmung verursachen diese Kräfte radiale Umverteilungen der Blasen und die Herausbildung radialer Gasgehaltprofile, die für bestimmte Blasengrößenverteilungen charakteristisch sind. Sie können für quantitative Vergleiche zwischen Rechnung und Experiment genutzt werden.

Es wurden verschiedene Modelle für die o.g. Blasenkräfte untersucht. Für eine voll entwickelte Strömung resultieren die radialen Gasgehaltsprofile im wesentlichen aus einem Gleichgewicht von Lift-, Wand- und turbulenter Dispersionskraft. Dieses Gleichgewicht muss in Abhängigkeit von der Blasengröße betrachtet werden. Für diesen Zweck wird die Gasphase in mehrere Blasenklassen unterteilt. Das gesamte radiale Gasgehaltsprofil erhält man aus einer mit der Blasengrößenverteilung gewichteten Summation der Profile für die einzelnen Blasenklassen.

3. Modellbildung, Implementierung und Validierung

Für den Fall der voll entwickelten Strömung erfolgte der Test der Modelle zunächst mit einem vereinfachten 1D-Modell, welches die Parameter nur in radiale Richtung auflöst (azimutale und axiale Abhängigkeiten entfallen bei voll entwickelter Strömung) und eine große Anzahl von Blasenklassen berücksichtigen kann [9]. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Kombination der Korrelationen für die Lift- und die Wandkraft von Tomiyama mit dem FAD-Modell* für die turbulente Dispersionskraft die experimentellen Ergebnisse am besten wiedergeben [10]. Die radialen Gasgehaltsprofile werden für einen weiten Bereich von Gas- und Flüssigkeits-Volumenstromdichten in guter Übereinstimmung mit dem Experiment berechnet. Insbesondere wird der Übergang zwischen einem Wandmaximum und einem Maximum in der Rohrmitte richtig vorhergesagt (s. Bild 2).

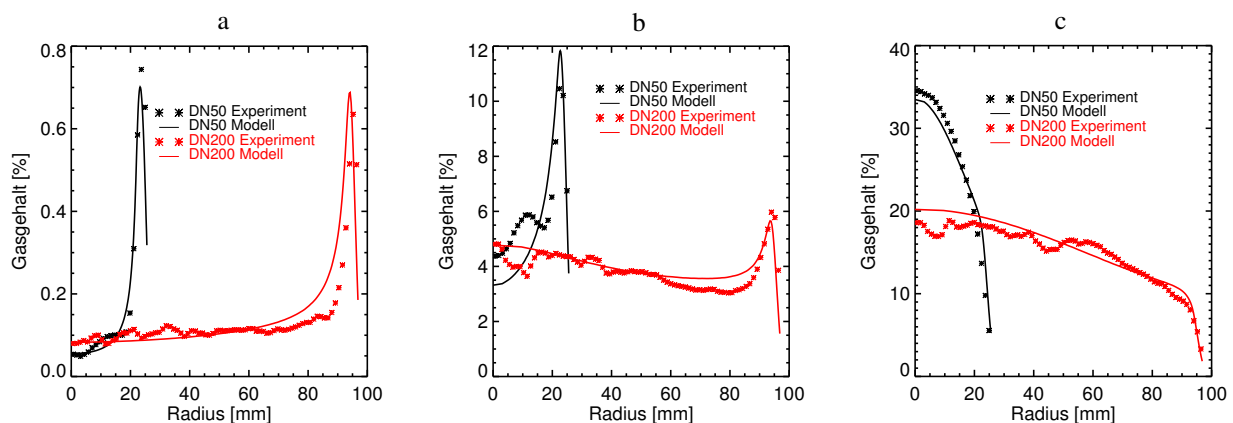


Bild 2: Vergleich gemessener und berechneter Gasgehaltsprofile für verschiedene Volumenstromdichten von Gas und Flüssigkeit (a: $J_L=1\text{m/s}$, $J_G=0,004\text{ m/s}$; b: $J_L=1\text{m/s}$, $J_G=0,057\text{ m/s}$; c: $J_L=0,1\text{m/s}$, $J_G=0,14\text{ m/s}$)

Die entsprechenden Modelle für die Blasenkräfte wurden nach der Erprobung im 1D-Modell in CFX implementiert und gehören seit der Version CFX-5.7 zum Standardumfang des Programms [11]. Auf Grundlage der Untersuchungen wurde die Notwendigkeit eines Mehrblasenklassenmodells deutlich, welches auch unterschiedliche Geschwindigkeiten für die einzelnen Blasenklassen zulässt. Ein solches Modell wurde inzwischen entwickelt und steht ab der Programmversion CFX-10 unter dem Begriff „inhomogenes MUSIG-Modell“ allen Nutzern des Programms zur Verfügung.

* FAD – Favre Averaged Drag. Durch Aufteilung der Drag-Kraft in zeitgemittelte Anteile und Schwankungsanteile sowie die Anwendung der s.g. Favre-Averaging-Methode erhält man eine Gleichung für die turbulente Dispersionskraft.

Bild 3 zeigt Ergebnisse einer Rechnung mit diesem Modell im Vergleich zu experimentellen Daten. Die drei Punktkurven zeigen die berechneten Profile für die 3 berücksichtigten Blasenklassen. Die Summe dieser Kurven liefert das Profil des totalen Gasgehalts (schwarze Kurve). Es stimmt gut mit dem gemessenen Gasgehaltsprofil (rote Dreiecke) überein. Verbleibende Diskrepanzen haben ihre Ursache in der begrenzten Anzahl der berücksichtigten Blasenklassen sowie Abweichungen von der voll entwickelten Strömung durch vereinzelte Koaleszenzen.

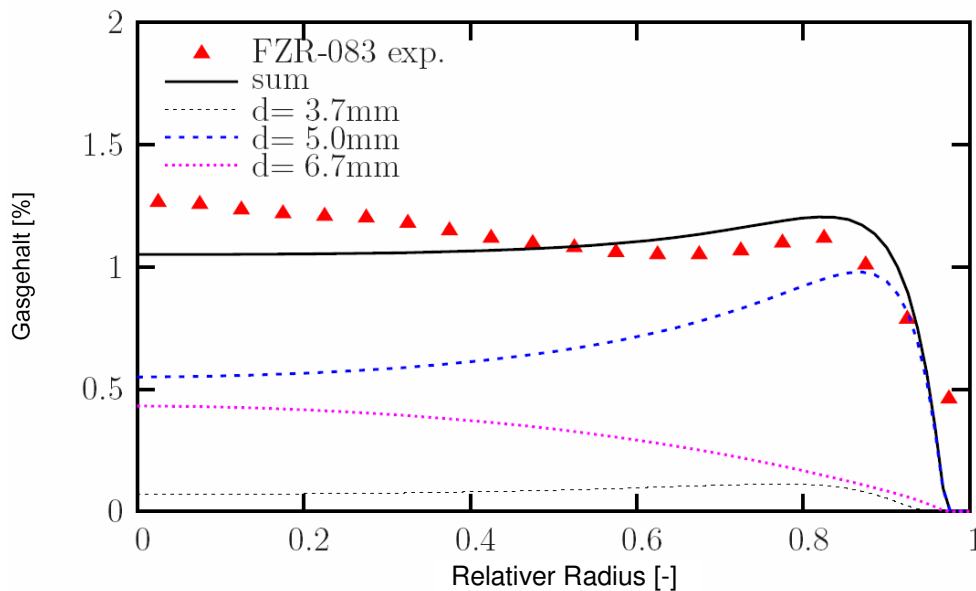


Bild 3: Vergleich eines gemessenen Gasgehaltsprofils (Dreiecke) mit dem Ergebnis einer CFX-Rechnung (schwarze Linie). Die drei Punktkurven zeigen die berechneten differentiellen Profile für die 3 berücksichtigten Blasenklassen. $J_L=1\text{m/s}$, $J_G=0,4\text{ m/s}$.

Als nächster Schritt erfolgte der Übergang zur Untersuchung des sich entlang des Rohrs entwickelnden Strömung. Dabei müssen Blasenkoaleszenz und -zerfall berücksichtigt werden. Bild 4 zeigt als Beispiel Gasgehaltsverteilungen, die unter Berücksichtigung von zwei Blasenklassen mit dem CFX-Code berechnet wurden. Die Gasblasen werden dabei über mehrere Düsen, die gleichmäßig über dem Querschnitt verteilt sind, in die Rohrleitung eingespeist. In Strömungsrichtung sagt CFX eine Umverteilung der Blasen voraus, wobei kleine Blasen zum Rand, große zum Zentrum des Rohrquerschnitts wandern. Diese Rechenergebnisse stimmen gut mit Gasgehaltsprofilen überein, die mittels Gittersensor für die unterschiedlichen Blasengrößenklassen ermittelt wurden.

Die Funktion des inhomogenen MUSIG Modells wird in Bild 5 demonstriert. Eine Rohrströmung wird mit 34 MUSIG-Blasenklassen verteilt auf zwei Geschwindigkeitsfelder beschrieben. Damit wird die Aufweitung der Blasengrößenverteilung vom Einlass (Bild 5 linkes Bild blaue Verteilung) zum oberen Rohrende (rote Verteilung) beschrieben. Das ermöglicht die Simulation von Blasenströmungen, in denen das Maximum der Gasgehaltsverteilung im Zentrum zu finden ist (rechts). In diesem Beispiel musste das Koaleszenz- und Fragmentationsmodell noch angepasst werden. Diese Anpassungen gelten jedoch für einen breiteren Bereich der Randbedingungen. An der Verbesserung dieser Modelle wird gearbeitet.

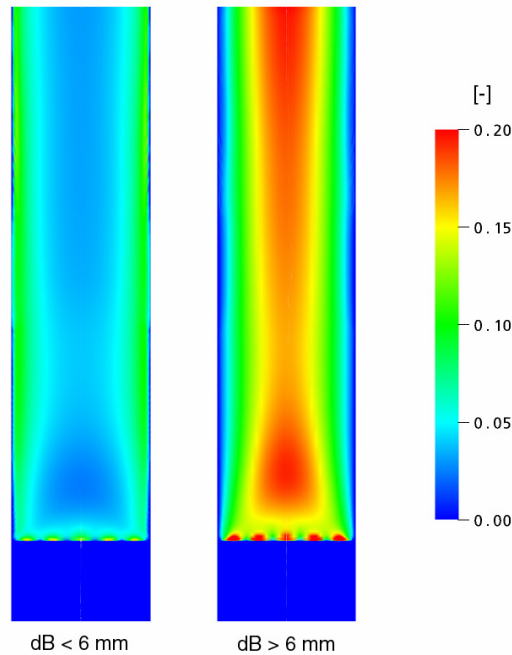


Bild 4: Die quer zur Hauptströmungsrichtung wirkende Auftriebskraft befördert kleine Blasen zum Rand einer aufwärts durchströmten vertikalen Rohrleitung, während größere Blasen zum Zentrum wandern. Das inhomogene MUSIG-Modell, eine gemeinsam mit ANSYS Germany entwickelte neue Komponente von CFX-10, gibt diesen Effekt richtig wieder.

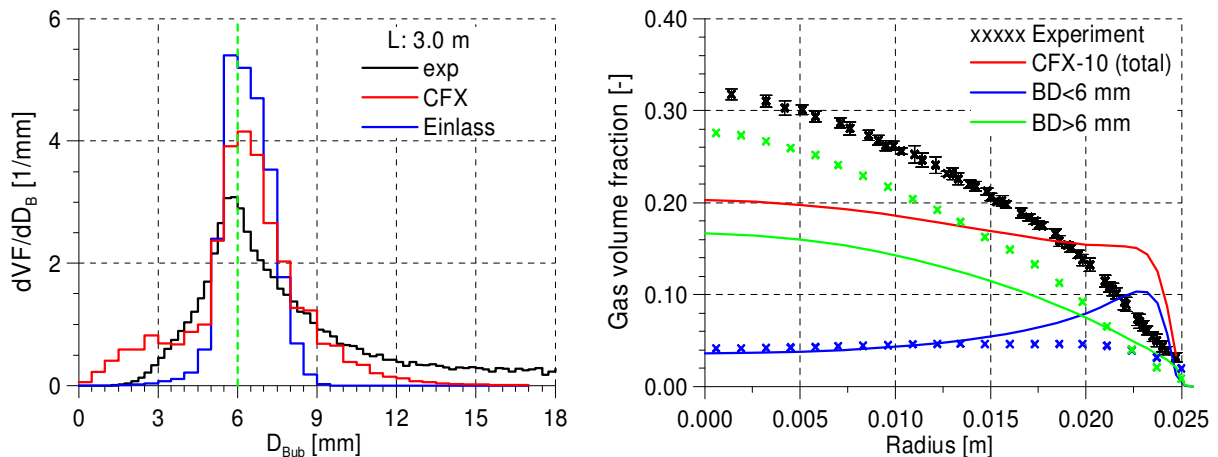


Bild 5: Blasengrößenverteilung (links) und radiale Gasgehaltsverteilung (rechts)

4. Geometrieunabhängigkeit

Die Gültigkeit der entwickelten Modelle ist aber nicht auf Rohrströmungen begrenzt. Vielmehr ist es das Ziel in dem Zusammenwirken von Experimenten und CFD-Simulationen möglichst allgemeingültige Modelle für derartige Strömungsformen zu entwickeln. Um die Anwendbarkeit der Modelle für die Blasenkräfte auch für komplizierte Strömungsfelder nachzuweisen, wurden Experimente mit einer halbseitigen Versperrung des Rohrquerschnitts durchgeführt. Messungen erfolgten wiederum mit dem Gittersensor, wobei der Abstand zwischen der zur Versperrung benutzten Blende (Bild 6) und dem Sensor variiert wurde.

Dadurch kann das dreidimensionale Strömungsfeld in der Umgebung des Hindernisses mit Rechenergebnissen verglichen werden.

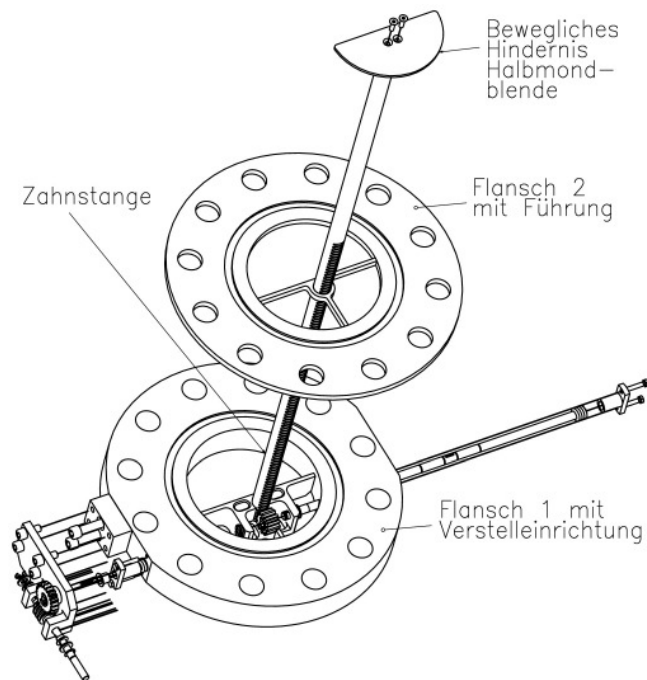


Bild 6: Halbmondblende mit Zahnstangenmechanismus zur Verschiebung innerhalb der vertikalen Testsektion DN200 von TOPFLOW

Noch bevor mit den Experimenten begonnen wurde, ist für eine Kombination der Volumenstromdichten von Gas und Flüssigkeit eine Berechnung der Gasgehaltsverteilung und des Geschwindigkeitsfeldes in der Umgebung der Blende angestellt worden. Hierbei wurde das Eulersche Zweifluidmodell genutzt, die Gasphase wurde durch monodisperse Blasen von 4.8 - 5.2 mm Durchmesser angenähert. Die Geometrie eines ca. 3 m langen Abschnitts der Rohrleitung mit der Blende wurde unter Vernachlässigung der übrigen Einbauten (Zahnstange, Antrieb) in zwei unterschiedlich feinen Gittern aus 119 000 bzw. 473 000 ICEM CFD Hexa-Elementen abgebildet.

Durch die Rechnung wurde hinter der Blende ein großräumiges Rezirkulationsgebiet vorhergesagt, in dem es zu einer starken Anreicherung der Gasphase kommt, wogegen im Stau vor der Blende der Gasgehalt absinkt. Hierzu zeigt Bild 7 auf der linken Seite die mit dem feineren Gitter erzeugten Gasgehalts- und Geschwindigkeitsverteilungen auf einem Längsschnitt der Rohrleitung. Die Schnittebene steht hierbei senkrecht auf der geraden Kante der Halbmondblende. Die theoretisch vorhergesagten Strukturen wurden durch das Experiment voll bestätigt (Bild 7, rechts). Bisher basierten die Berechnungen auf der Annahme von Blasen einer einheitlichen Größe. In der Realität traten Blasen auf, deren Durchmesser signifikant über dem angenommenen Wert lagen. Damit erklärt sich die Überbewertung des Gasgehalts in der Rechnung. Im nächsten Schritt wird das oben beschriebene inhomogene MUSIG-Modell anhand der Messdaten getestet, was die Genauigkeit der Simulation weiter erhöhen wird.

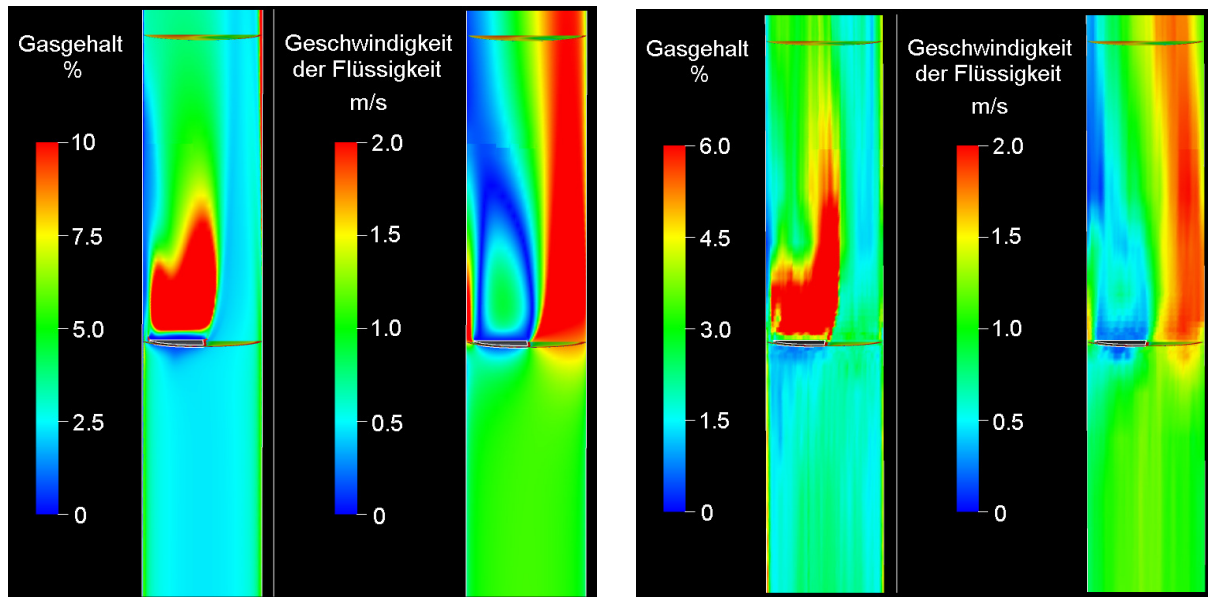


Bild 7: Gasgehalts- und Geschwindigkeitsverteilung auf einem Längsschnitt durch die Teststrecke mit Halbmondblende (Schittsenkrecht zur geraden Kante der Blende), Luft-Wasser-Test, $J_G = 0.037 \text{ m/s}$, $J_L = 1 \text{ m/s}$, **links**: Rechnung, **rechts**: Experiment.

5. Zusammenfassung

Modelle zur Beschreibung der Wechselwirkungen zwischen den Phasen werden auf der Basis hochaufgelöster experimenteller Daten entwickelt und getestet. Nach erfolgreichen Tests erfolgt die Implementierung der Modelle in den CFX-Code. Die anschließende Validierung schließt auch den Nachweis der Anwendbarkeit dieser Modelle auf andere Strömungssituationen ein. Dieses Vorgehen wurde hier am Beispiel von Modellen für adiabate Blasenströmungen erläutert. Weitere Entwicklungen laufen bzgl. Strömungen mit separierten Phasen, z.B. stratifizierten Rohrströmungen oder Strömungssimulationen für den Heißstrang eines Kernreaktors. Für die Zukunft sind Arbeiten zur Verbesserung der Modellierung von Strömungen mit Phasenübergang sowie für hohe Gasgehalte geplant.

Danksagung

Die Arbeiten werden im Rahmen der vom Ministerium für Wirtschaft und Arbeit geförderten Forschungsprojekte 150 1265 und 150 1271 durchgeführt.

Literatur

- [1] Lucas, D.; Krepper, E.; Prasser, H.-M., Evolution of flow patterns, gas fraction profiles and bubble size distributions in gas-liquid flows in vertical tubes. Transactions of the Institute of Fluid-Flow Machinery 112 (2003) 37-46.
- [2] Lucas, D.; Krepper, E.; Prasser, H.-M., Modelling of bubble flow in vertical pipes. The 10th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-10), Seoul, Korea, October 5-9, 2003, paper A00301.
- [3] Krepper, E.; Lucas, D.; Prasser, H.-M., On the modelling of bubbly flow in vertical pipes. Nuclear Engineering and Design 235 (2005) 597-611.

- [4] Prasser, H.-M.; Krepper, E.; Lucas, D., Evolution of the two-phase flow in a vertical tube - decomposition of gas fraction profiles according to bubble size classes using wire-mesh sensors. *International Journal of Thermal Sciences* 41 (2002) 17-28.
- [5] Lucas, D.; Krepper, E.; Prasser, H.-M., Experimental and theoretical investigation of bubble break-up and coalescence in bubbly flows. In: *Bubbly flows - Analysis, Modelling and Calculation* by M. Sommerfeld (Editor), Heat and Mass Transfer Series, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2004, pp. 101-115.
- [6] Lucas, D.; Prasser, H.-M., Scaling effects in vertical bubbly pipe flow. 5th International Conference on Multiphase Flow (ICMF'04), Yokohama, Japan, May 30–June 4, 2004, Paper No. 187.
- [7] Lucas, D.; Prasser, H.-M.; Manera, A., Influence of the lift force on the stability of a bubble column. *Chemical Engineering Science* (accepted for publication).
- [8] Tomiyama, A., Struggle with computational bubble dynamics. 3rd International Conference on Multiphase Flow (ICMF'98), Lyon, France, June 8 –12, 1998.
- [9] Lucas, D.; Krepper, E.; Prasser, H.-M., Prediction of radial gas profiles in vertical pipe flow on basis of the bubble size distribution. *International Journal of Thermal Sciences* 40 (2001) 217-225.
- [10] Lucas, D.; Shi, J.-M.; Krepper, E.; Prasser, H.-M., Models for the forces acting on bubbles in comparison with experimental data for vertical pipe flow. 3rd International Symposium on Two-Phase Flow Modelling and Experimentation, Pisa, Italy, September 22-24, 2004, Paper ha04.
- [11] Shi, J.-M.; Frank, T.; Krepper, E.; Lucas, D.; Rohde, U.; Prasser, H.-M., Implementation and Validation of Non-Drag Interfacial Forces in CFX-5.6. 5th International Conference on Multiphase Flow (ICMF'04), Yokohama, Japan, May 30–June 4, 2004, Paper No. 400.
- [12] Frank Th., Shi J., Burns A.D.: “Validation of Eulerian multiphase flow models for nuclear safety applications”, 3rd Int. Symposium on Two-Phase Flow Modeling and Experimentation, Pisa, Italy, 22-24 September 2004, pp. 1-8.
- [13] Frank Th.: "Progress in the numerical simulation (CFD) of 3-dimensional gas-liquid multiphase flows", 2. NAFEMS CFD-Seminar "Simulation komplexer Strömungsvorgänge (CFD) - Anwendungen und Entwicklungstendenzen", Niedernhausen bei Wiesbaden, Germany, 25.-26. April 2005, pp. 1-18.
- [14] Frank Th., Zwart J.P., Shi J., Krepper E., Lucas D., Rohde U.: "Inhomogeneous MUSIG model - a population balance approach for polydisperse bubbly flows", International Conference "Nuclear Energy for New Europe", NENE-2005, Bled, Slovenia, September 5-8, 2005, pp. 1-13.
- [15] Frank Th.: Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben “Entwicklung von CFD-Software zur Simulation mehrdimensionaler Strömungen im Reaktorkühlsystem”, Reaktorsicherheitsforschung-Vorhaben-Nr. 150 1271, ANSYS Report TR-06-01, pp. 1-72, 2006.
- [16] Prasser H.-M., Frank Th., Beyer M., Carl H., Pietruske H., Schütz P.: “Gas-liquid flow around an obstacle in a vertical pipe – Experiments and CFD Simulation”, Submitted to Jahrestagung Kerntechnik 2006, Eurogress Aachen, Germany, May 16.-18., 2006, pp. 1-6.

Entwicklung und Validierung von CFD-Modellen für Zweiphasenströmungen

Th. Frank¹, D. Lucas², H.-M. Prasser², E. Krepper², J. Shi²

¹ANSYS Germany, 83624 Otterfing
Thomas.Frank@ansys.com

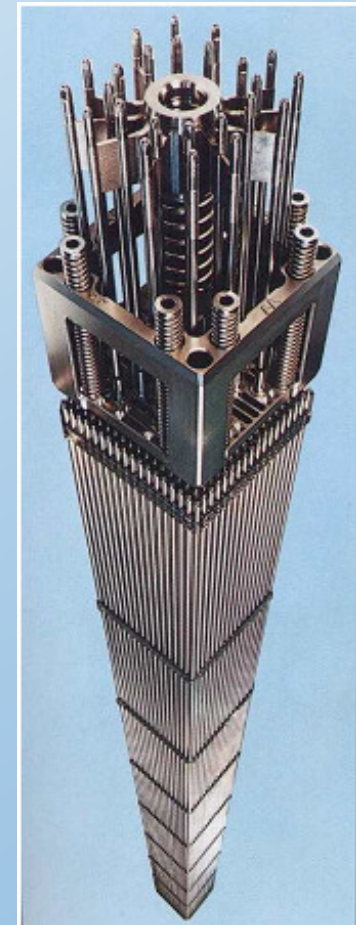
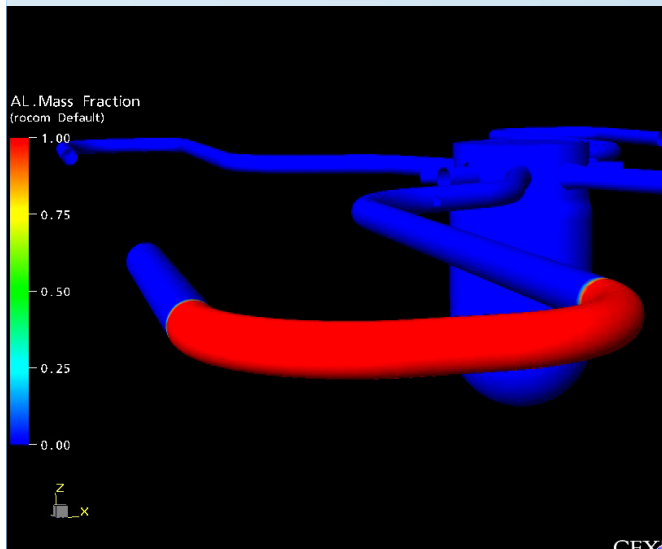
²FZ Rossendorf, Institut für
Sicherheitsforschung



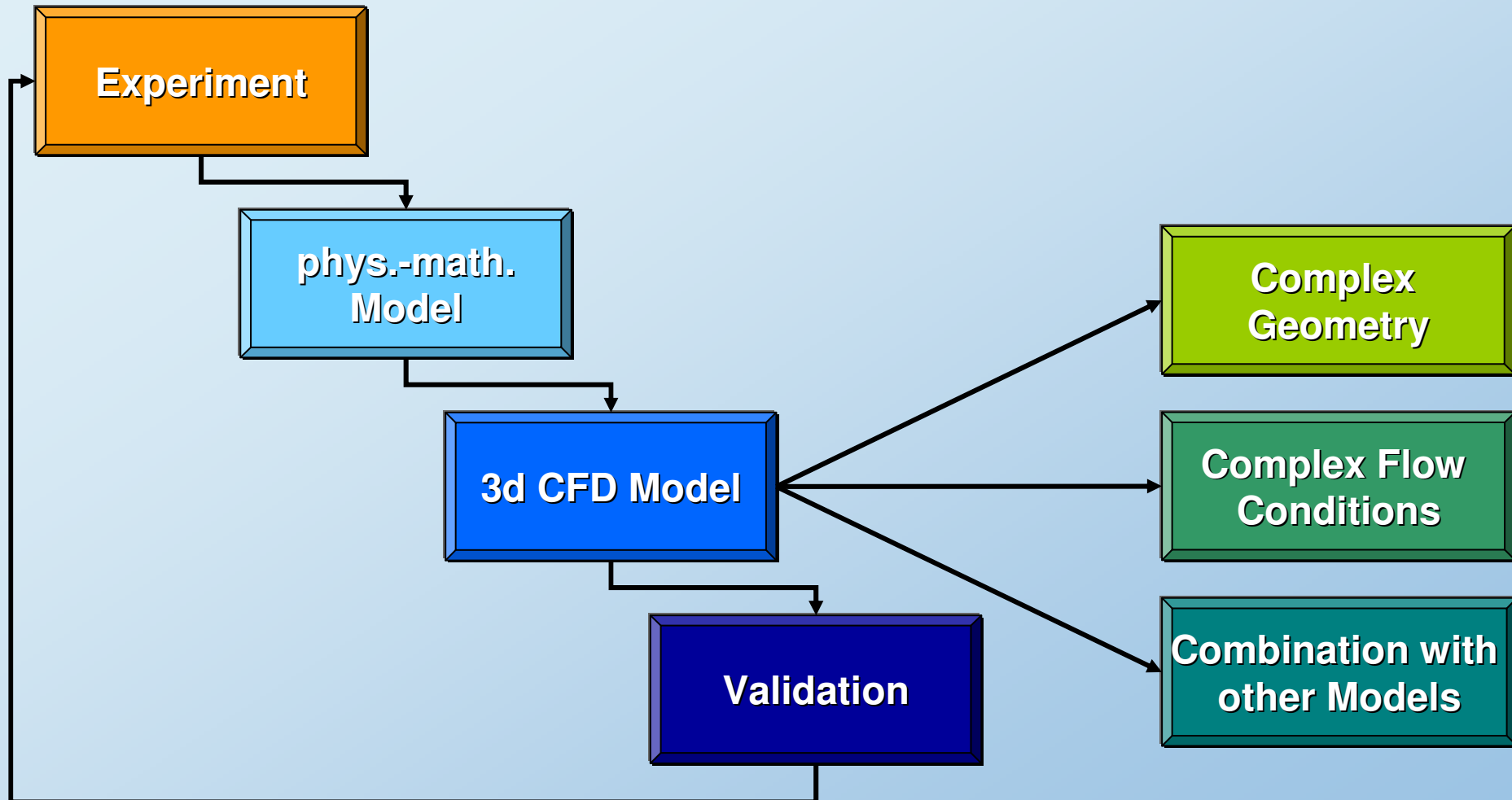
- **Introduction**
 - Methodology of CFD model development
- **Experiments at TOPFLOW test facility @ FZR**
- **Thermohydraulic CFD model development**
 - bubbly flows
 - polydisperse flows
 - condensation & wall boiling
- **CFD model validation**
- **Application of CFD models to complex flows**
- **Summary & Outlook**

Areas of CFD application in NRS:

- Flow through fuel rod bundles / design of spacer grid geometries
- Coupled thermohydraulics and neutron kinetics
- Accident scenarios
 - Boron dilution transients
 - Temperature transients in cold leg
 - Small / large break LOCA
 - Pressurized Thermal Shock
- Containment analysis
 - Hydrogen release and mitigation
 - Fire scenarios, ...



Methodology of CFD Model Development



Methodology of CFD Model Development



Experiment

TOPFLOW Test Facility @ FZR



Pressure:

$$p < 7 \text{ MPa}$$

Temperature:

$$T < 286 \text{ }^\circ\text{C}$$

Power:

$$N_{el} < 4 \text{ MW}$$

Mass flow rate

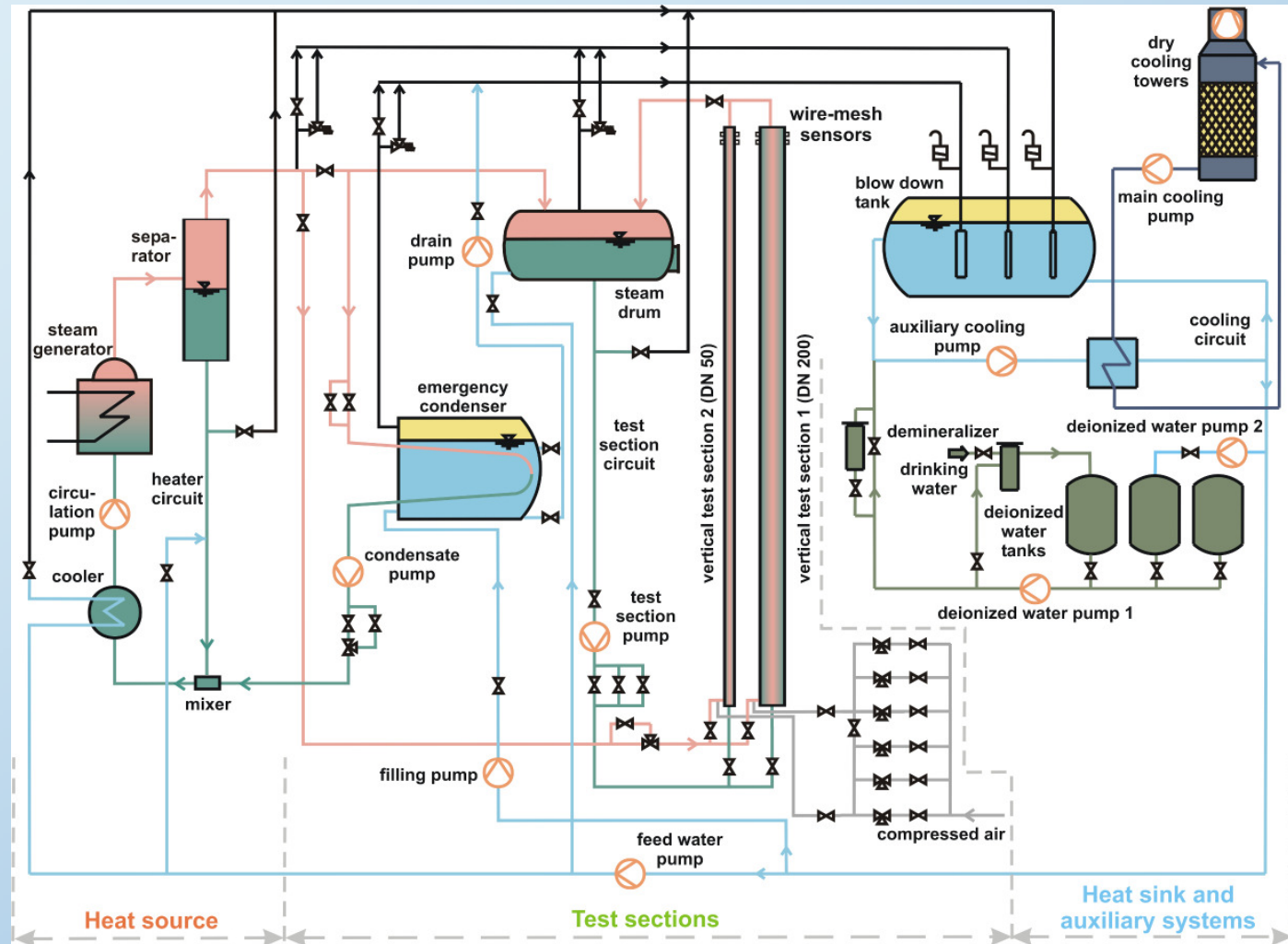
steam: $< 1.7 \text{ kg/s}$

Mass flow rate

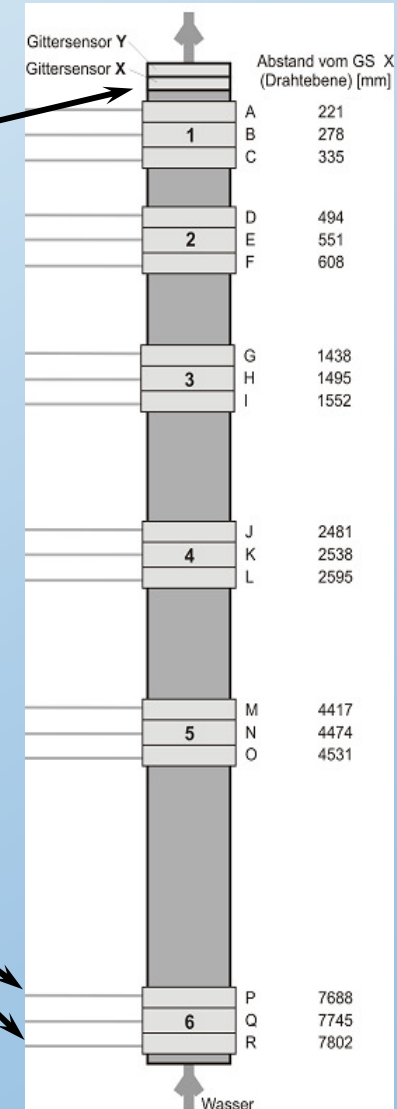
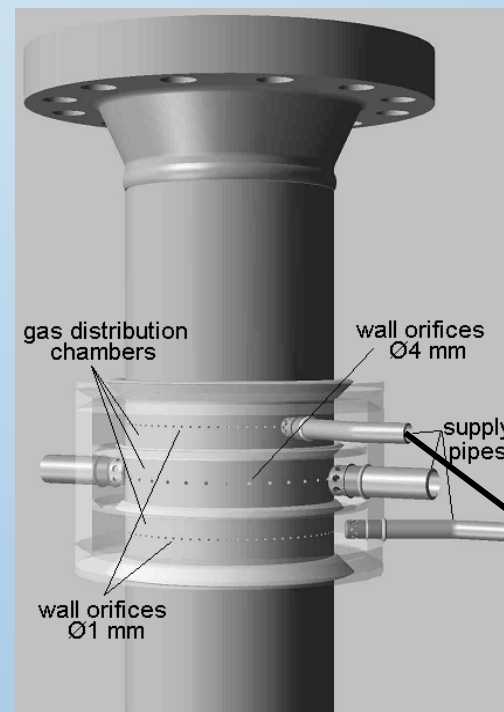
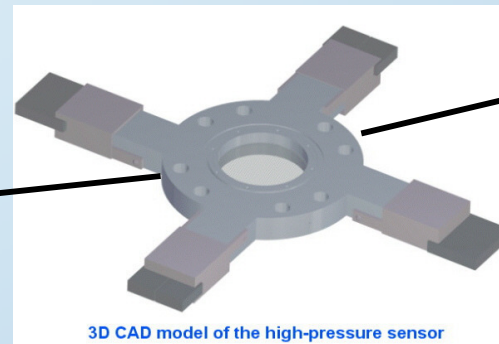
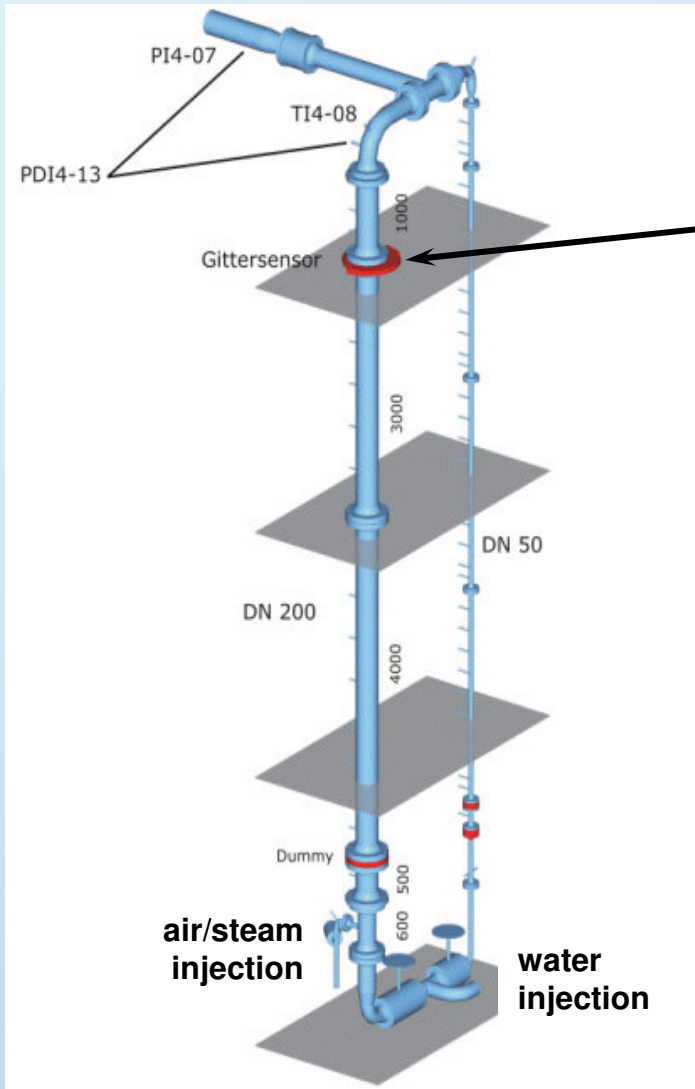
water: $< 50 \text{ kg/s}$

Volume flow rate air:

$$< 900 \text{ m}^3/\text{h}$$



Vertical Pipe Experiments @ TOPFLOW



Flow Patterns for Multiphase Flows

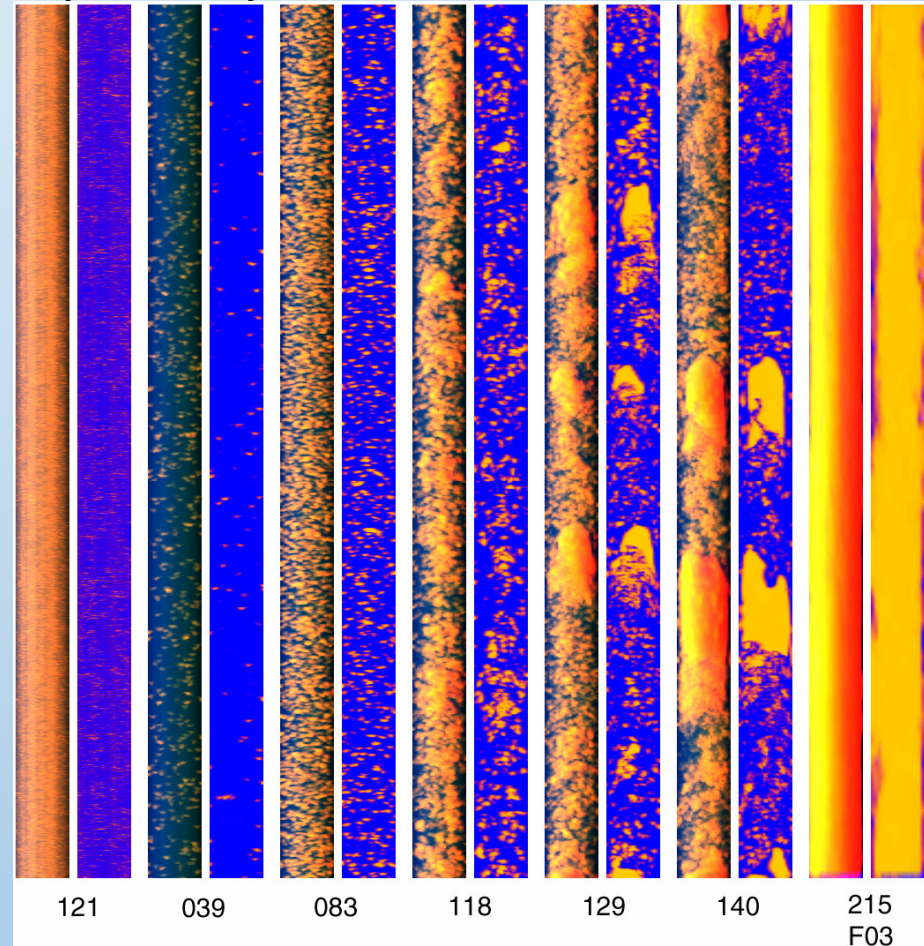


- **Finely disperse (121)**
- **Bubbly flow**
 - Void maximum near the wall (039)
 - Transition region from wall to core peak (083)
 - Centred void fraction maximum / core peak (118)
 - Centred void fraction maximum with bimodal bubble size distribution (129)
- **Slug flow (140)**
- **Annular flow (215)**

→ no generalized modeling approach for full range of flow conditions

→ multiphase flow modeling depends on flow morphology

Experiments by Prasser et al., FZR

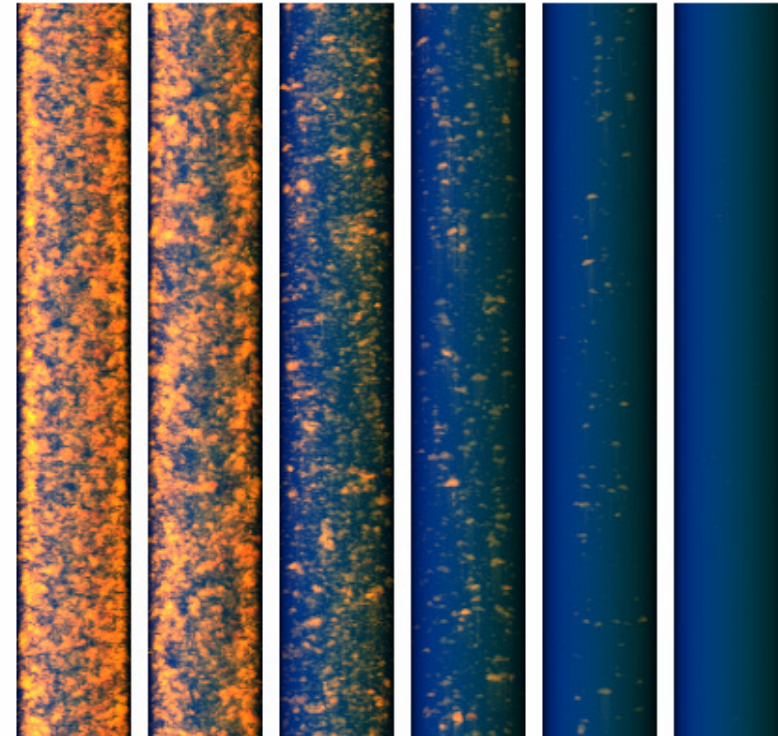
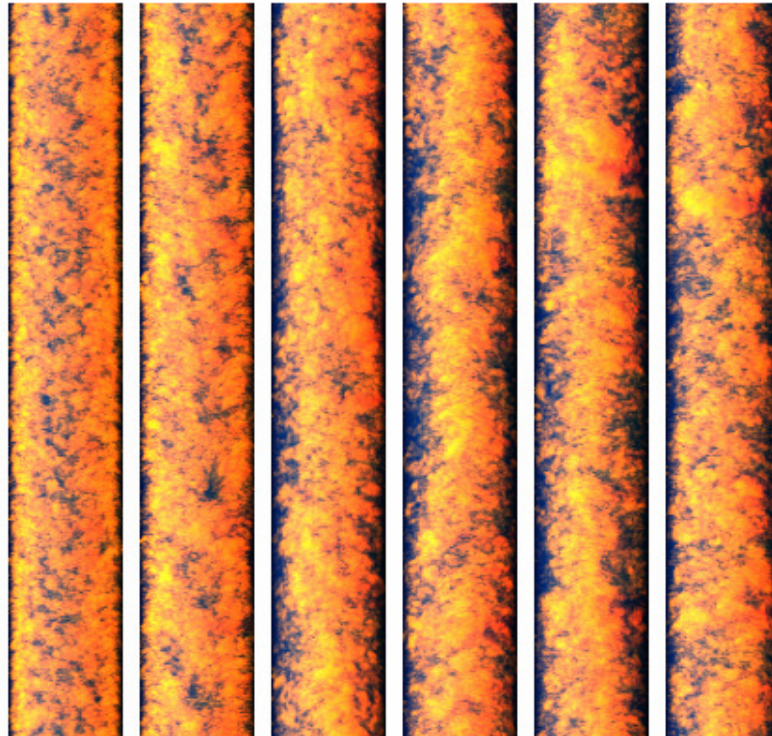


Steam-Water Flows with/ without Sub-cooling



without sub-cooling (dT= 0 K)

with sub-cooling (dT=4 K)



278 551 1495 2538 4474 7745
1.4 2.8 7.7 13 23 40

278 551 1495 2538 4474 7745 mm
1.4 2.8 7.7 13 23 40 L/D

Distance between steam injection and sensor (inlet length)

$J_{\text{Wasser}} = 1 \text{ m/s}$

$J_{\text{Dampf}} = 0.53 \text{ m/s}$

$p = 21.6 \text{ bar}$

Experimental Test Matrix DN200 Air-Water Flows



		Gas superficial velocity [m/s]																				
		0,0025	0,004	0,0062	0,0096	0,0151	0,0235	0,0368	0,0574	0,0898	0,14	0,219	0,342	0,534	0,835	1,305	2,038	3,185	4,975	7,772	12,14	18,97
Liquid superficial velocity [m/s]	4,047	011	022	033	044	055	066	077	088	099	110	121	132	143	154	165	176	187	198	209	220	231
	2,554	010	021	032	043	054	065	076	087	098	109	120	131	142	153	164	175	186	197	208	219	230
	1,611	009	020	031	042	053	064	075	086	097	108	119	130	141	152	163	174	185	196	207	218	229
	1,017	008	019	030	041	052	063	074	085	096	107	118	129	140	151	162	173	184	195	206	217	228
	0,641	007	018	029	040	051	062	073	084	095	106	117	128	139	150	161	172	183	194	205	216	227
	0,405	006	017	028	039	050	061	072	083	094	105	116	127	138	149	160	171	182	193	204	215	226
	0,255	005	016	027	038	049	060	071	082	093	104	115	126	137	148	159	170	181	192	203	214	225
	0,161	004	015	026	037	048	059	070	081	092	103	114	125	136	147	158	169	180	191	202	213	224
	0,102	003	014	025	036	047	058	069	080	091	102	113	124	135	146	157	168	179	190	201	212	223
	0,0641	002	013	024	035	046	057	068	079	090	101	112	123	134	145	156	167	178	189	200	211	222
0,0405	001	012	023	034	045	056	067	078	089	100	111	122	133	144	155	166	177	188	199	210	221	

Experimental Test Matrix DN200 Steam-Water Flows



		Gas superficial velocity [m/s]																				
		0,0025	0,004	0,0062	0,0096	0,0151	0,0235	0,0368	0,0574	0,0898	0,14	0,219	0,342	0,534	0,835	1,305	2,038	3,185	4,975	7,772	12,14	18,97
Liquid superficial velocity [m/s]	4,047	011	022	033	044	055	066	077	088	099	110	121	132	143	154	165	176	187	198	209	220	231
	2,554	010	021	032	043	054	065	076	087	098	109	120	131	142	153	164	175	186	197	208	219	230
	1,611	009	020	031	042	053	064	075	086	097	108	119	130	141	152	163	174	185	196	207	218	229
	1,017	008	019	030	041	052	063	074	085	096	107	118	129	140	151	162	173	184	195	206	217	228
	0,641	007	018	029	040	051	062	073	084	095	106	117	128	139	150	161	172	183	194	205	216	227
	0,405	006	017	028	039	050	061	072	083	094	105	116	127	138	149	160	171	182	193	204	215	226
	0,255	005	016	027	038	049	060	071	082	093	104	115	126	137	148	159	170	181	192	203	214	225
	0,161	004	015	026	037	048	059	070	081	092	103	114	125	136	147	158	169	180	191	202	213	224
	0,102	003	014	025	036	047	058	069	080	091	102	113	124	135	146	157	168	179	190	201	212	223
	0,0641	002	013	024	035	046	057	068	079	090	101	112	123	134	145	156	167	178	189	200	211	222
0,0405	001	012	023	034	045	056	067	078	089	100	111	122	133	144	155	166	177	188	199	210	221	

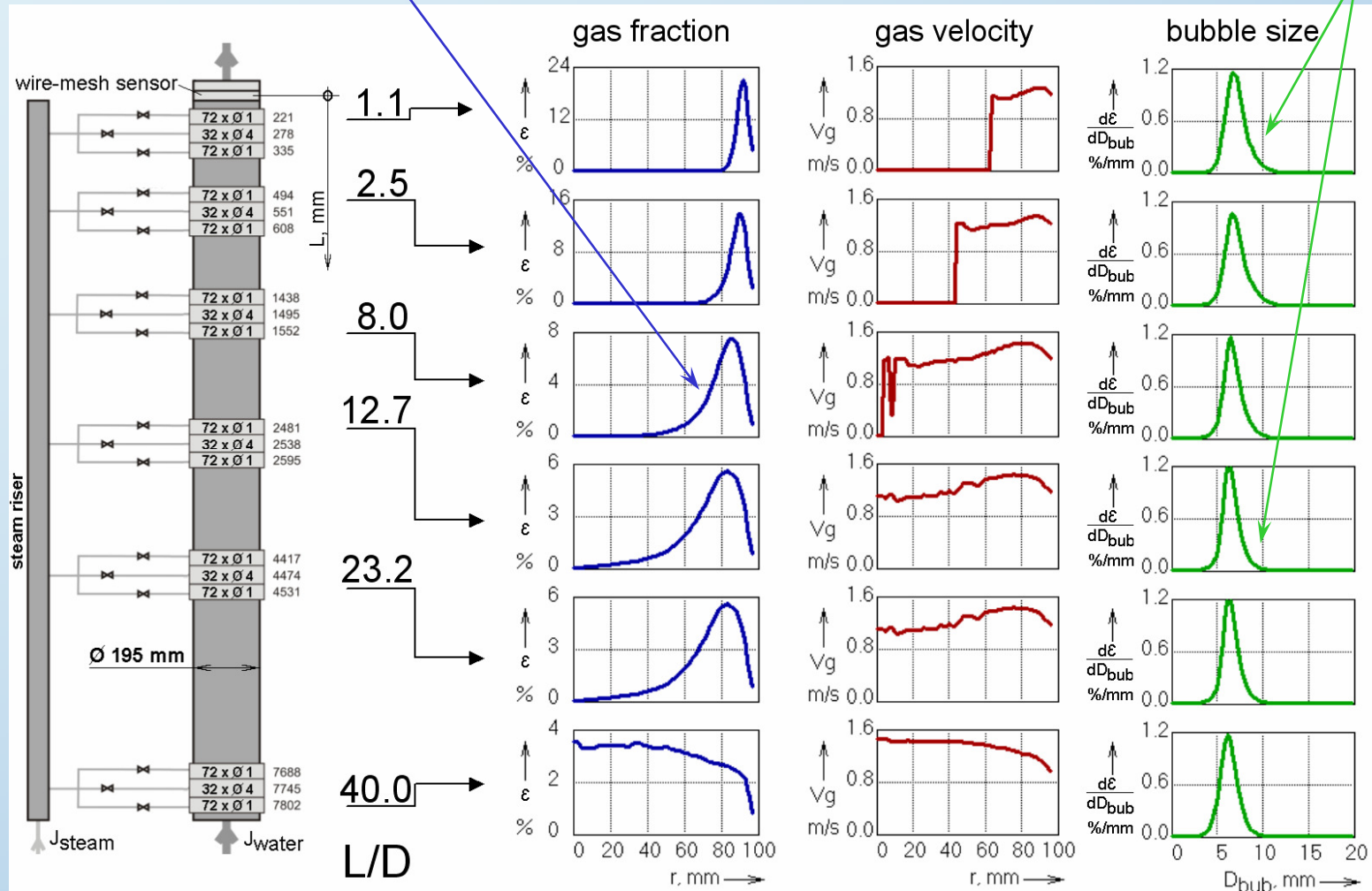
Example for Measured Data:

$J_L = 1 \text{ m/s}$ and $J_G = 0.037 \text{ m/s}$, $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$



Bubble migration

Changing bubble size distribution



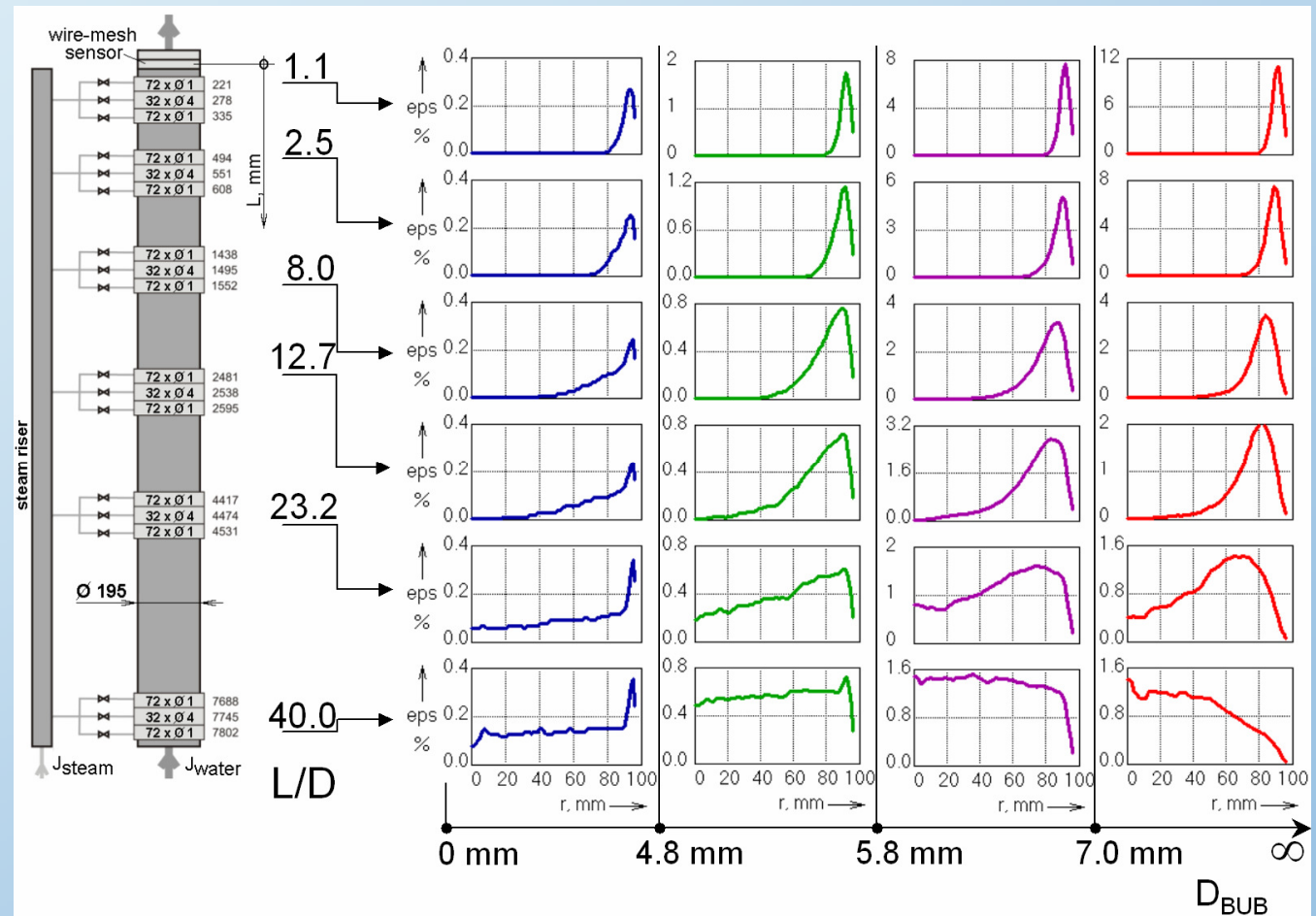
Decomposition of Experimental Data according to Bubble Size



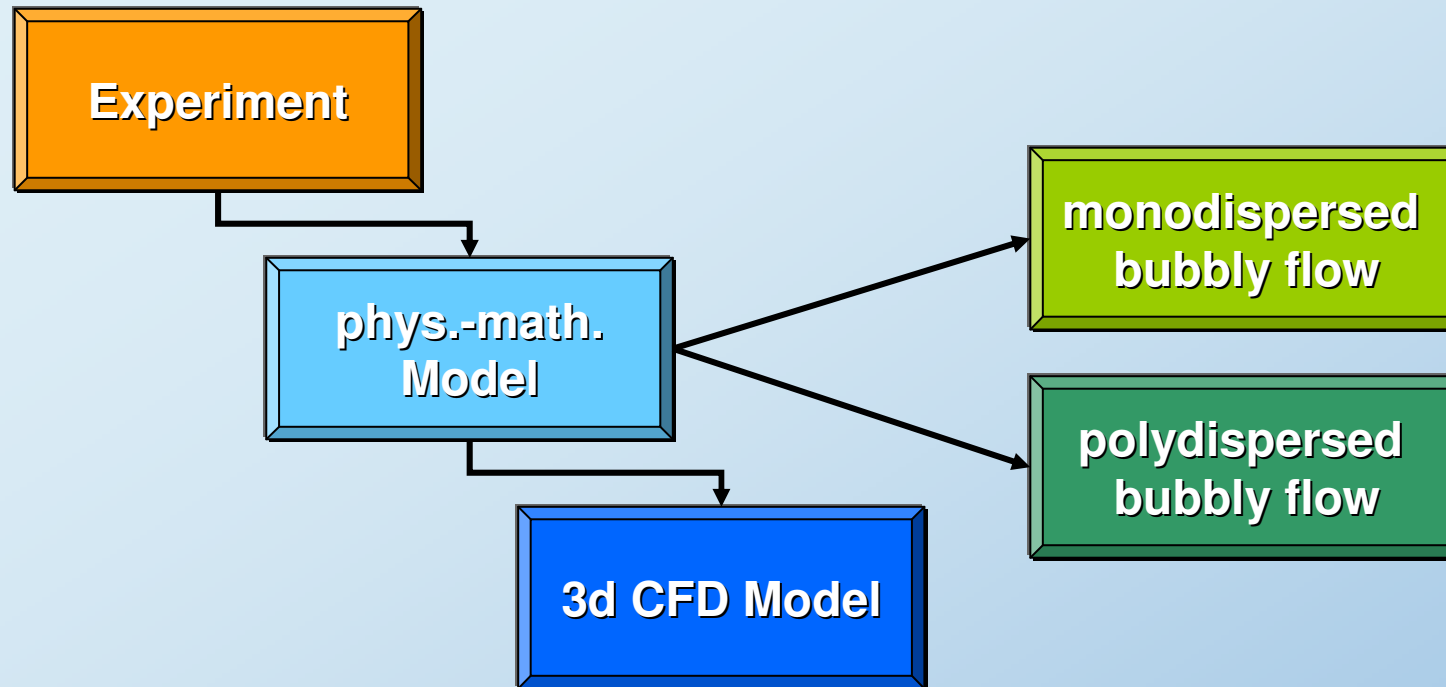
- Gas fraction profiles decomposed according to bubble size classes
- DN200 air-water experiment: $p = 0.12$ MPa at sensor position,

$J_L = 1$ m/s,
 $J_G = 0.037$ m/s,
 $T = 30$ °C

- gas injection orifices:
 $D_{inj} = 1$ mm



Methodology of CFD Model Development



Eulerian MPF Modeling - The Particle Model



Mass weighted averaged conservation equations

- Mass, momentum, energy transport equations for each phase

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_k r_k) + \nabla \cdot (\rho_k r_k \mathbf{U}_k) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_k r_k \mathbf{U}_k) + \nabla \cdot (\rho_k r_k \mathbf{U}_k \mathbf{U}_k) = -r_k \nabla P - \nabla \cdot (r_k \Pi^k) + \mathbf{F}_k + \mathbf{I}_k$$

$$\mathbf{I}_k = \underbrace{\mathbf{F}_D}_{\text{drag}} + \underbrace{\mathbf{F}_L}_{\text{lift}} + \underbrace{\mathbf{F}_{WL}}_{\substack{\text{wall} \\ \text{lubrication}}} + \underbrace{\mathbf{F}_{TD}}_{\substack{\text{turbulent} \\ \text{dispersion}}} + \underbrace{\mathbf{F}_{VM}}_{\text{virtual mass}}$$

- turbulence models for each phase (e.g. k- ϵ / k- ω SST model, 0-eq. disp. phase turb. model)
- interfacial forces need empirical closure
- high void fraction effects, bubble induced turbulence, etc.

Lift force, Wall lubrication force & turbulent dispersion



Lift force:

- due to asymmetric wake and deformed asymmetric particle shape

→ Tomiyama C_L correlation

$$\mathbf{F}_L = C_L r_G \rho_L (\mathbf{U}_L - \mathbf{U}_G) \times \nabla \times \mathbf{U}_L \quad C_L = C_L(\text{Re}_P, \text{Re}_\nabla, Eo)$$

Wall lubrication force:

- surface tension prevents bubbles from approaching solid walls

→ Antal, Tomiyama & Frank W.L.F. models

$$\mathbf{F}_{WL} = -C_{wall} r_G \rho_L \left| \mathbf{U}_{rel} - (\mathbf{U}_{rel} \cdot \mathbf{n}_W) \mathbf{n}_W \right|^2 \mathbf{n}_W \quad C_{wall} = C_W(Eo, y/d_p)$$

Turbulent dispersion force:

- turbulent dispersion = action of turb. eddies via interphase drag

$$\mathbf{F}_{TD} = \frac{3}{4} \rho_F \frac{\overline{C_D}}{d_P} \frac{v_{tF}}{\sigma_{rF}} \left| U_F - U_P \right| r_P \left(\frac{\nabla \overline{r_P}}{r_P} - \frac{\nabla \overline{r_F}}{r_F} \right) \quad \text{FAD model by Burns et al. (ICMF'04)}$$

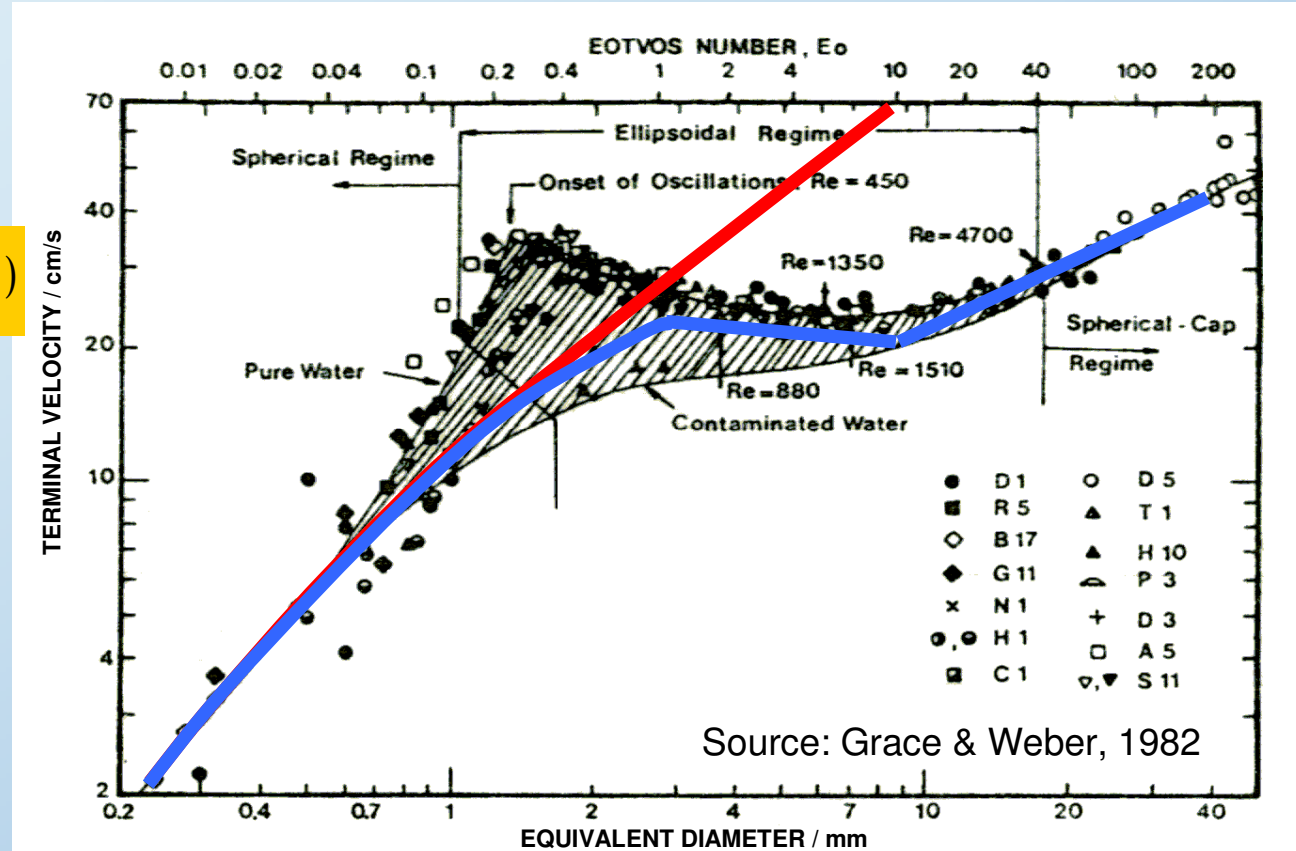
Grace Correlation for Bubble Drag



Experimental investigation of terminal bubble rise velocity:

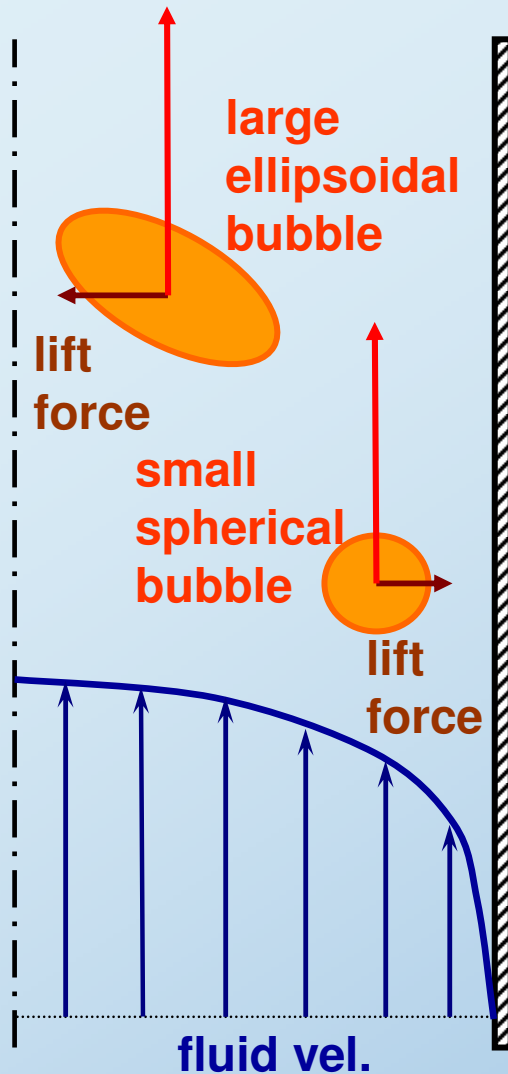
$$F_D = \frac{3}{4} C_D \rho_F \frac{r_P}{d_P} |U_F - U_P| (U_F - U_P)$$

- C_D from force balance of drag, buoyancy and gravity forces



— correlation for spherical regime only
 — Grace correlation

Additional lateral forces: Lift force



Physical mechanism:

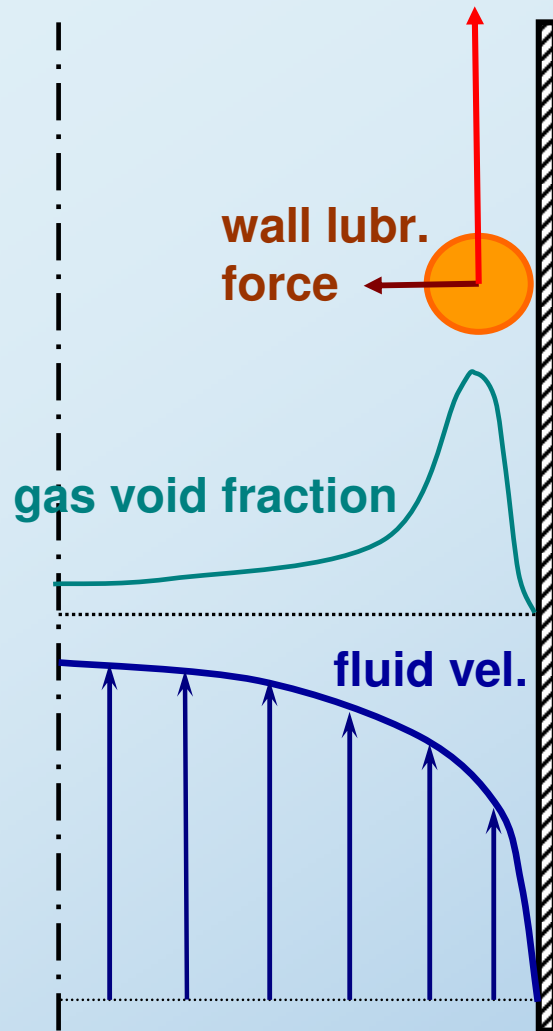
- acts on particles, droplets and bubbles in shear flows
 - due to asymmetric wake
 - due to deformed asymmetric particle shape
- sign change of bubble lift indicated by measurements
- found in DNS results (Ervin & Trygvasson)

→ Tomiyama C_L correlation

$$\mathbf{F}_L = C_L r_G \rho_L (\mathbf{U}_L - \mathbf{U}_G) \times \nabla \times \mathbf{U}_L$$

$$C_L = C_L(\text{Re}_P, \text{Re}_\nabla, Eo)$$

Additional lateral forces: Wall lubrication force



Surface tension prevents bubbles from approaching solid walls very close
 → near wall area of low gas void fraction
 → modelled by a wall force, pushing bubbles away from walls

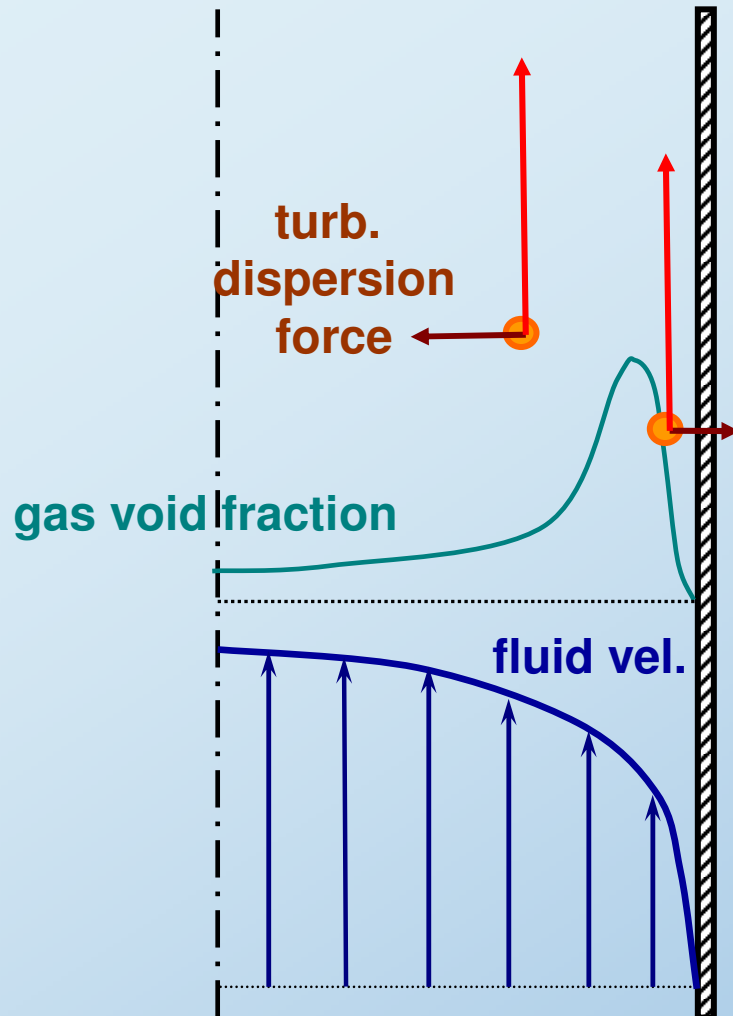
$$\mathbf{F}_{WL} = -C_{wall} r_G \rho_L \left| \mathbf{U}_{rel} - (\mathbf{U}_{rel} \cdot \mathbf{n}_W) \mathbf{n}_W \right|^2 \mathbf{n}_W$$

→ Tomiyama C_{wall} model (1998):

$$C_{wall} = C_W (Eo) \cdot \frac{d_P}{2} \left(\frac{1}{y_W^2} - \frac{1}{(D - y_W)^2} \right)$$

alternatively the Antal (1991) and Frank (2004) models can be used

Turbulent dispersion: The Favre averaged drag model



Issa & Gosman, Carrica et al. and Burns (FAD model):

- turbulent dispersion equalizes gas volume fraction
- **turbulent dispersion = action of turb. eddies via interphase drag**
- derivation via Favre averaging of the drag term:

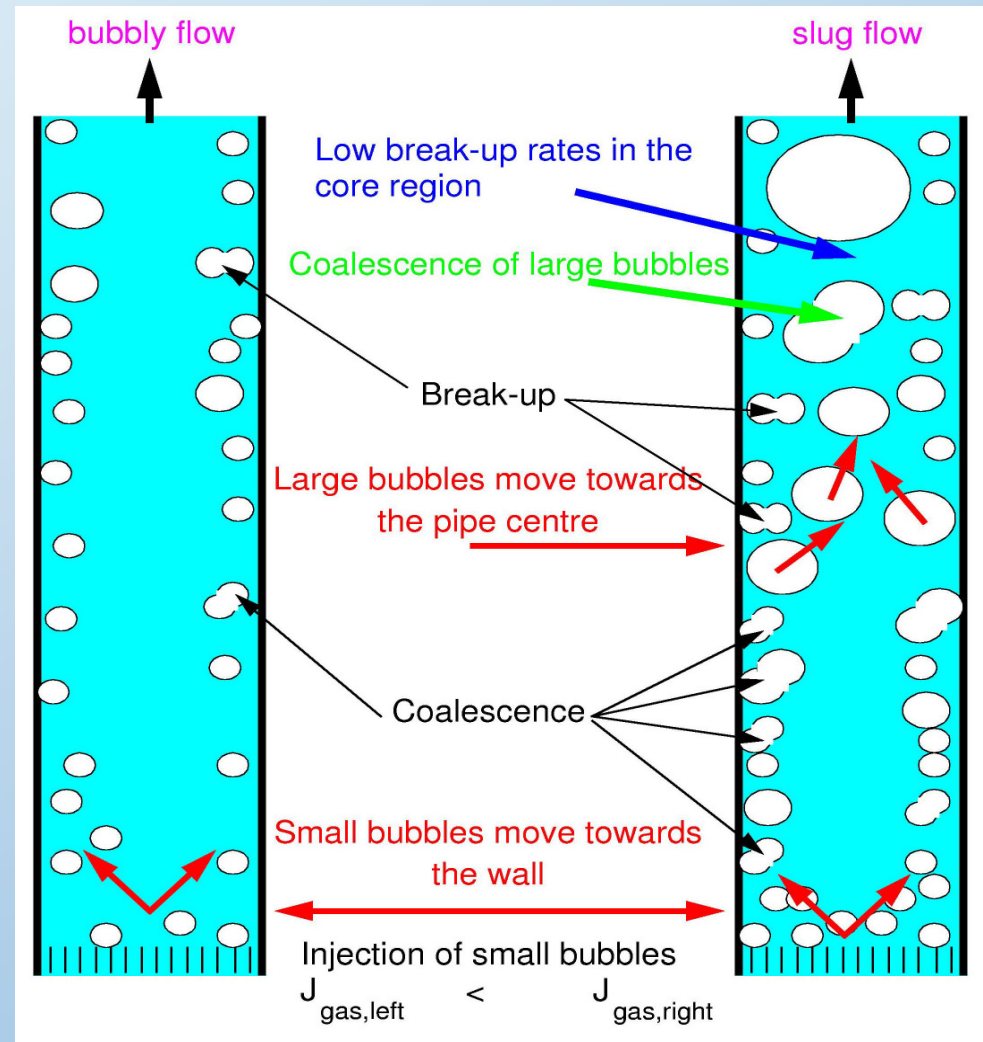
$$\mathbf{F}_{TD} = \frac{3}{4} \rho_F \frac{\overline{C_D}}{d_P} \frac{v_{tF}}{\sigma_{rF}} |U_F - U_P| \overline{r_P} \left(\frac{\nabla \overline{r_P}}{r_P} - \frac{\nabla \overline{r_F}}{r_F} \right)$$

Polydispersed bubbly flow caused by breakup & coalescence



Transition from disperse bubbly flow to slug flow:

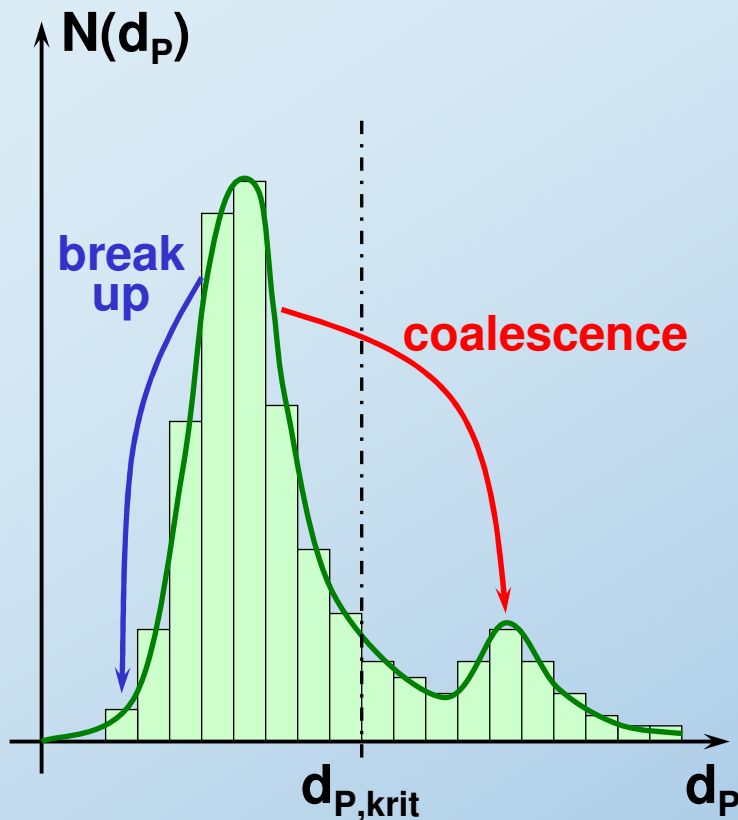
- **coalescence** of bubbles
 - turbulent bubble **breakup**
- bubble size distribution; **polydisperse bubbly flow**
- counter-current radial motion of small and large bubbles; **more than one velocity field**
- **new population balance model (inhomogeneous MUSIG)**



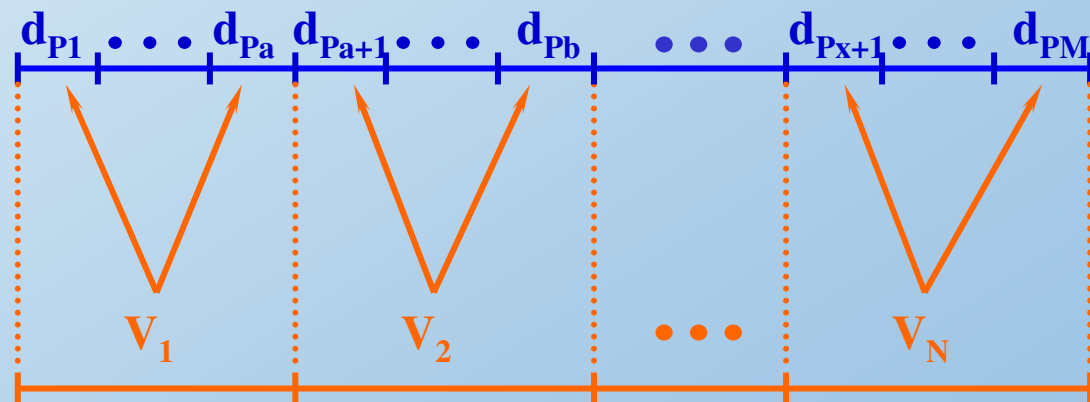
The inhomogeneous MUSIG model



- momentum equations are solved for **N gas phases** (vel. groups)
- size fraction equations for **M bubble size classes** in each vel. group
- bubble coalescence and break-up over all **NxM MUSIG groups**



size classes (M)



velocity groups (N)

Inhomogeneous MUSIG model solves for:

- **N** volume fraction equations
- **N+1** momentum equations
- **(>) 2** turbulence model equations
- **NxM** size fraction equations

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_d r_{dg}) + \frac{\partial}{\partial x^i}(\rho_d r_{dg} u_{g,j}^i) = S_g$$

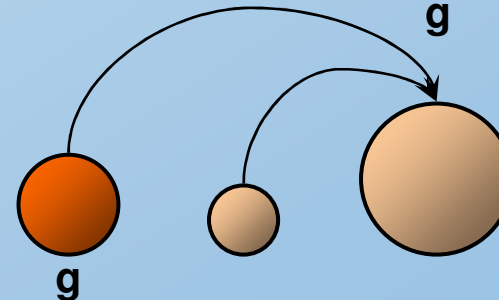
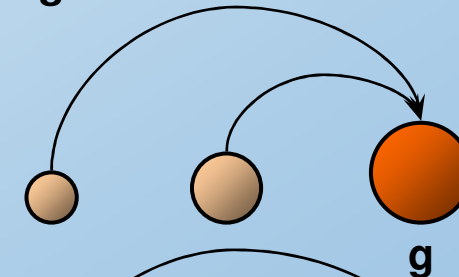
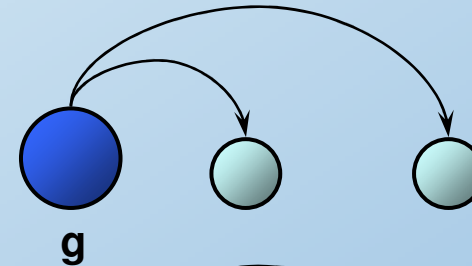
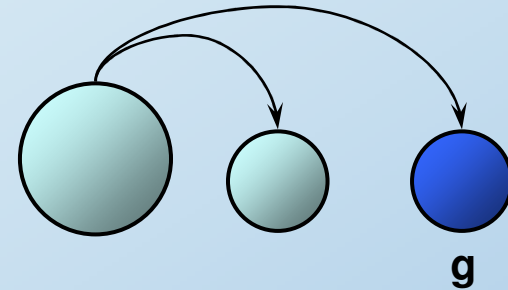
$$g = 1, \dots, N \cdot M$$
$$j = 1, \dots, N$$

$$r_d = \sum_{g=1}^{N \cdot M} r_{dg} \quad , \quad f_{dg} = \frac{r_{dg}}{r_d} \quad , \quad \sum_{g=1}^{N \cdot M} f_{dg} = 1 \quad , \quad \sum_{g=1}^{N \cdot M} S_g = 0$$

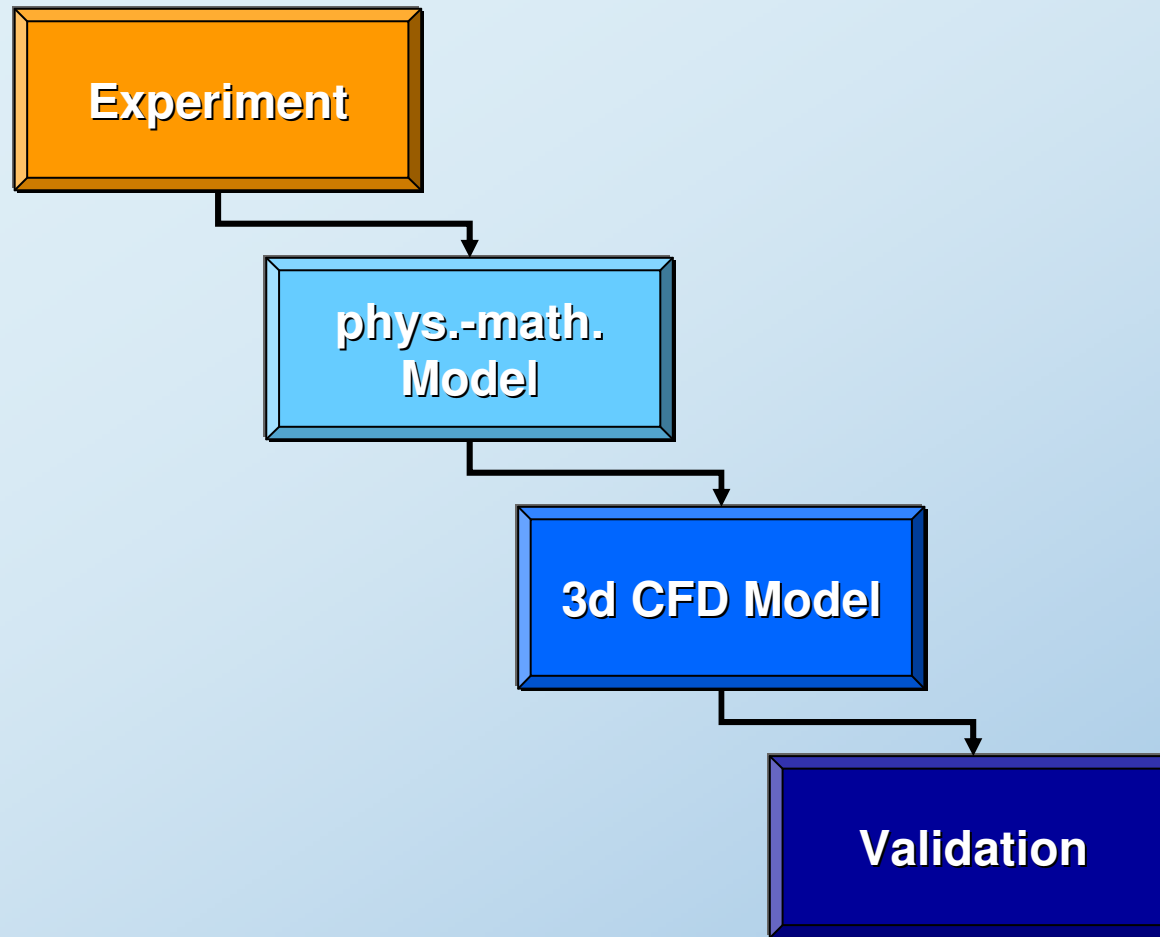
The inhomogeneous MUSIG model



$$\begin{aligned}
 S_g = & \underbrace{\rho_d \sum_{h=g+1}^{N \cdot M} B_{gh} r_{dh}}_{\text{breakup birth}} \\
 & - \underbrace{\rho_d r_{dg} \sum_{h=1}^{g-1} B_{gh}}_{\text{breakup death}} \\
 & + \underbrace{\frac{1}{2} \rho_d \sum_{h=1}^g \sum_{i=1}^g C_{hi} r_{dh} r_{di} X_{g \leftarrow hi} \frac{m_h + m_i}{m_h m_i}}_{\text{coalescence birth}} \\
 & - \underbrace{\rho_d r_{dg} \sum_{h=1}^{N \cdot M} C_{gh} \frac{r_{dh}}{m_h}}_{\text{coalescence death}}
 \end{aligned}$$



Methodology of CFD Model Development

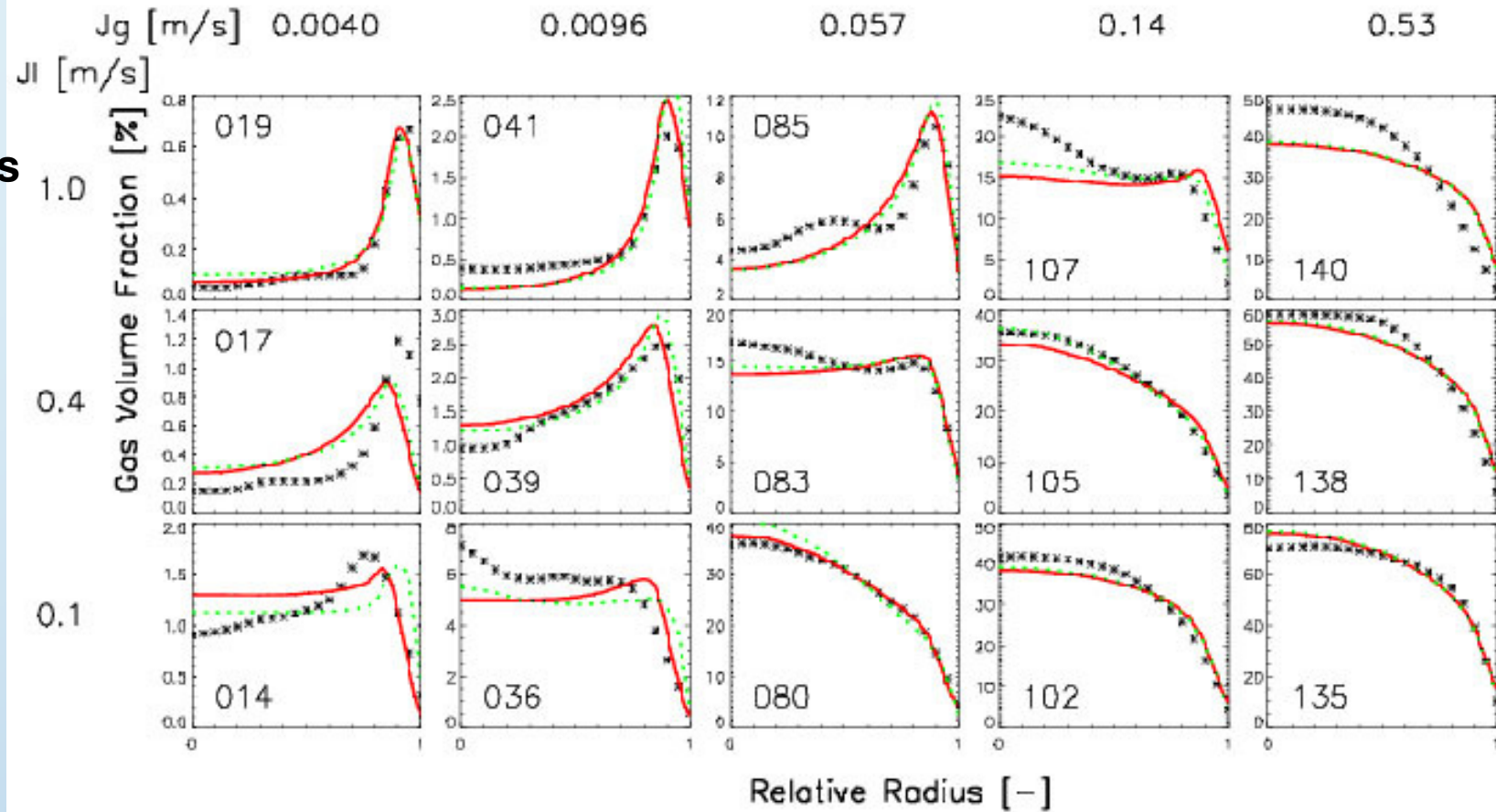


Cost-effective Model Verification using a 1d Test Solver



DN50 pipe experiments

Air-Water



*** experiment, --- Tomiyama Lift & Wall (1) + FAD,

... Tomiyama Lift & Wall (2) + deformation force + FAD

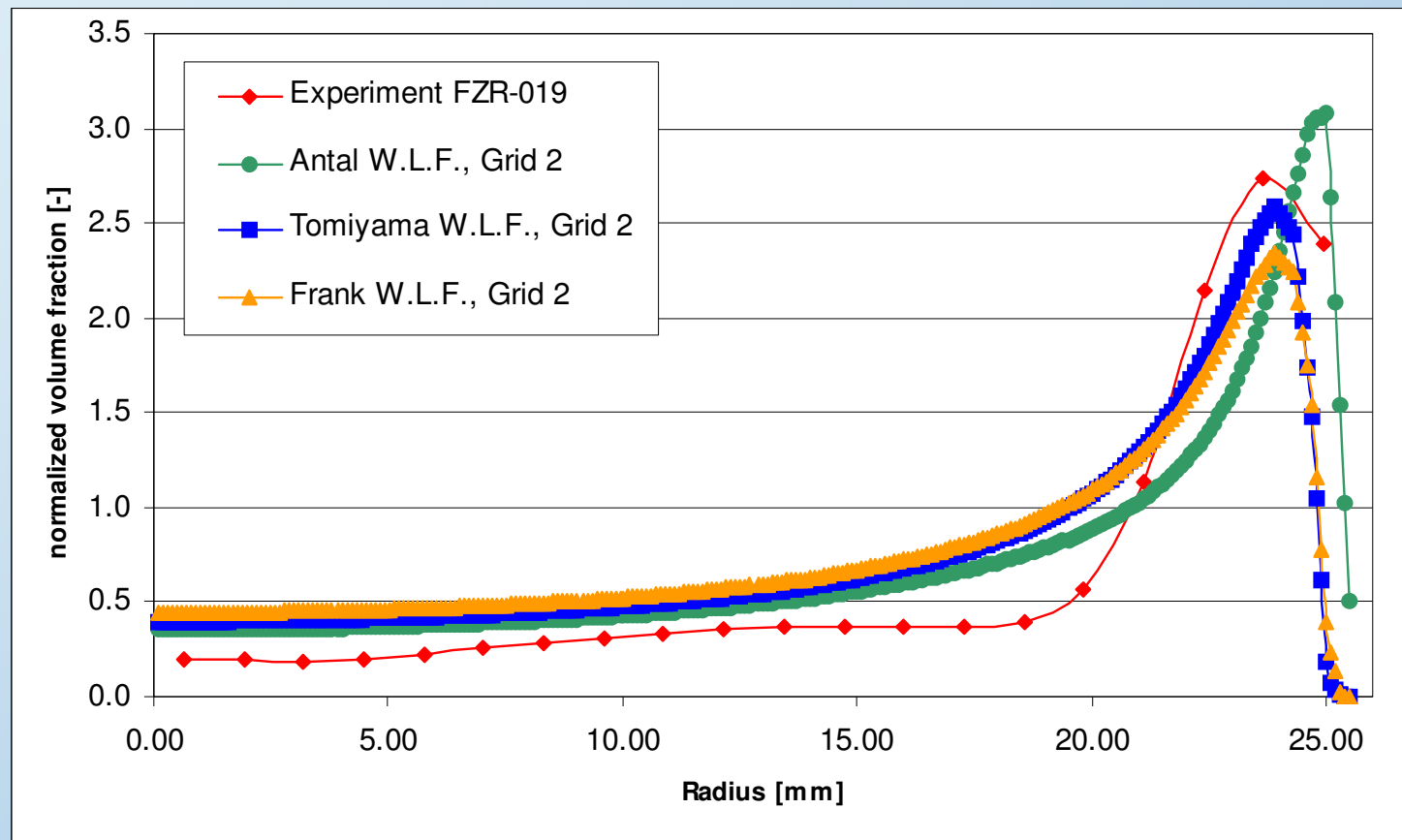
CFX: Monodispersed Bubbly Flow MT-Loop Test Case FZR-019



FZR-019:

$J_L=1.017$ m/s
 $J_G=0.004$ m/s
 $d_p=4.8$ mm

Grace drag
Tomiya lift
T./A./F. Wall L. Force
FAD Turb. Disp.
SST turb. model
Sato model
 $\Delta t=0.002$ s
2210 Iterations



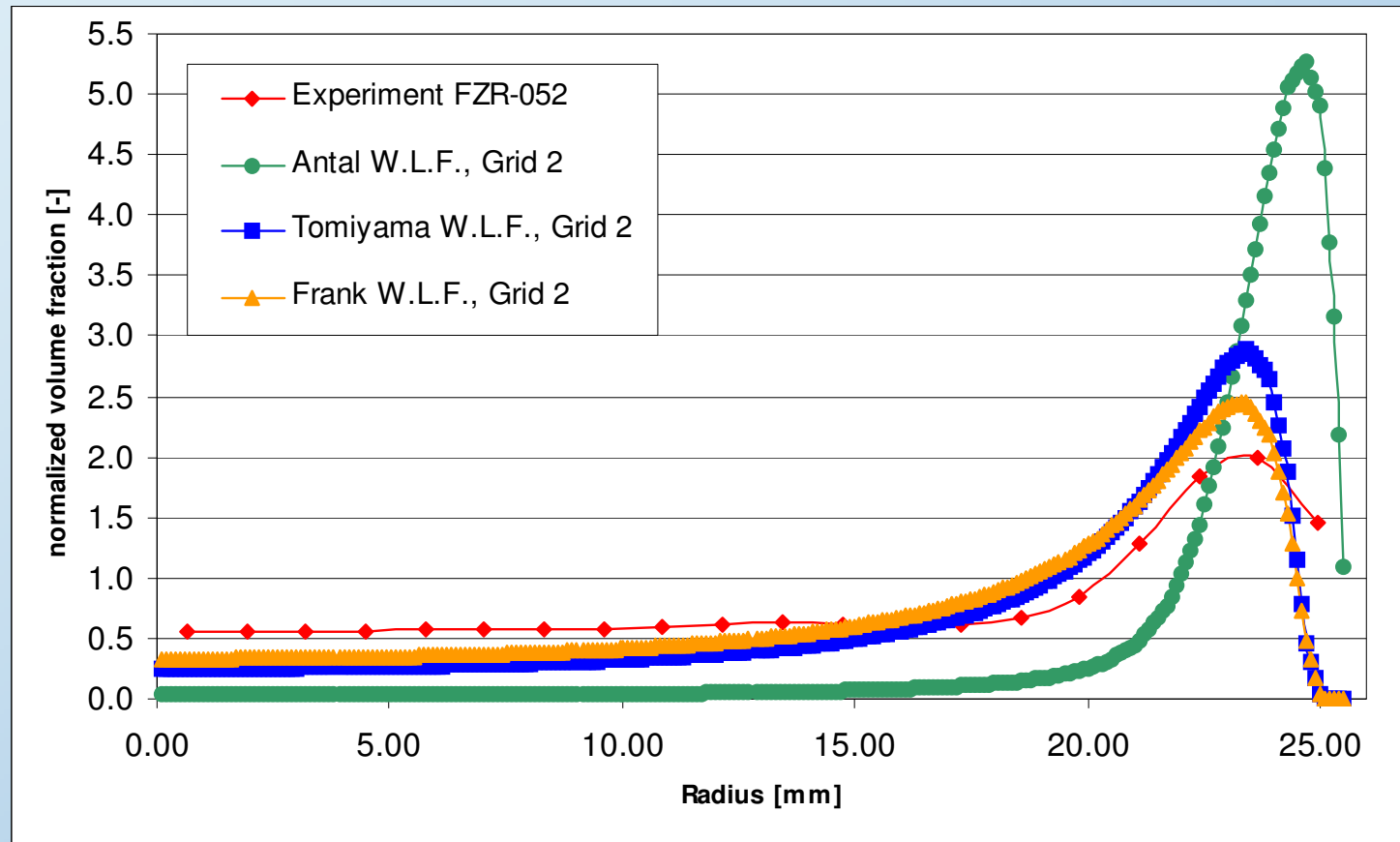
CFX: Monodispersed Bubbly Flow MT-Loop Test Case FZR-052



FZR-052:

$J_L = 1.017$ m/s
 $J_G = 0.0151$ m/s
 $d_p = 4.4$ mm

Grace drag
Tomiya lift
T./A./F. Wall L. Force
FAD Turb. Disp.
SST turb. model
Sato model
 $\Delta t = 0.002$ s
2400 Iterations



CFX: Monodispersed Bubbly Flow MT-Loop Test Case FZR-085



FZR-085:

$J_L=1.017$ m/s

$J_G=0.0574$ m/s

$d_p=4.65$ mm

Grace drag

Tomiyama lift

T./A./F. Wall L. Force

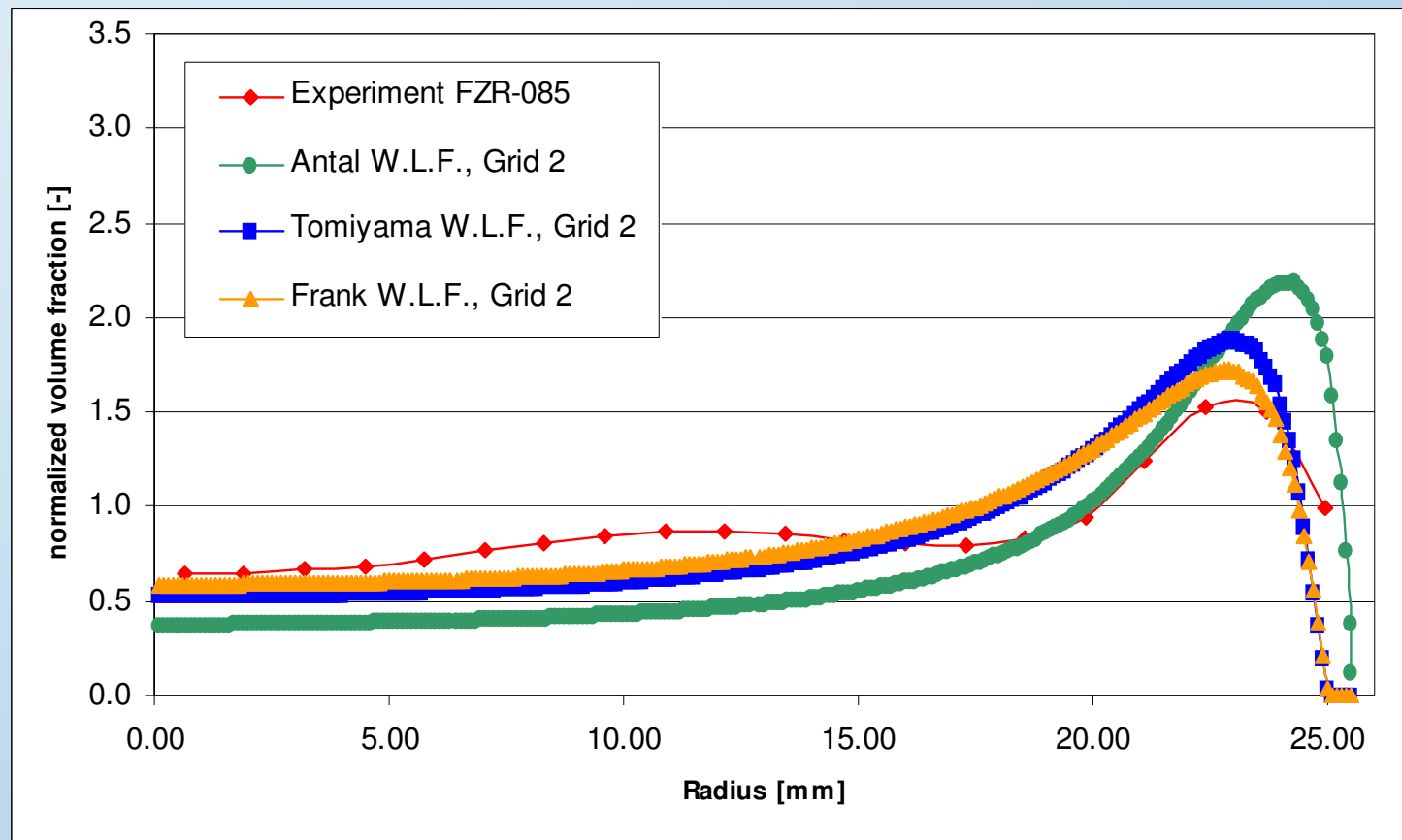
FAD Turb. Disp.

SST turb. model

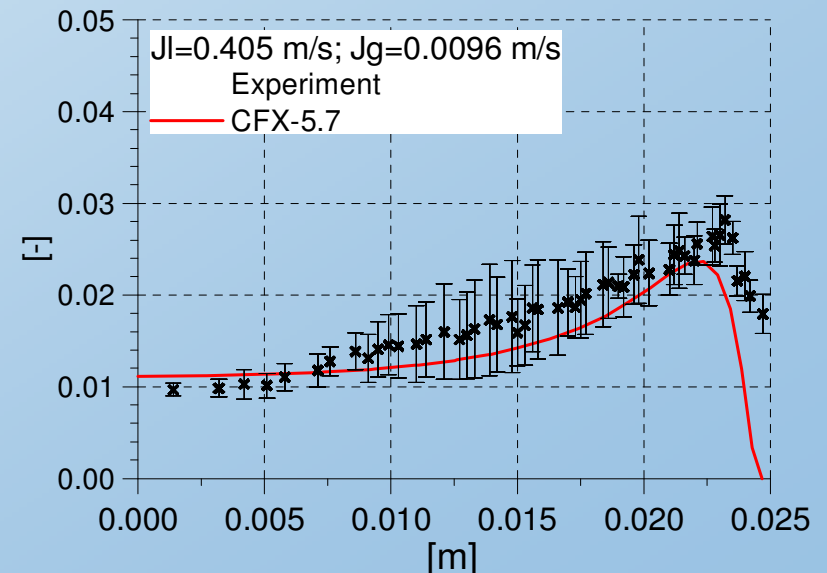
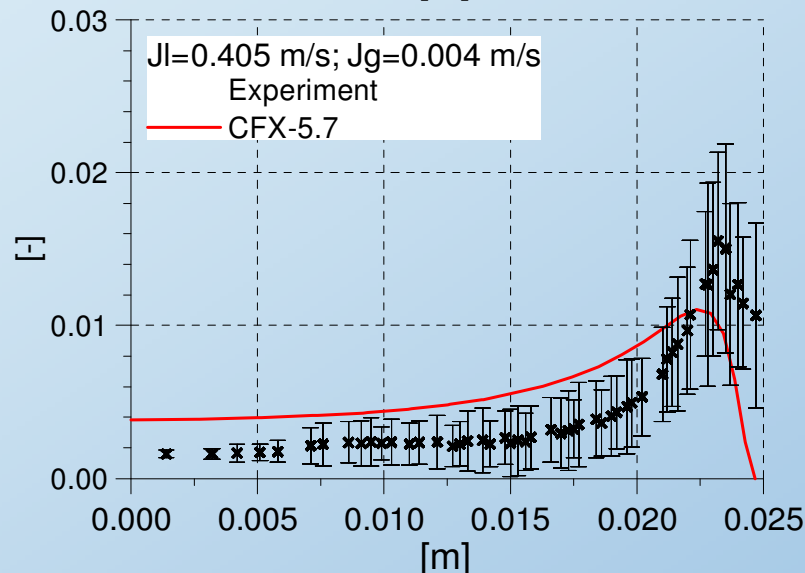
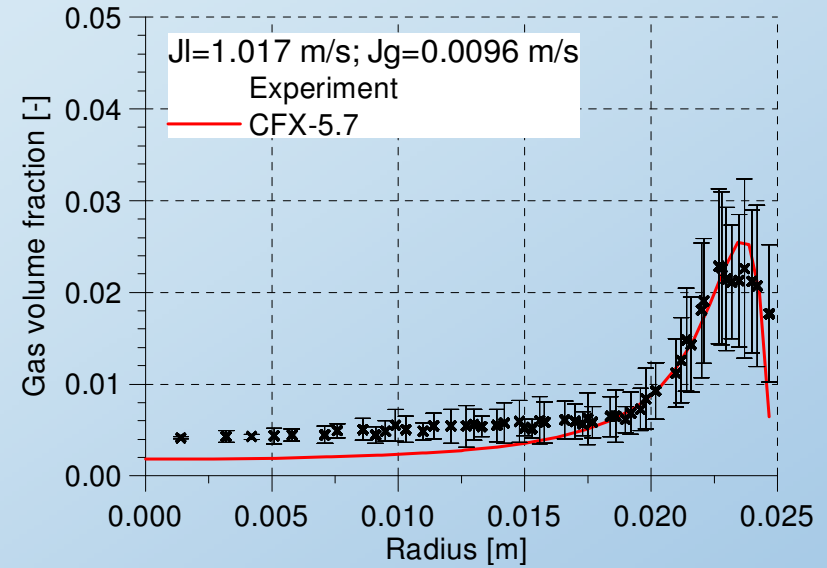
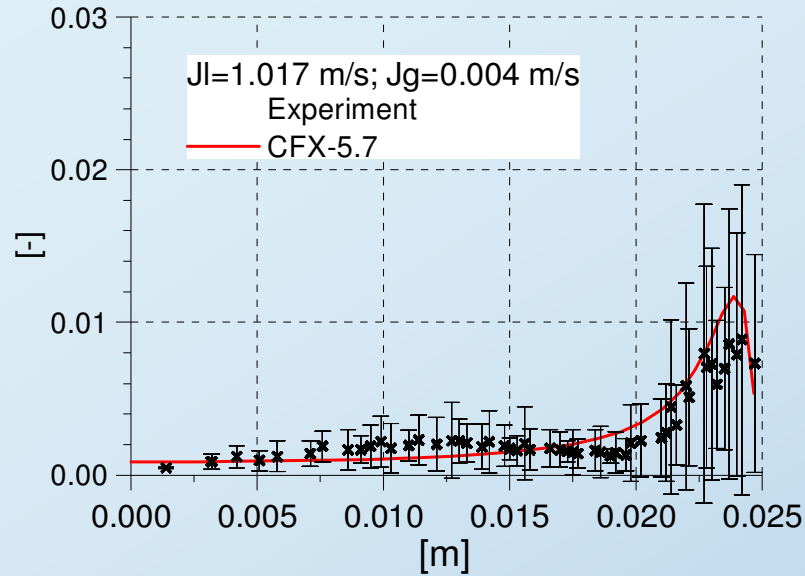
Sato model

$\Delta t=0.002$ s

2400 Iterations



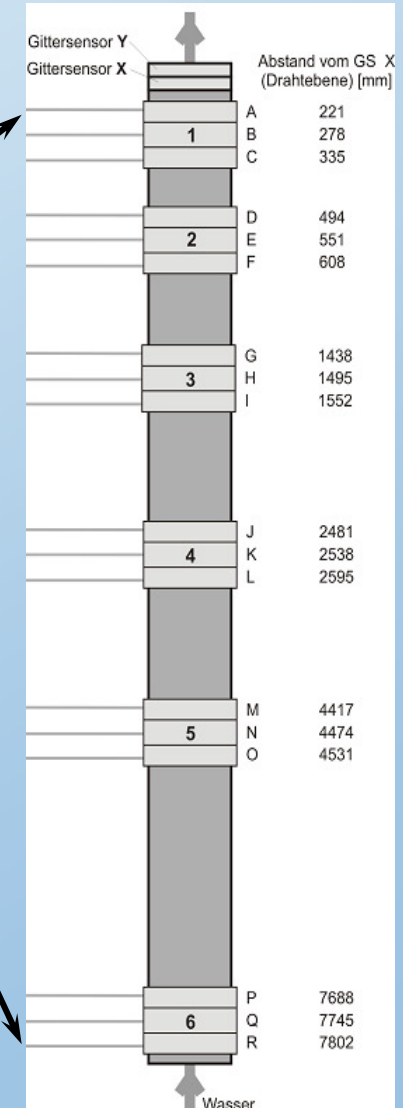
CFX Model Validation for Monodispersed Bubbly Flows



Polydisperse Bubbly Flow: The TOPFLOW-074 experiment



- FZR TOPFLOW test facility with DN200
- approx. 8m high pipe test section
- gas injection through 72 x 1mm Ø wall orifices
- variable gas injection (A through R level)
- Superficial water and air velocities:
 $J_W = 1.017 \text{ m/s}$
 $J_G = 0.0368 \text{ m/s}$
- Resulting mean and maximum gas volume fraction:
 $r_G = 3.49\%$ $r_{G,max} \sim 28\%$



Polydisperse Bubbly Flow: TOPFLOW-074 testcase setup

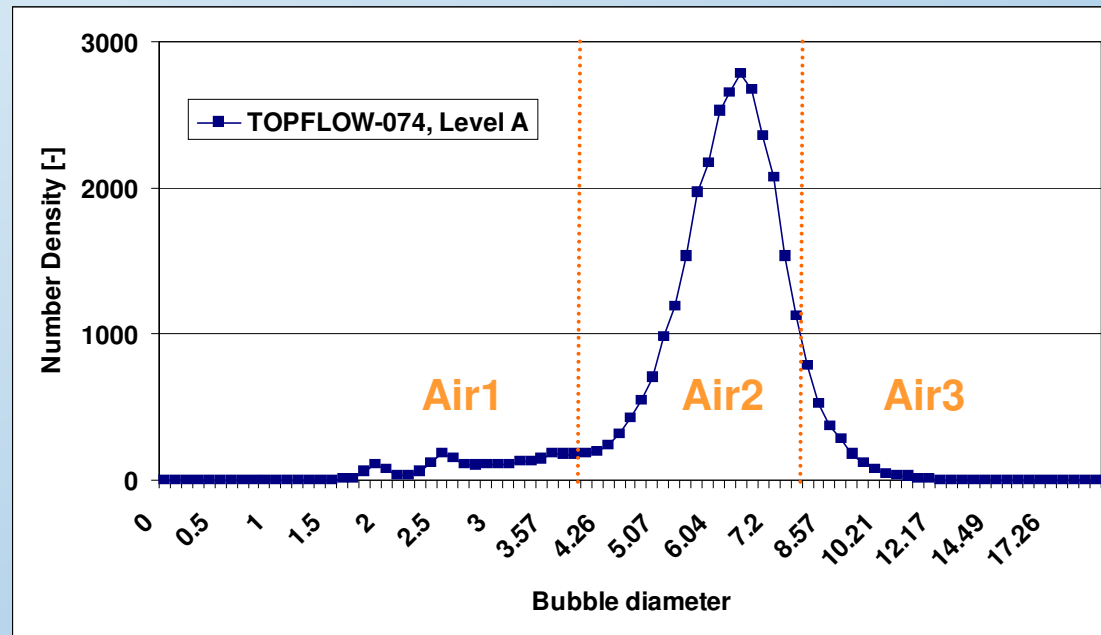


- 60° radial pipe sector
- symmetry BC's at both sides;
averaged static pressure BC at outlet
- **3x7 MUSIG model** applied to TOPFLOW-074 testcase with :
 - N=3** velocity groups and
 - M=21** size classes (7 in each group)
 - overall bubble diameter range $d_p=0, \dots, 13\text{mm}$
 - equal diameter discretization ($\Delta d_p=0.619\text{mm}$)
 - **Air1 vel. group** : $d_{p,\min}=0.31\text{ mm}$; $d_{p,\max}=4.02\text{mm}$
 - **Air2 vel. group** : $d_{p,\min}=4.64\text{ mm}$; $d_{p,\max}=8.36\text{mm}$
 - **Air3 vel. group** : $d_{p,\min}=8.98\text{ mm}$; $d_{p,\max}=12.69\text{mm}$

Polydisperse Bubbly Flow: Gas Inlet Bubble Size Distribution



- wall orifice injection at $z=0.0\text{m}$
- bubble size distribution from data at level A
 - Air1 VF = 0.844% of VF
 - Air2 VF = 88.72% of VF
 - Air3 VF = 10.93% of VF

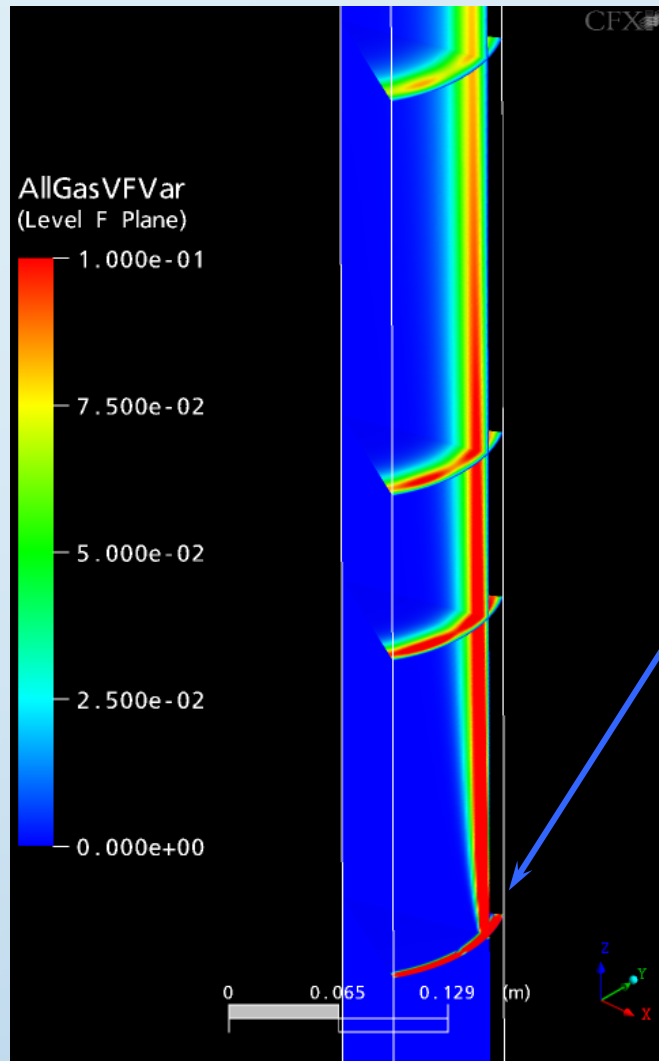


3x7 Inhomogeneous MUSIG Simulations for TOPFLOW-074

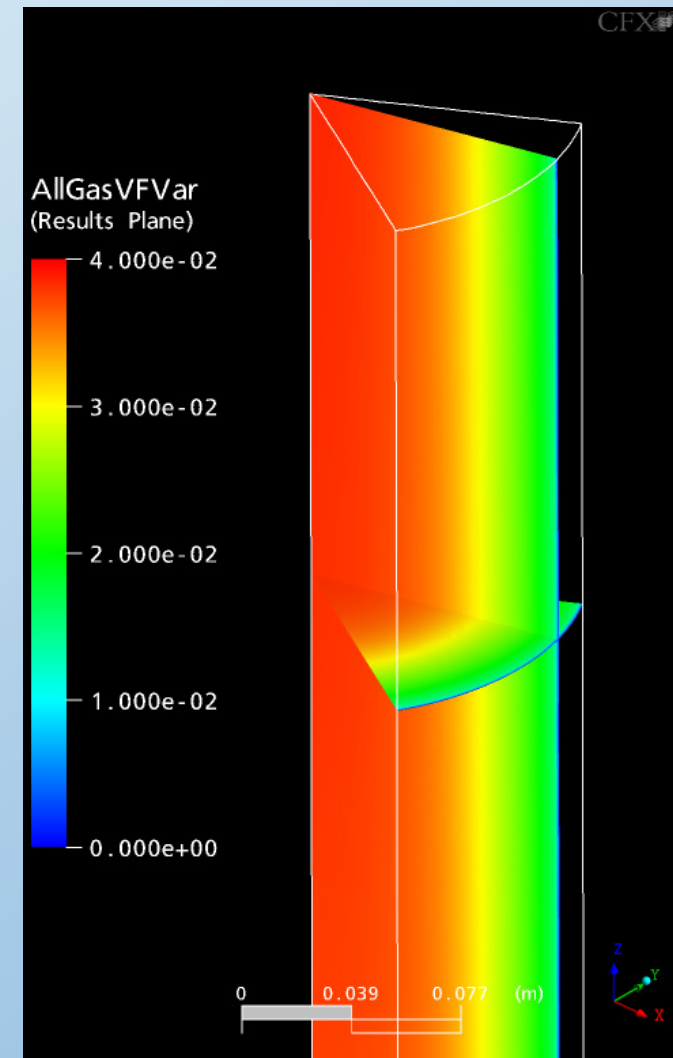


Inlet level → level F

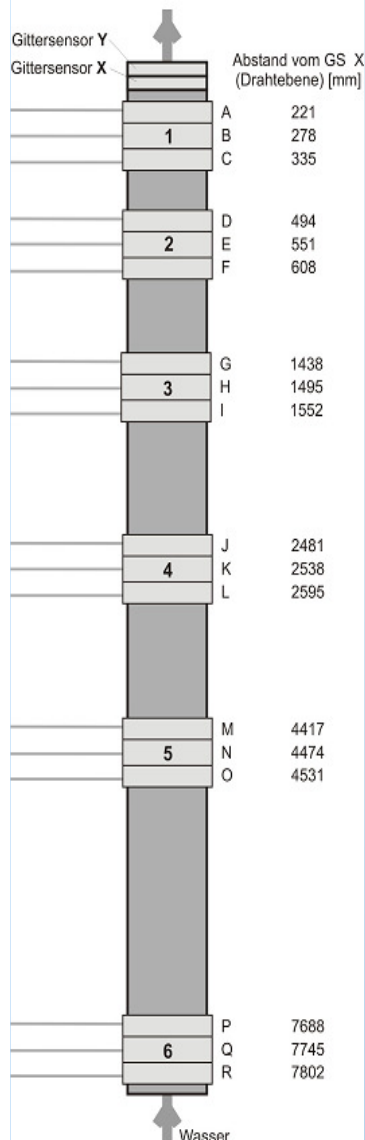
level R



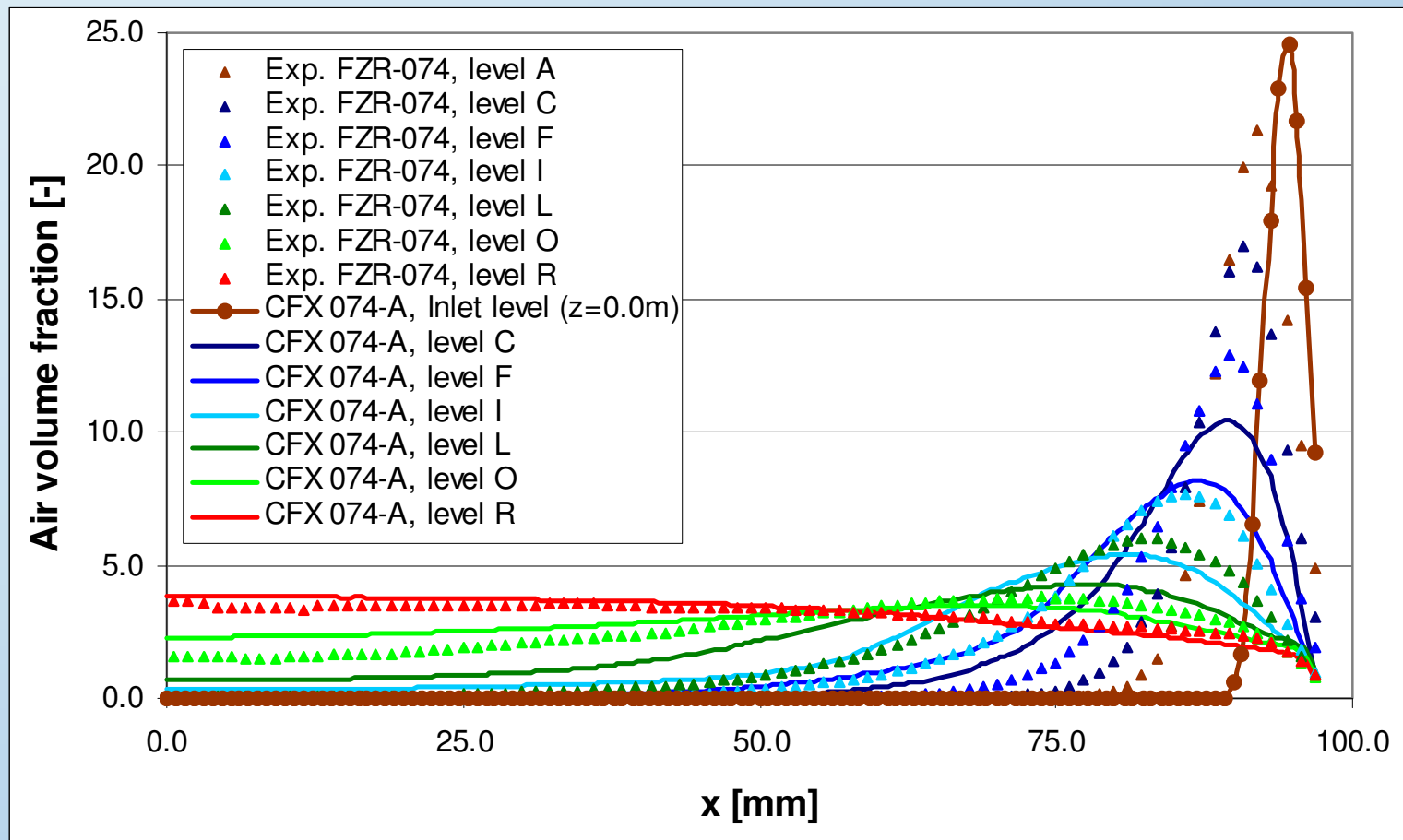
- TOPFLOW-074 results show good agreement with experiments
- near wall gas injection at $z=0.0\text{m}$
- level R results show core peak in air VF profiles



3x7 Inhomogeneous MUSIG Simulations for TOPFLOW-074



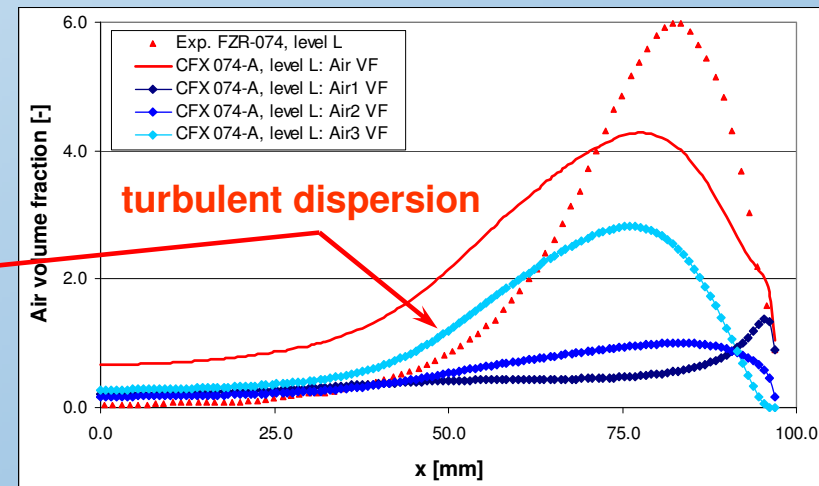
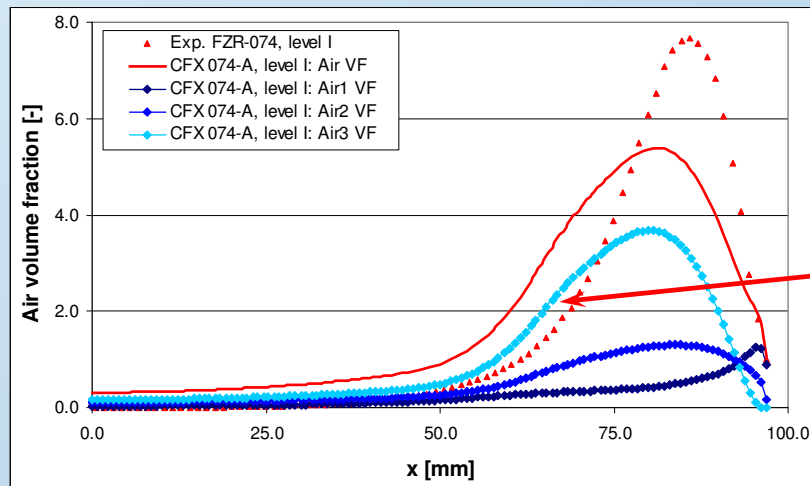
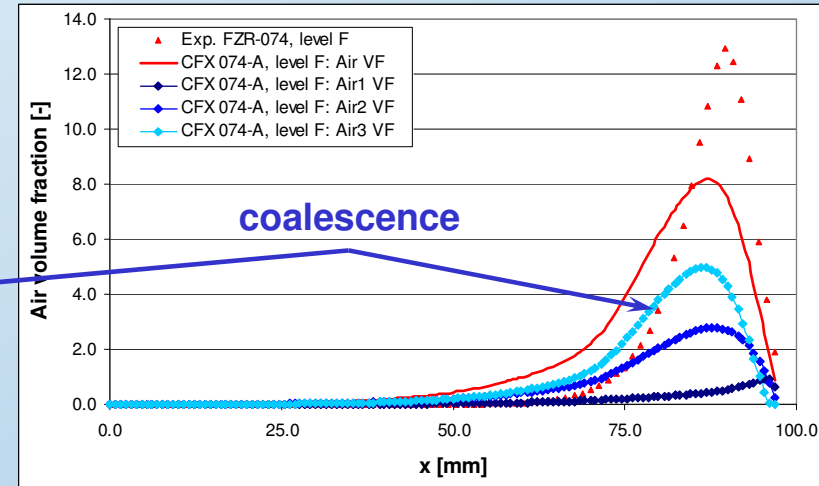
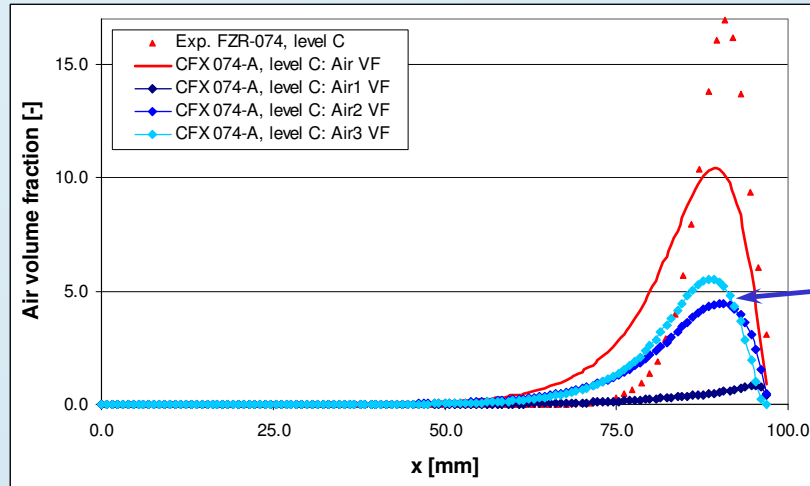
- good agreement at levels A, L through R
- too fast spreading of the bubble plume from inlet



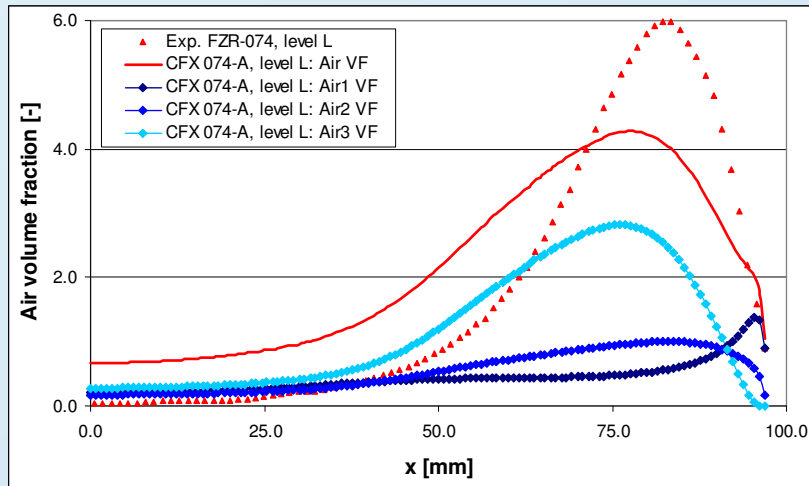
074-A: 3x7 inhomogeneous MUSIG simulations for TOPFLOW-074



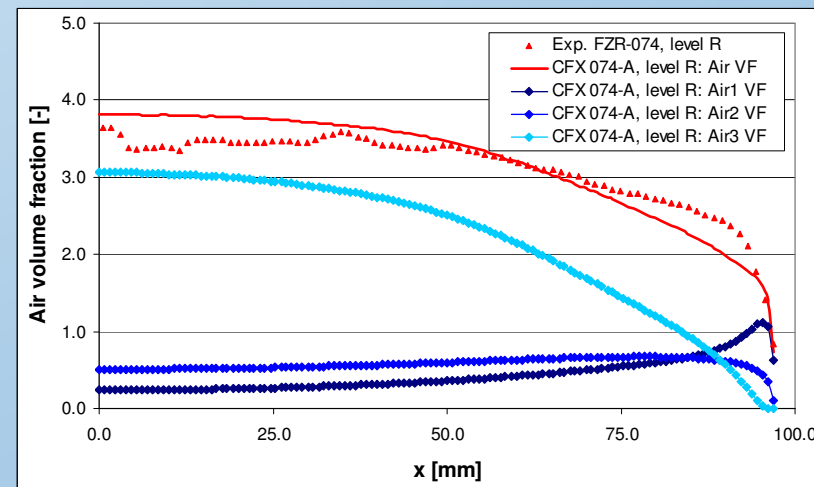
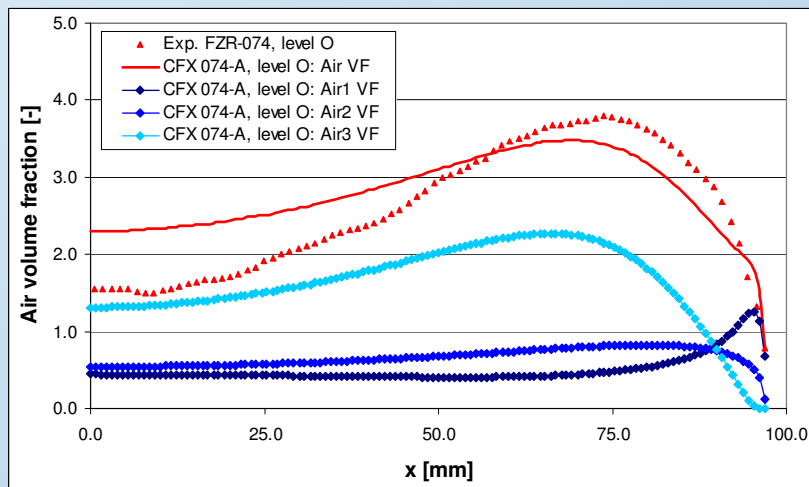
level C (z=0.335m) to level L (z=2.595m)



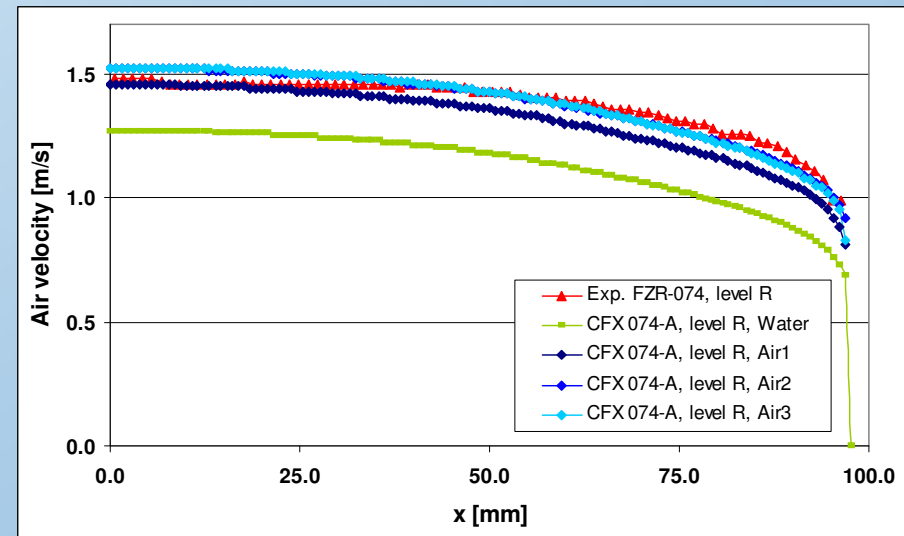
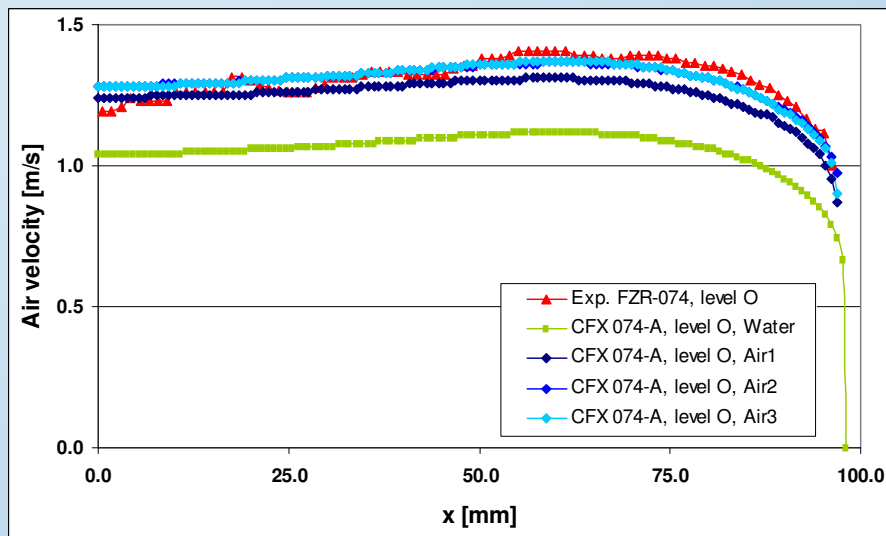
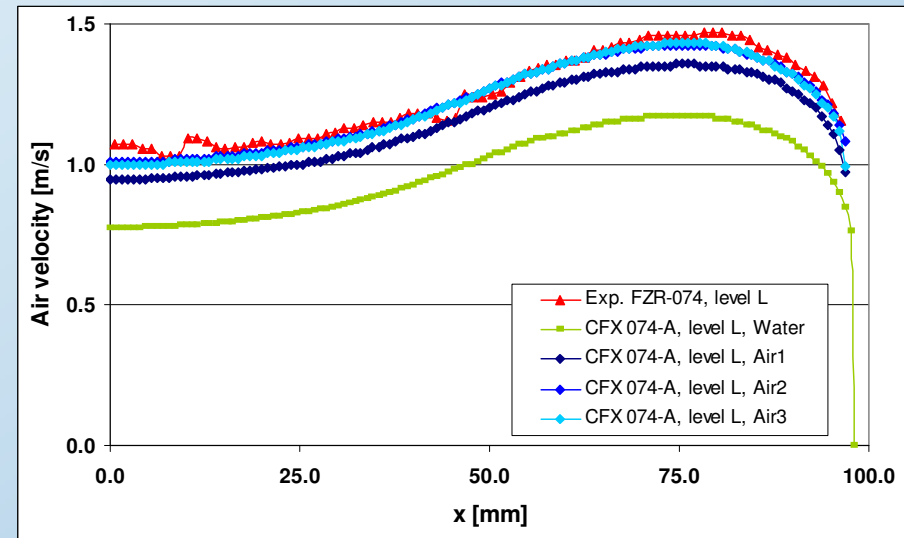
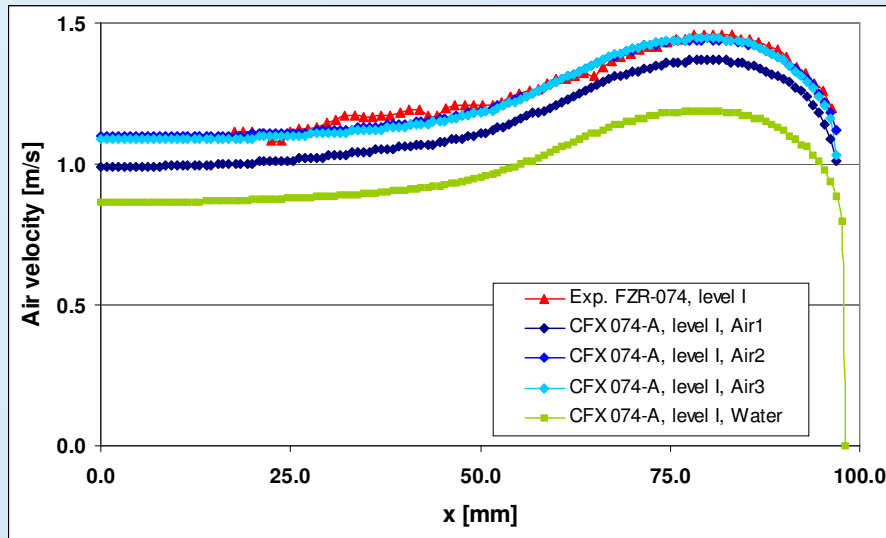
074-A: 3x7 inhomogeneous MUSIG simulations for TOPFLOW-074



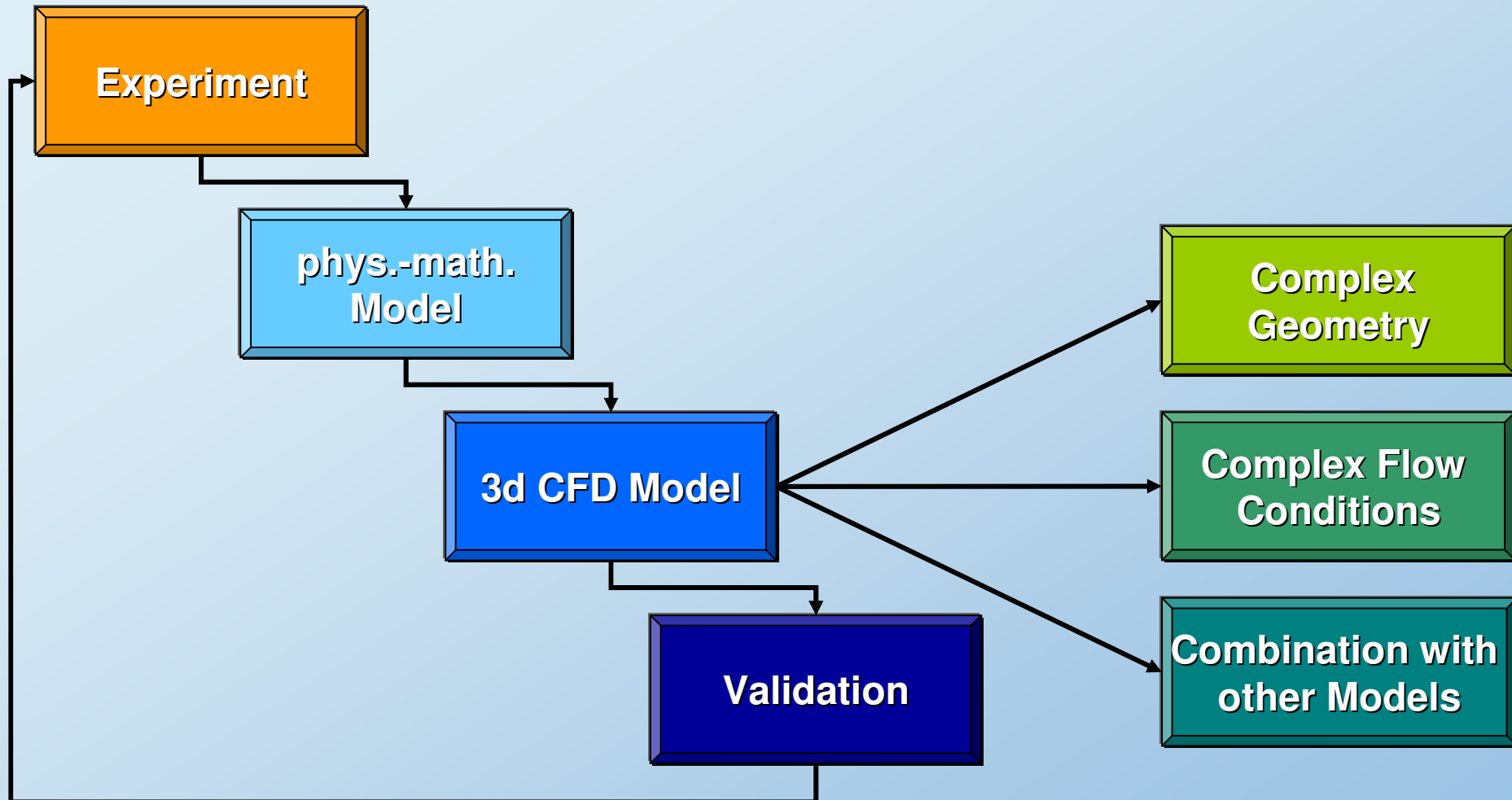
- Air VF at **level L** ($z=2.595\text{m}$), **level O** ($z=4.531\text{m}$) and **level R** ($z=7.802\text{m}$)
- agreement with experiments improves with increasing height
- good prediction of radial demixing processes for different bubble size classes



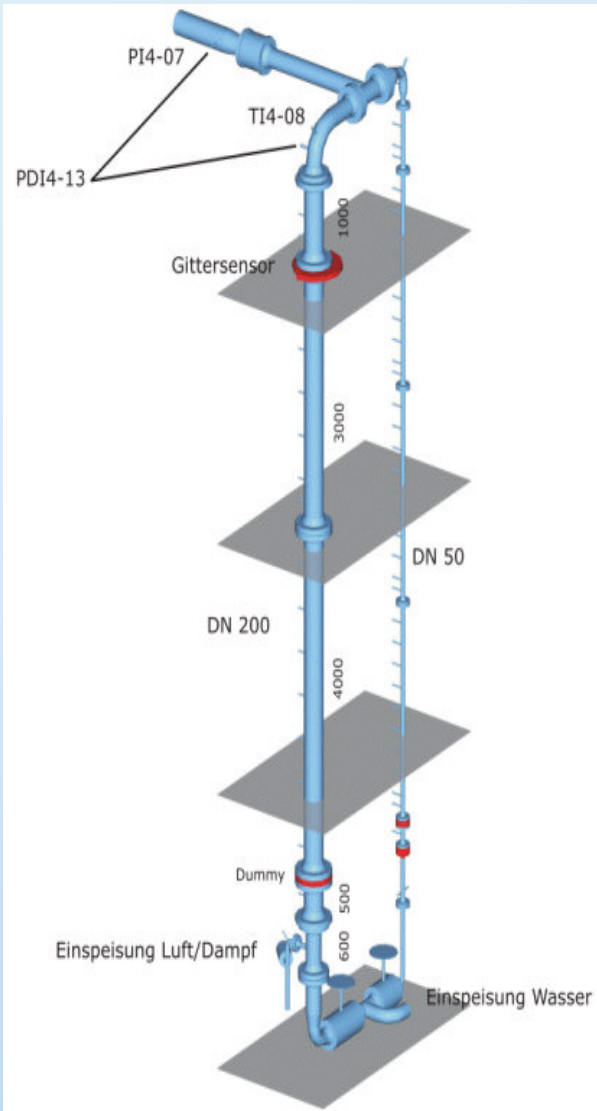
Air Velocity Profiles I → R Level Comparison with Exp.



Methodology of CFD Model Development



3d Bubbly Flow Around Obstacle

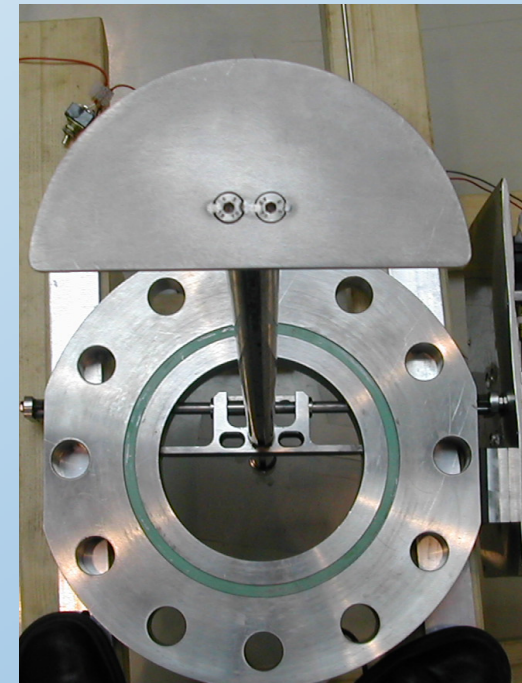


Blind Test for Model Application to Flow around obstacle:

- Turbulent flow
- Phase separation
- Flow recirculation & re-attachment

Flow geometry and test case conditions:

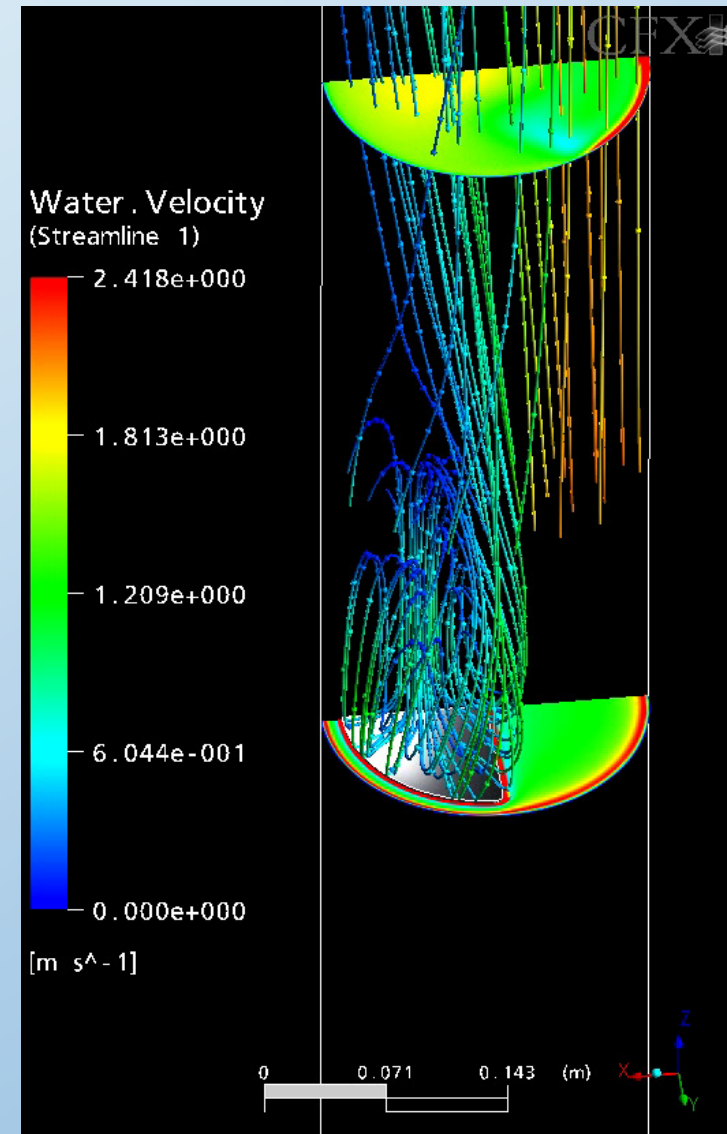
- CAD data from obstacle geometry from FZR
- 1.5m of TOPFLOW pipe up- and downstream of the obstacle ($\approx 7.5D$)
- Test case conditions of TOPFLOW-074



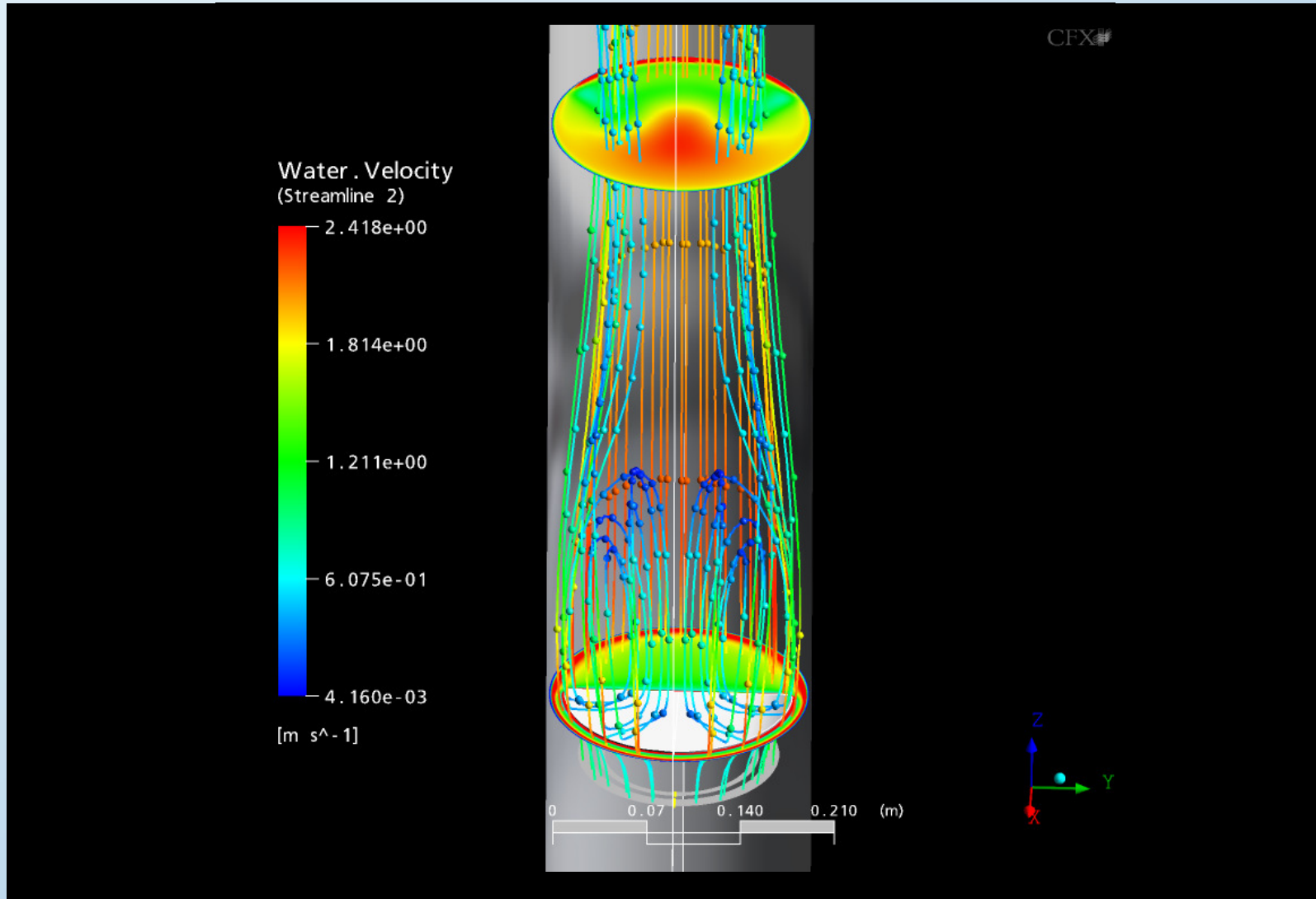
3d Bubbly Flow Around Obstacle



- Streamlines around the obstacle
 - Vortex system around the edge of the obstacle
 - Velocity component from left to right along the vortex core
 - Higher ‘concentration’ (residence time) in right vortex core



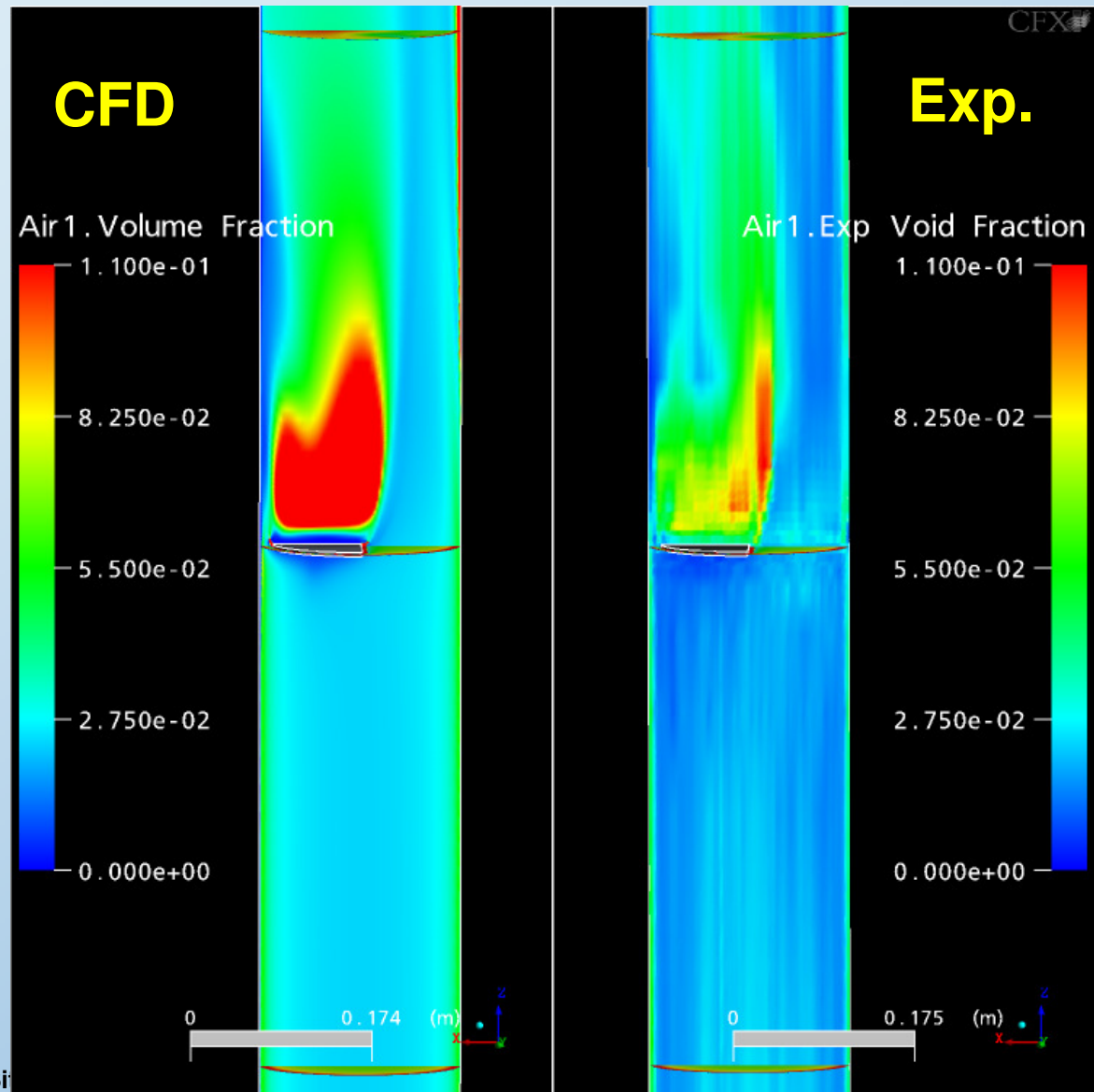
3d Bubbly Flow Around Obstacle



3d Bubbly Flow Around Obstacle



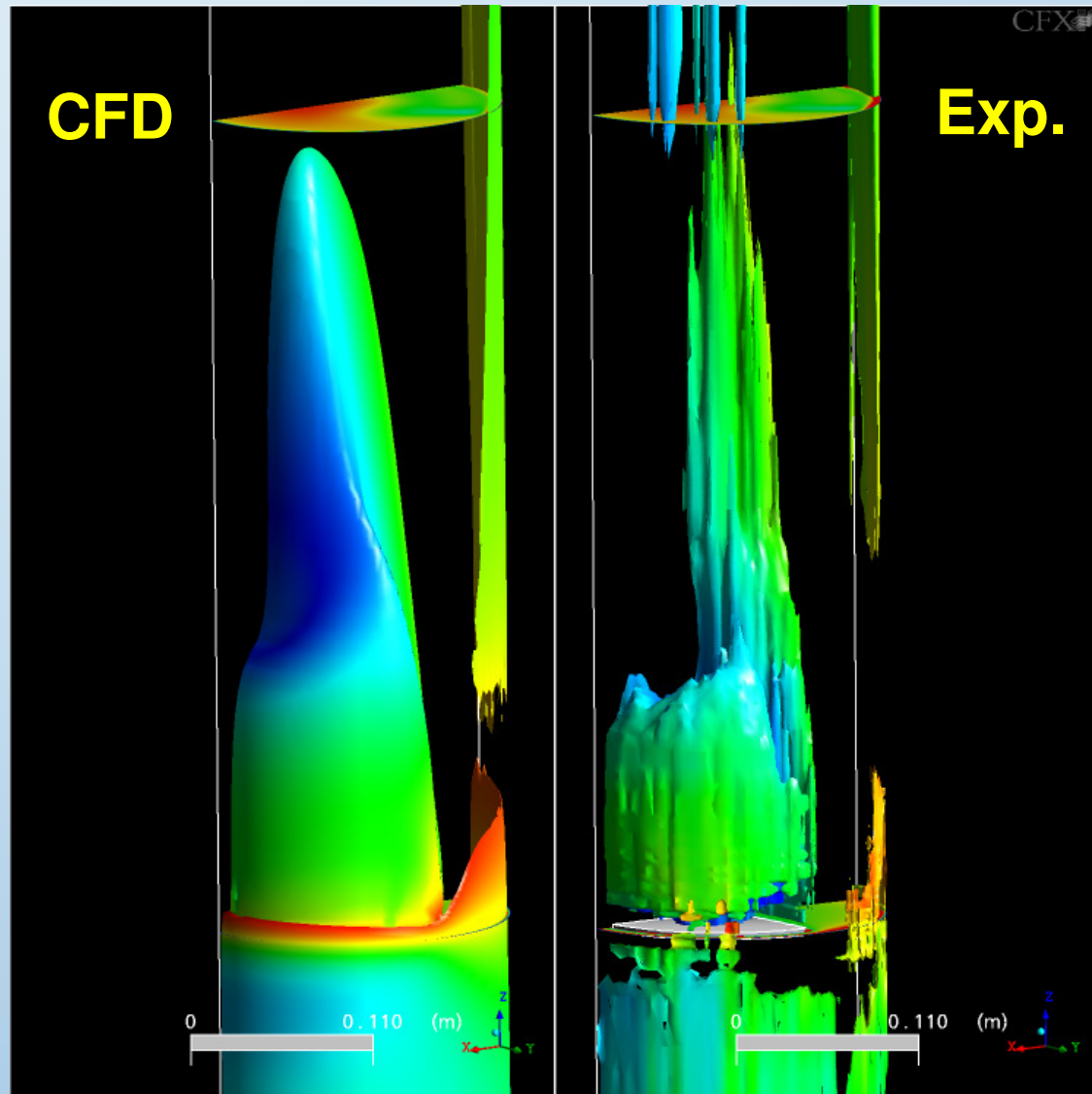
- Comparison CFD \leftrightarrow Experiment
- Air void fraction distribution in symmetry plane
- Import of exp. data into CFX-Post
- Pre-interpolation of exp. data to $\Delta z=0.01\text{m}$



3d Bubbly Flow Around Obstacle



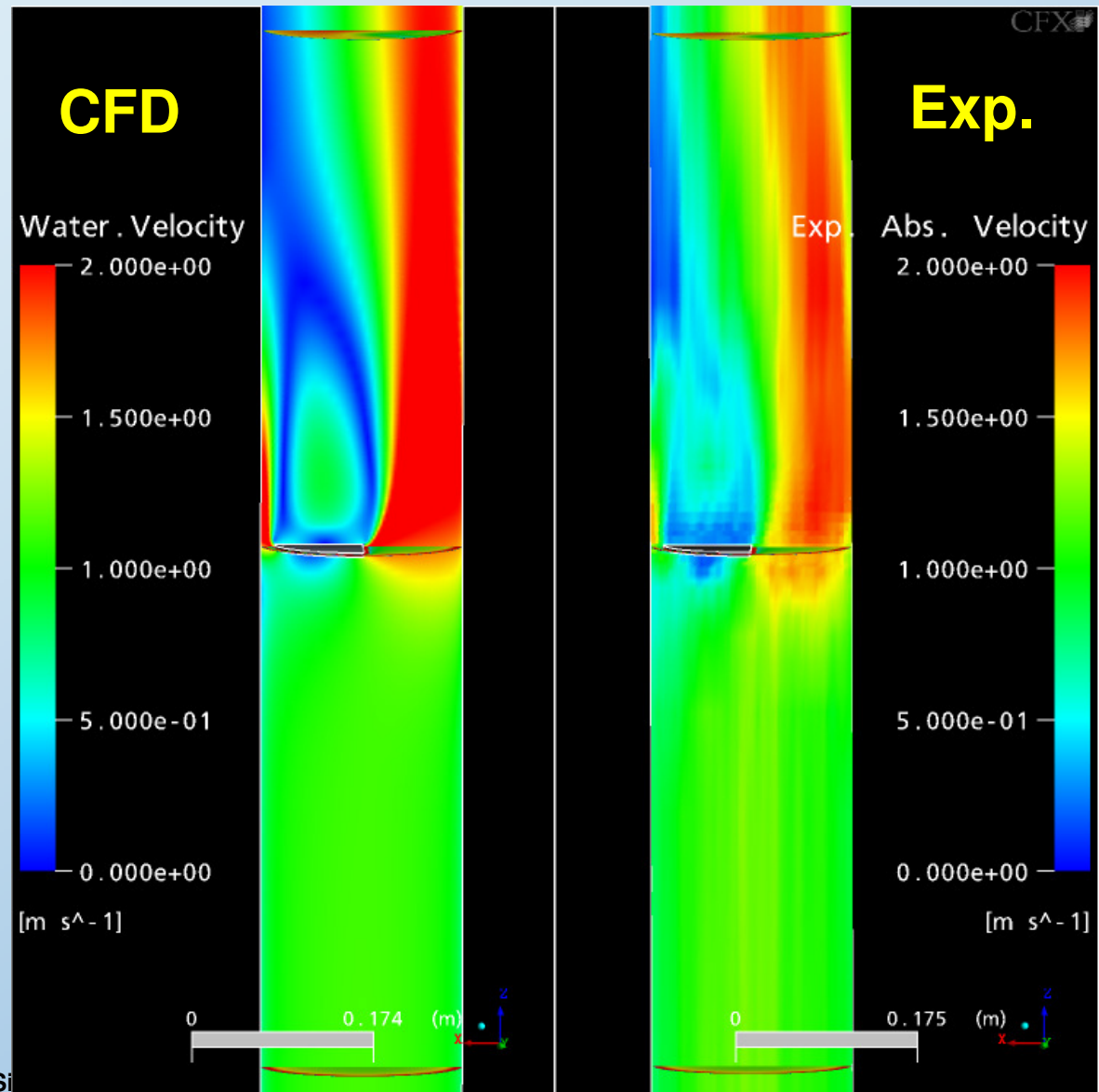
- Gas void fraction isosurface at 4%
- Colored by fluid velocity



3d Bubbly Flow Around Obstacle



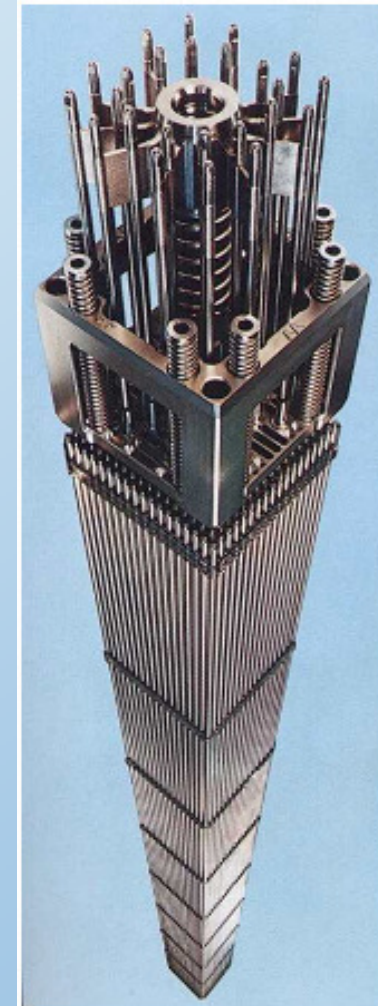
- Comparison
CFD \leftrightarrow Experiment
- Absolute water
velocity distribution
in symmetry plane



Application to Design of a Fuel Element



- Length: ca 4 m
- 9 x 9 to 15 x 15 fuel rods per element
- Typical rod diameter: 9 mm
- Typical distance of the rod centres: 12 mm
- The rods are fixed by grid spacers
 - Distance of ca. 0.5 m
- Tasks of the spacers:
 - To fix the rod distance
 - Apply a swirl to the flow to enhance the heat transfer



CFX Modeling of Subcooled Boiling at Heated Walls



- Constant pressure \rightarrow given T_{sat}
- Overall heat flux Q_w given
- **Heat flux partition:**

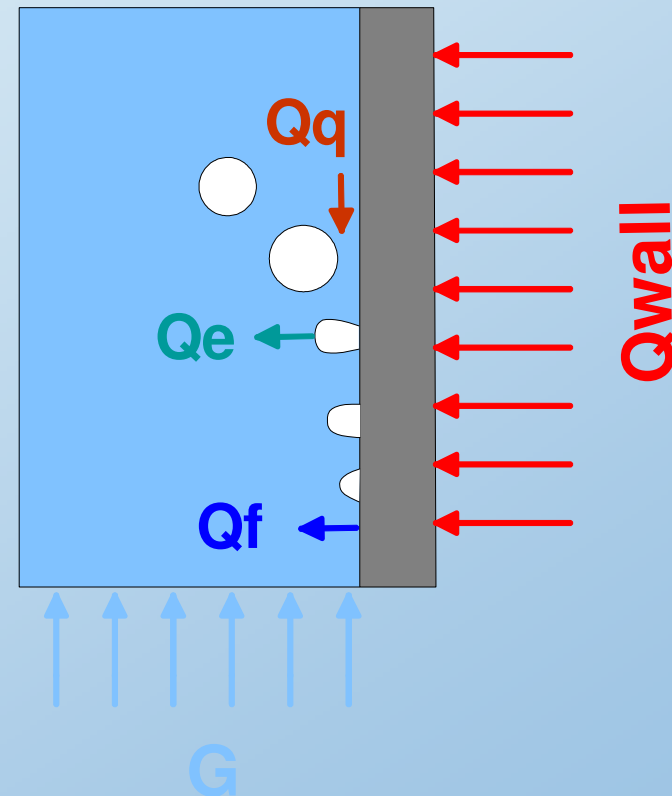
$$Q_w = Q_f + Q_e + Q_q$$

Q_f - single phase convection

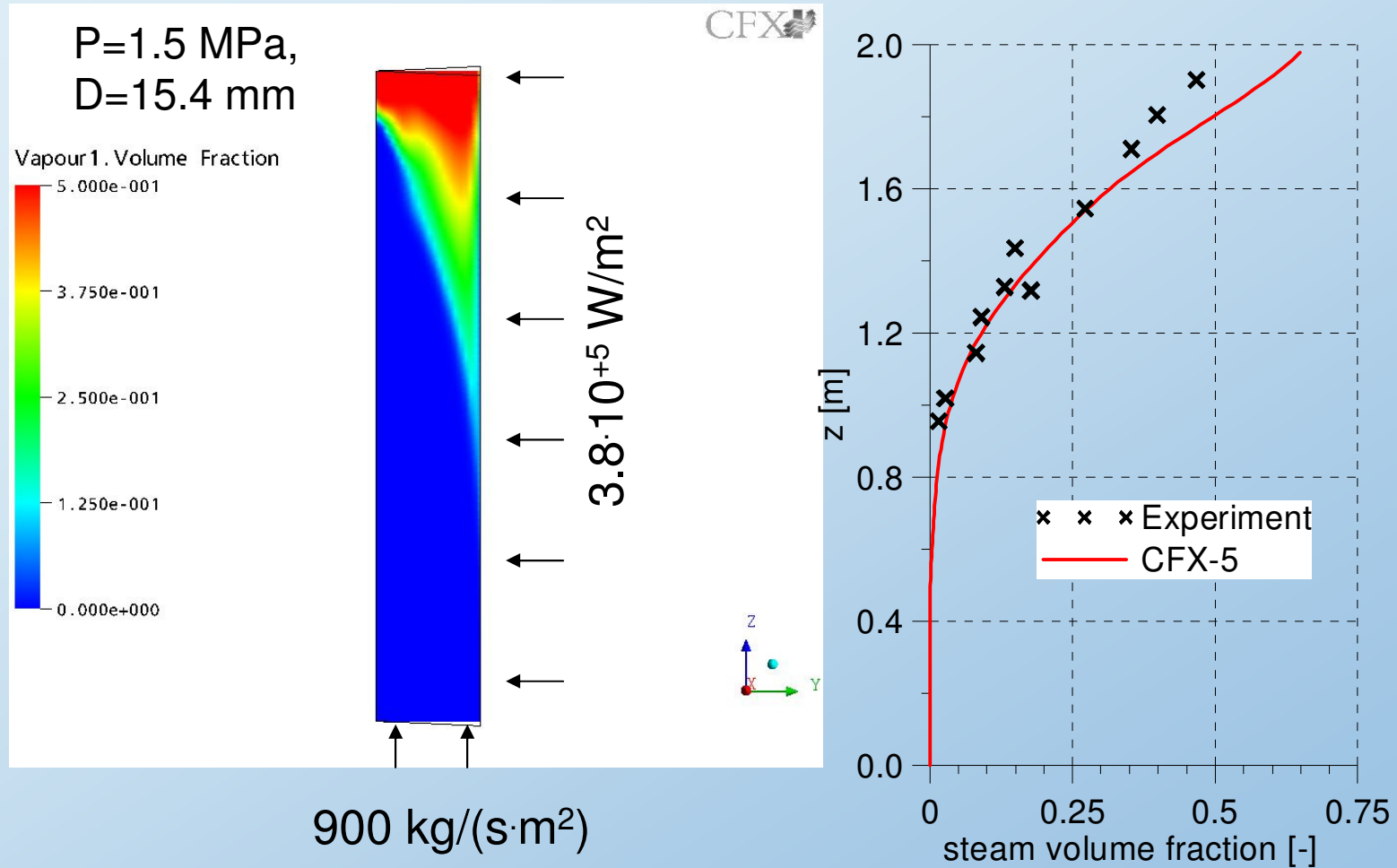
Q_e - evaporation

Q_q - quenching:

(departure of a bubble from the heated surface \rightarrow cooling of the surface by fresh water)



- Comparison to measured cross sectional averaged Steam Volume Fractions

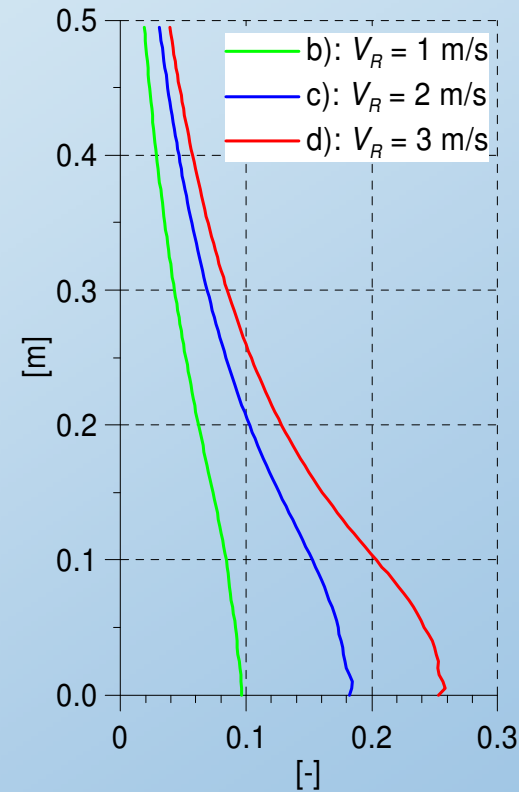
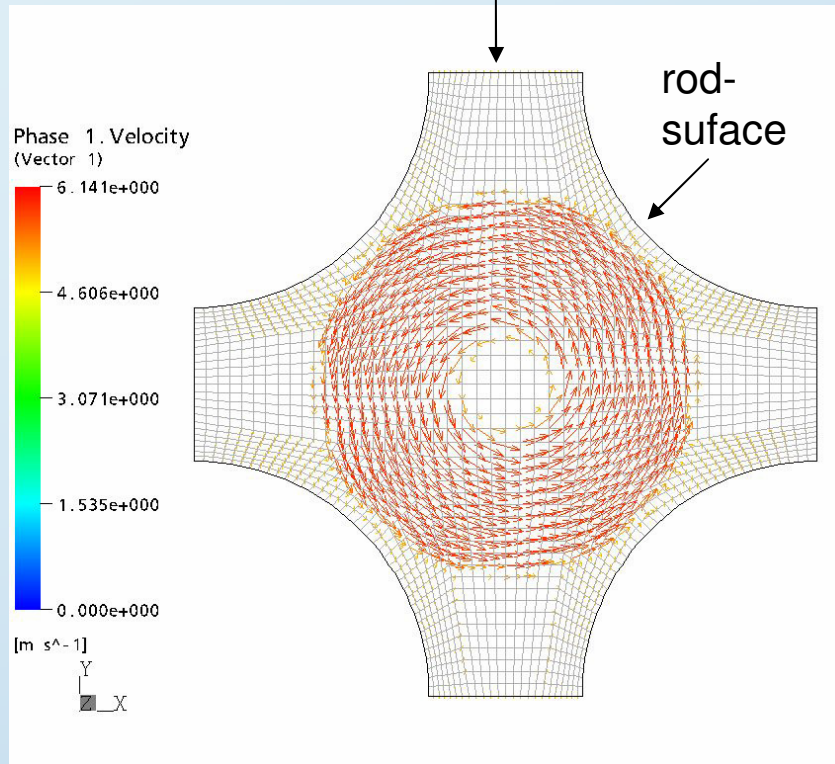


Bartolomej, G.G., Chanturiya, V.M., 1967, Thermal Engineering Vol. 14, pp. 123-128

Fuel Rod Bundle with Swirl at the Inlet Cross Section



periodic boundary conditions

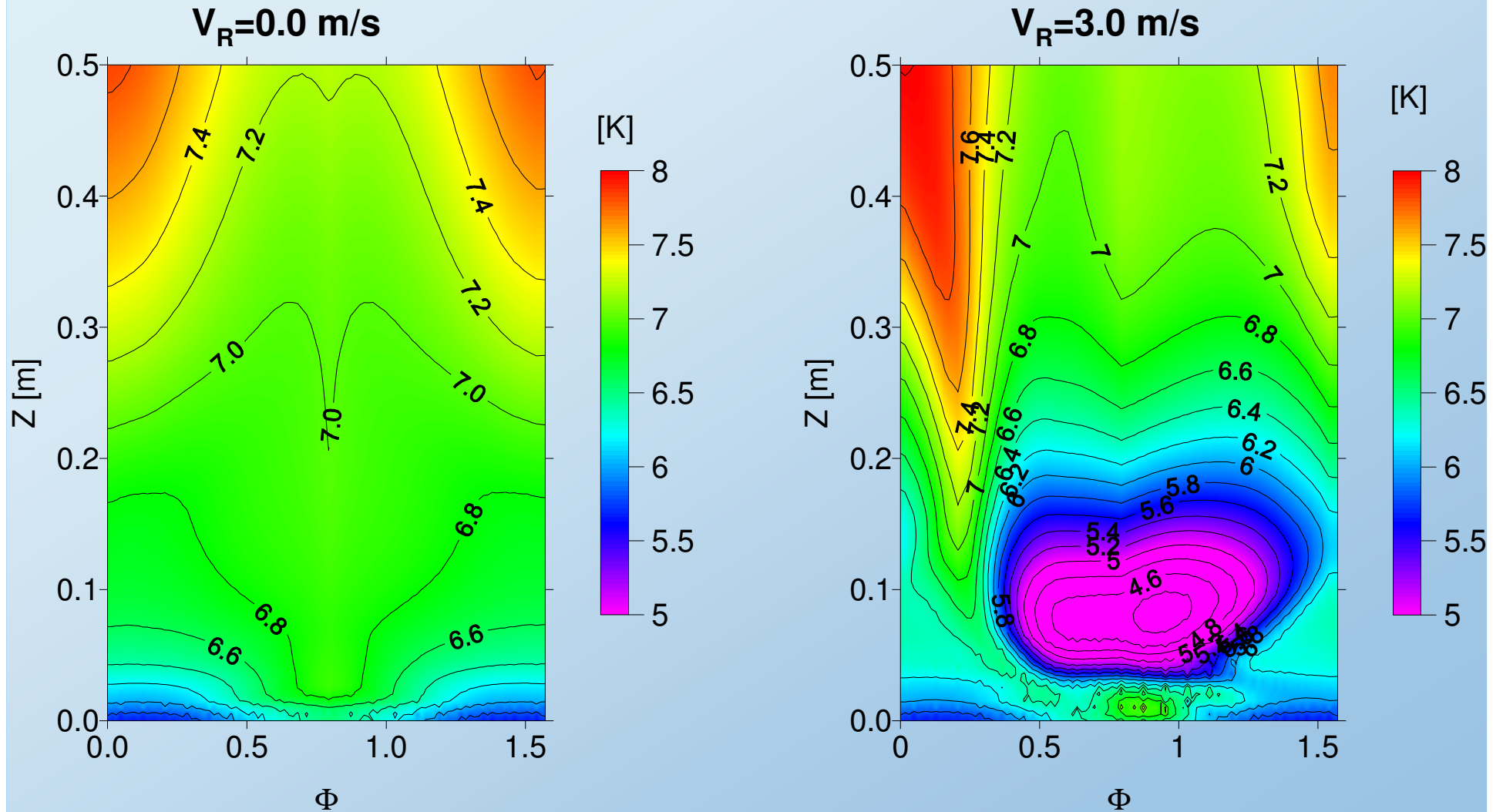


$$V_x = V_R \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right) = -V_R \frac{y}{r}$$

$$V_y = V_R \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right) = V_R \frac{x}{r}$$

$$swirl = \frac{\sqrt{V_x^2 + V_y^2}}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}}$$

Wall Superheat in Dependence on Swirl Intensity

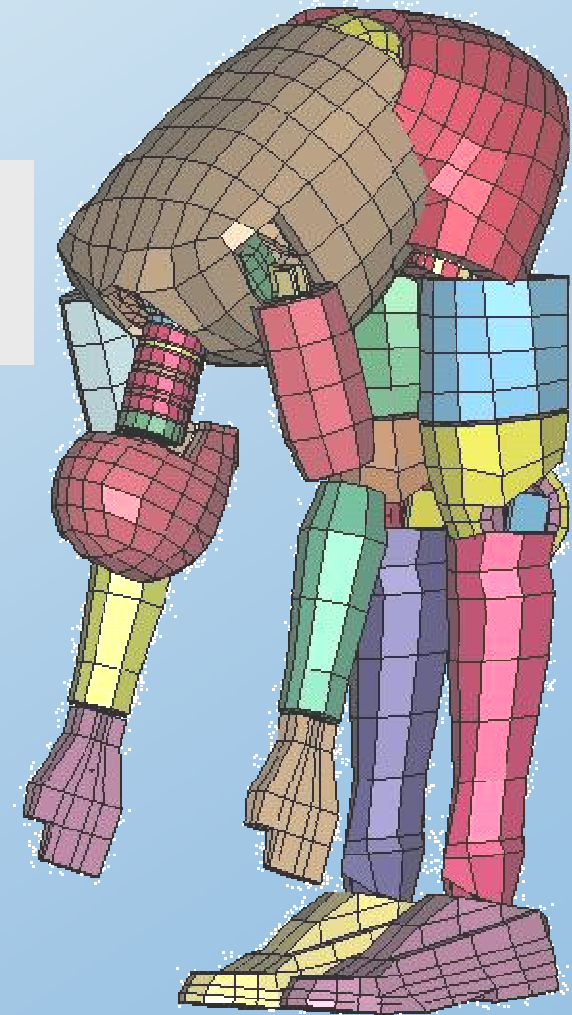


- CFD Model development in tight cooperation between FZ Rossendorf & ANSYS CFX
- **Methodology:**
 - Experiment → Model Development → Validation
- **Result:**
 - Geometry independent modeling
 - Models applicable to complex design & NRS studies
- Full model compatibility
 - new areas of CFD application
- **Outlook:**
 - Further CFD model development towards flows with higher gas content, evaporation & condensation



Forschungszentrum
Rossendorf
Institute of Safety Research

Thank You!



CFD-Simulation von Mineralwollpartikeln in der Sumpfstromung

Eckhard Krepper, Alexander Grahn,
Forschungszentrum Rossendorf e. V., Dresden

Sören Alt, Wolfgang Kästner, Alexander Kratzsch, Andre Seeliger,
Hochschule Zittau/Görlitz, IPM, Zittau

CFD-SIMULATION VON MINERALWOLLPARTIKELN IN DER SUMPFSTRÖMUNG

Eckhard Krepper, Alexander Grahn
Forschungszentrum Rossendorf Inc.
Institute of Safety Research
POB 51 01 19, D-01314 Dresden, Germany

Sören Alt, Wolfgang Kästner, Alexander Kratzsch, Andre Seeliger
Hochschule Zittau/Görlitz, Institut für Prozesstechnik, Prozessautomatisierung und
Messtechnik (IPM)
Theodor Körner Allee 16, D-02763 Zittau, Germany

Kurzfassung

Die Untersuchung der Freisetzung, des Transports und der Sedimentation von Mineralwollpartikeln in der Sumpfströmung gewinnt wachsende Beachtung bezüglich des Langzeitverhaltens der Notkühlssysteme von Druck- und Siedewasserreaktoren. Das bei einem Leck freigesetzte Isolationsmaterial besteht bezüglich Größe, Form, Konsistenz und anderen Eigenschaften aus einem Gemisch von sehr unterschiedlichen Partikeln. Ein Teil dieser freigesetzten Fasern kann in den Sumpf gelangen und durch Anlagerung an den Sumpfsieben die Notkühlung beeinträchtigen. Offene Fragen von allgemeinem Interesse sind z.B. die Ablagerung von Isolationsmaterial, die mögliche Re-Suspension und der Transport in einer Wasserströmung, die Anlagerung des Isolationsmaterials an die Sumpfsiebe und der daraus resultierende Differenzdruck.

Ein gemeinsames durch das BMWA gefördertes Forschungsprojekt in Zusammenarbeit mit dem Institut für Prozesstechnologie, Automatisierung und Messtechnik (IPM) in Zittau befasst sich mit der experimentellen Untersuchung und der Entwicklung von CFD-Modellen zur Beschreibung von Partikeltransportphänomenen in der Kühlmittelströmung. Während die Experimente am IPM Zittau durchgeführt werden, ist die theoretische Arbeit am Forschungszentrum Rossendorf konzentriert.

In der vorliegenden Arbeit werden die grundlegenden Konzepte der CFD-Modellierung beschrieben und erste Ergebnisse einschließlich Machbarkeitsstudien beschrieben.

1. Einleitung

Im Jahr 1992 kam es beim Anfahren der Anlage im schwedischen Kernkraftwerk Barsebaeck während einer Funktionsprüfung zu einem Fehlöffnen eines Sicherheitsventils einer Frischdampfleitung innerhalb des Sicherheitsbehälters. Von den in der Nähe befindlichen Rohrleitungen wurde durch den ausströmenden Dampf Isolationsmaterial abgetragen. Das Isolationsmaterial wurde durch den austretenden Dampf, das Kondensat und das Wasser des Gebäudesprühsystems über die Kondensationsrohre in die Kondensationskammer transportiert. In der Kondensationskammer befinden sich die Ansaugöffnungen der Notkühlssysteme. Vor den Ansaugöffnungen sind Siebe installiert, die nach der Inbetriebnahme der Notkühlssysteme durch das in die Kondensationskammer eingetragene Isolationsmaterial verstopften. Durch Rückspülung, d. h. Umkehrung der Strömungsrichtung, wurden die Siebe wieder vom

Isolationsmaterial befreit. Das Ereignis hatte auf Grund des Anlagenzustandes und der Größe des Lecks nur geringe sicherheitstechnische Bedeutung.

Unter anderen Umständen bzw. entsprechenden konservativen Annahmen wäre auch ein Ausfall des Notkühlsystems in der Funktion Rückfördern aus dem Sumpf bzw. aus der Kondensationskammer möglich gewesen. Eine zu hohe Belegung von Rückhaltevorrichtungen (Ansaugsiebe) durch Isolationsmaterial kann die Funktion der in den Notkühlssystemen vorhandenen Pumpen gefährden (z. B. durch Kavitation). Der Differenzdruckaufbau an den Sieben ist hierbei ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung der Funktionsfähigkeit der Notkühl-systeme und der Standfestigkeit der Rückhaltevorrichtungen. Feinanteile des Isolations-materials (einzelne Fasern oder wenige zusammenhängende Fasern) können die Rückhalte-vorrichtungen passieren, in den Reaktordruckbehälter gelangen und zur Belegung von Brenn-elementen führen.

In vielen Ländern wurden deshalb mögliche Gefährdungen des Betriebes der Kernkraftwerke durch abgelöstes Isolationsmaterial in Folge eines Kühlmittelverluststörfalles (Rohrleitungsbruch, Leck) überprüft und gegebenenfalls Nachrüstmaßnahmen durchgeführt. Obwohl sich in den einzelnen kernkraftwerksbetreibenden Ländern im Detail Unterschiede durch unterschiedliche Reaktorkonstruktionen und durch unterschiedliche Genehmigungsrichtlinien ergeben, sind alle von dieser Problematik betroffen, da sowohl Kraftwerksbetreiber als auch Genehmigungsbehörden die sichere Beherrschung dieses Störfallszenario nachweisen müssen.

Die OECD/NEA veröffentlichte dazu mehrfach aktualisierte Berichte über den Wissensstand und die in den Mitgliedsländern getroffenen Maßnahmen. Mehrere internationale Workshops zu dieser Thematik wurden durchgeführt (s. z.B. [1 bis 4]). Zur wissenschaftlichen Absicherung der Kenntnisse und Maßnahmen zu den genannten Ereignisabläufen wurden und werden weiterhin national wie auch international experimentelle und analytische Forschungsarbeiten durchgeführt.

Die Untersuchungen und Analysen zur Problematik einer Kühlmittelströmung mit Feststoffpartikeln (vorrangig Isolationsmaterial) durch Betreiber bzw. Genehmigungsbehörden sind in der Regel auf den speziellen Genehmigungsfall ausgerichtet und basieren zum überwiegenden Teil auf ingenieurmäßigen Ansätzen, die durch experimentelle Untersuchungen gestützt sind. Hierbei wurde, wie in der Kerntechnik üblich, mit konservativen Modellen und Annahmen gearbeitet, um vorhandene Unsicherheiten abzudecken und ausreichende Auslegungsreserven sicherzustellen. Es wurde jedoch auf die Untersuchung der grundlegenden Phänomene weitestgehend verzichtet, die für eine durchgängige Modellierung der Ausbreitungsprozesse des Isolationsmaterials und des Verhaltens der Rückhaltevorrichtungen bei Beaufschlagung mit Isolationsmaterial unerlässlich ist.

In dem durch das BMWA geförderten Forschungsvorhaben im IPM und FZR ist vorgesehen, die grundlegenden Phänomene des Transportes der Isolationsmaterialien im Sumpf, der Anlagerung bzw. Abtragung an Hindernissen im Containment bis hin zur Ablagerung am Sieb einschließlich der damit verbundenen Erhöhung des Differenzdrucks zu untersuchen. Auf der Basis von mit modernen Verfahren der Messtechnik und der Informationsverarbeitung ausgestatteten Experimenten werden Modelle zur analytischen Behandlung dieser Phänomene mit CFD-Codes entwickelt.

2. Schwerpunkte des gemeinsamen Forschungsprojekts

Die Schwerpunkte des Projekts sind:

- **Primärzusammensetzung der Partikel**
Originale Proben von Isolationsmaterial werden mit einem Dampfstrahl unter originalen thermohydraulischen Bedingungen (d.h. bei Drücken bis zu 11 MPa) behandelt. Das gewonnene fragmentierte Material wird auf seine Zusammensetzung hin untersucht und dient als Ausgangsstoff für weitere Experimente.
- **Transportverhalten der Fasern**
Das Transportverhalten der Fasern wird in einer Wassersäule mittels Hochgeschwindigkeits-Videotechnik untersucht. Aus den Sinkgeschwindigkeiten der Fasern wird der Drag-Koeffizient ermittelt, der als Ausgangsgröße für die entsprechende CFD-Modellierung dient.
- **Ablagerung und Re-Suspension der Fasern**
In einem flachen Strömungskanal mit Wänden aus Plexiglas wird bei definierten Randbedingungen das Ablagerungs- und das Re-Suspensionsverhalten der Fasern untersucht. Die Experimente sind mit LASER PIV-Messtechnik sowie mit Hochgeschwindigkeits-Videokameras ausgerüstet.
- **Partikelverhalten an Sieben**
In einer speziell ausgelegten Experimentiereinrichtung wird der Einfluss der Partikelbelastung auf den Differenzdruck untersucht. Zur Beschreibung des Differenzdruckaufbaus wird auf aus der chemischen Verfahrenstechnik bekannte Korrelationen zurückgegriffen. Zur CFD Simulation wird das Konzept des porösen Körpers genutzt. Mit diesem Instrumentarium wird auch die Beschreibung von teilweise belegten Sieben möglich sein.

3. Modellierung des Partikeltransports in einer Wasserströmung

3.1. Die Experimente

Die in den Fragmentierungsversuchen gewonnenen Partikel werden in eine Plexiglassäule mit einer Höhe von 3 m, einer Breite von 0,5 m und einer Tiefe von 0,1 m von oben eingebracht und das Sinkverhalten wird mittels einer Hochgeschwindigkeits-Videokamera beobachtet (s. Bild 1).

Eine Verteilung der Sinkgeschwindigkeiten ist das Ergebnis (s. Bild 1 rechte Seite). Die Fasern bestehen aus einer Ansammlung von Partikeln unterschiedlichster Gestalt und unterschiedlichster Größe. Größere Objekte werden unter dem Einfluss der Wasserströmung zerteilt. Im Nachlauf größerer Partikel wird ein Feinanteil erzeugt. Ausführliche Tests haben gezeigt, dass das Sinkverhalten außerdem von der Benetzbarkeit der Fasern abhängt. Diese wird durch das Alter, die hydrophobischen Materialeigenschaften und nicht zuletzt durch das Fertigungsverfahren wie z.B. die Art der Trocknung beeinflusst.

Im IPM-Zittau wurden verschiedene Methoden aus dem Bereich der Fuzzy-Logik angewendet, um eine Klassifizierung der Partikel vorzunehmen.

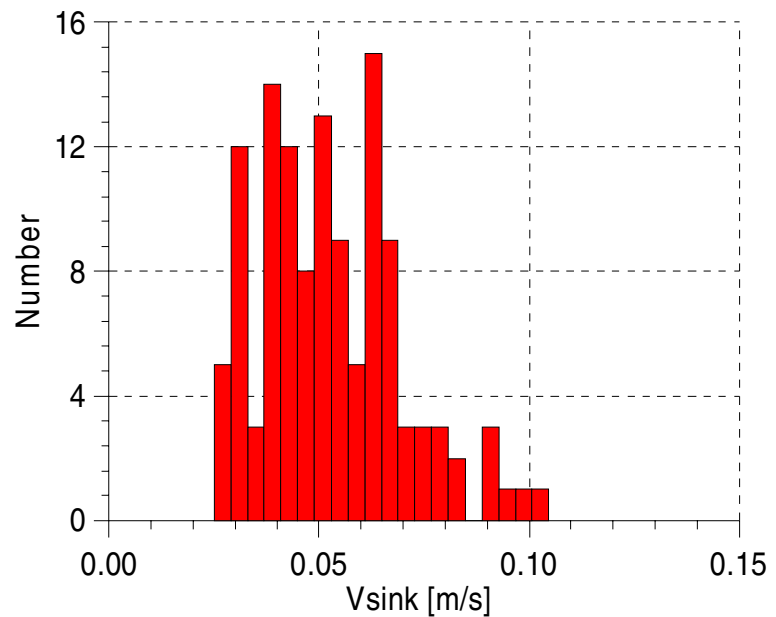


Bild 1: Ergebnisse der Sinkexperimente in der „Säule“

3.2. CFD Konzept zur Modellierung des Partikeltransports

Die durch eine CFD Simulation zu lösende Frage besteht in der Bestimmung der durch die Wasserströmung transportierten Fasermenge, der in einer gegebenen Geometrie an bestimmten Positionen abgelagerten Menge sowie des Partikelaustrags. Da hierbei der Impulstransport in der Wasserströmung eine wichtige Rolle spielt, kann dieses Problem nur durch einen CFD Code adäquat gelöst werden.

CFD Codes beschreiben eine Flüssigkeitsströmung durch Lösung der Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls und Energie. Verschiedene Methoden unterscheiden unterschiedliche Lösungsstrategien der Erhaltungsgleichungen sowie unterschiedliche Diskretisierungsmethoden. Für die vorliegende Aufgabe kommen zwei unterschiedliche Lösungsansätze in Frage: Die Anwendung der Euler/Lagrange-Methode oder des Euler/Euler-Ansatzes.

Die erste Methode basiert auf der Lösung der Erhaltungsgleichungen für die kontinuierlich verteilt angenommene flüssige Phase und die Lösung der Lagrange-Gleichung für jedes Partikel. Die einzelnen Partikel werden dabei als im Punkt konzentrierte Massen angenommen. Das Strömungsfeld der kontinuierlichen Phase wirkt durch Impulsaustausch auf jedes Partikel und beeinflusst deren Weg. Die Partikel selbst beeinflussen die Turbulenzparameter der flüssigen kontinuierlichen Phase. Eine Größenverteilung unterschiedlicher Partikel kann leicht durch die Randbedingungen am Eintritt vorgegeben werden. Es sind darüber hinaus Modelle zur plastischen Reflexion der Partikel an Wänden, zur Erosion an der Wand oder zur Ablagerung an Wänden bekannt.

Bei der Euler/Euler-Methode werden mindestens zwei Fluide (Flüssig-Gas oder Flüssig-Fest) als sich kontinuierlich durchdringend angenommen, wobei die Summe der Volumenanteile aller Fluide in jeder Rechenzelle 1 beträgt. Für jedes Fluid wird der volle Satz der Erhaltungsgleichungen

gleichungen gelöst. Jedes Fluid hat daher sein eigenes Geschwindigkeitsfeld. Die Wechselwirkungsmechanismen der Fluide werden durch Schließungsbeziehungen der Erhaltungsgleichungen modelliert: Der Strömungswiderstand durch Beschreibung des Impulsaustauschs, der Phasenübergang durch Massenaustausch und die Wärmeübertragung durch Energieaustausch. Während die beiden letzteren Phänomene für die vorliegende Problemstellung nicht relevant sind, spielt die Beschreibung des Strömungswiderstandes durch Impulsaustausch die wesentliche Rolle.

Verglichen mit dem Euler/Euler-Ansatz erfordert der Euler/Lagrange-Ansatz bei gleicher Aufgabenstellung einen höheren numerischen Aufwand, der die Anwendbarkeit der Modelle zur Lösung praktischer Fragestellungen limitieren könnte. Die langen Erfahrungen im FZ-Rosendorf bei der Anwendung der Euler/Euler-Methode zur Beschreibung von Blasenströmungen, durch die sofort Ansätze zur Beschreibung der Sedimentation sowie der Wirkung von Sieben offensichtlich wurden, sind ein weiteres Argument dafür, dass die Modellierungsarbeit zunächst mit dieser Technik begonnen wurde.

3.3. Modellierung des Partikeltransports basierend auf dem Euler/Euler-Ansatz

Der Partikeltransport basierend auf dem Euler/Euler-Ansatz wird durch den Impulsaustausch zwischen den beiden Fluiden beschrieben. Im Fall von kugelförmigen Gasblasen oder sich im Fluid bewegenden kugelförmigen Feststoffpartikeln hat die Wechselwirkungskraft die prinzipielle Form:

$$F_{\text{Drag}} = \frac{1}{2} n \rho_L A C_D |U| U \quad (1)$$

mit der Teilchenanzahldichte n , der Dichte der Flüssigkeit ρ_L , der Querschnittsfläche des Partikels in Strömungsrichtung A , der relativen Geschwindigkeit zwischen den beiden Fluiden U und dem Drag-Koeffizienten C_D . Der Drag-Koeffizient hängt in der Regel von der Partikel-Reynoldszahl ab, die definiert ist nach:

$$\text{Re} = \frac{\rho_L |U| d}{\mu_L} \quad (2)$$

mit μ_L als der dynamischen Viskosität der Flüssigkeit.

Für niedrige Geschwindigkeiten und Reynoldszahlen $\ll 1$ sind die Viskositätseffekte dominierend. Für diese als Stokes-Regime bezeichneten Relationen gilt:

$$C_D = 24 / \text{Re} \quad (3)$$

Bei hohen Geschwindigkeiten ($1000 < \text{Re} < 1 \cdot 10^5$) dominieren die Trägheitseffekte und es gilt:

$$C_D = 0.44 \quad (4)$$

In der Übergangsregion ($0.1 < \text{Re} < 1000$), in der beide Effekte von derselben Größenordnung sind, findet man:

$$C_D = \max\left[\frac{24}{\text{Re}}(1 + 0.15\text{Re}^{0.687}), 0.44\right] \quad (5)$$

Die letzte Gleichung ist auch als Schiller/Naumann-Korrelation bekannt.

Aus der Dichtedifferenz zwischen Wasser und Fasern resultiert im Schwerfeld die Schwerkraft:

$$F_{\text{buoyancy}} = ngV_{\text{Particle}}(\rho_{\text{Particle}} - \rho_{\text{Water}}) \quad (6)$$

Die Geschwindigkeit, mit der Partikel in einer ruhenden Flüssigkeit zu Boden sinken, ergibt sich aus der Gleichheit von Schwerkraft und Widerstandskraft. Die Sinkgeschwindigkeit berechnet sich damit aus:

$$V_{\text{sink}} = \sqrt{\frac{4}{3}g \frac{\rho_{\text{particle}} - \rho_{\text{water}}}{\rho_{\text{water}}} d \frac{1}{C_D}} \quad (7)$$

Da C_D von der Reynoldszahl abhängt, muss Gleichung (7) iterativ gelöst werden. In der Literatur sind unterschiedliche Korrelationen für den Drag-Koeffizienten von Feststoffpartikeln unterschiedlicher Gestalt in einer Wasserströmung bekannt. Beim hier beschrittenen Weg wird jedoch von der Sinkgeschwindigkeit ausgegangen, über die aus den Sinkexperimenten ausführliche Informationen vorliegen. Die virtuelle Partikeldichte und der virtuelle Partikeldurchmesser werden so justiert, dass sich die gemessene Sinkgeschwindigkeit ergibt. In der Realität stellen die virtuellen Partikel Faser-Mikroballen dar, die zum größten Teil aus Wasser bestehen. Man findet bei diesem Verfahren demzufolge eine virtuelle Partikeldichte, die geringfügig über der von Wasser mit 1000 kg/m^3 liegt während die Dichte der getrockneten Fasern in der Größenordnung von $2..3 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ zu finden ist. Diese Vorgehensweise ist korrekt, da sich die virtuellen Partikel insgesamt mit der Partikelgeschwindigkeit bewegen.

Die Auswertung der Gleichungen (5) und (7) ergibt die in Bild 2 dargestellten Sinkgeschwindigkeiten. Das untersuchte Material (s. Bild 1) hat eine mittlere Sinkgeschwindigkeit von $0,05 \text{ m/s}$. Diese ergibt sich auch bei einer virtuellen Dichte von 1030 kg/m^3 und einem virtuellen Partikeldurchmesser von 5 mm .

Die im Versuchsstand „Säule“ durchgeführten Experimente wurden mit CFX simuliert. Die Transiente startete mit einer Faseransammlung im oberen Teil der Säule. Der Massenstrom an Fasern durch eine fiktive Ebene bei einer Höhe von 1 m wurde berechnet und mit experimentellen Beobachtungen verglichen (s. Bild 3). Der Massenstrom wurde in den Experimenten aus den Grauwerten der Videoaufzeichnung bestimmt, wobei die Ausdehnung in die Tiefe vernachlässigt wurde. Die Lage des Maximums bei etwa 20 s wurde durch die Vorgabe der virtuellen Partikeldichte und des virtuellen Partikeldurchmessers festgelegt. Wesentlich an Bild 3 ist dagegen die Aufspreizung des Maximums, die sich einerseits durch die Wechselwirkung mit der Wasserströmung und andererseits durch die Streuung der Partikelgrößen ergeben. Während ersteres Phänomen in der CFD-Simulation recht gut wiedergegeben wird, besteht zur Nachbildung des zweiten Phänomen noch weiterer Entwicklungsbedarf, da bei der hier eingesetzten Modellierung von gleichartigen Partikeln ausgegangen wurde.

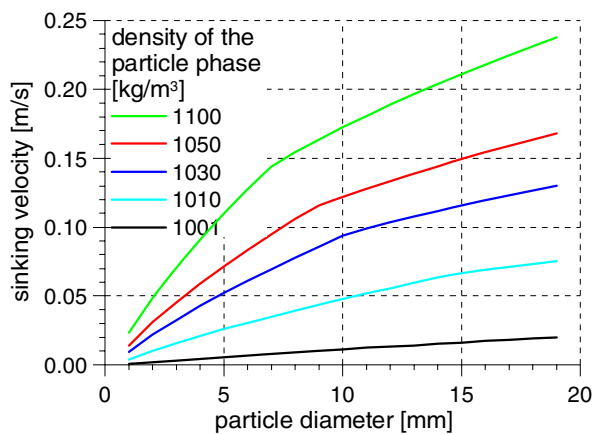


Bild 2: Abhängigkeit der Sinkgeschwindigkeit vom virtuellen Partikeldurchmesser und der virtuellen Partikeldichte

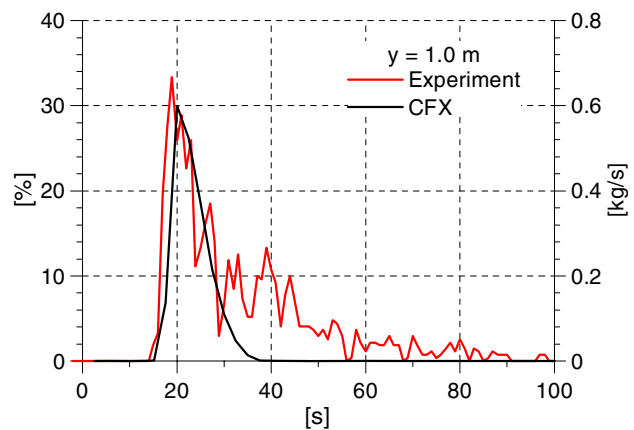


Bild 3: Massenstrom durch eine fiktive Ebene bei einer Höhe von 1 m

4. Modellierung der Sedimentation und der Re-Suspension der Fasern

4.1. Experimente

Die Sedimentations- und Re-Suspensionseigenschaften der Fasern wurden in einem flachen runden Plexiglaskanal mit einer Breite von 0,1 m, einer Höhe von 1,2 m und geraden Abschnitten von 5 m untersucht (s. Bild 4). Die Bögen an den Enden haben einen Radius von jeweils 0,5 m. Die Wasserströmung wird von zwei langsam drehenden Pumpen angetrieben. Es können Umlaufgeschwindigkeiten im Bereich von 0,01..1 m/s eingestellt werden. Im geraden Abschnitt des Kanals können Hindernisse angeordnet und das Sedimentations- und Re-Suspensionsverhalten der Fasern beobachtet werden. Mittels Hochgeschwindigkeit-Video und Laser PIV werden Informationen über das Wasser-Geschwindigkeitsfeld sowie über Faser-Ablagerungsmengen in den Verschiedenen Abschnitten der Anlage gewonnen.

Die Beobachtungen zeigten, dass die Fasern sich bei einem kritischen Faser-Volumenanteil „verzahnen“. Unterhalb einer kritischen Strömungsgeschwindigkeit von etwa 0,1 m/s lagern sich die Fasern am Boden bzw. an den Hindernissen ab. Bei einer Erhöhung der Wassergeschwindigkeit werden die Partikel wieder mobilisiert.

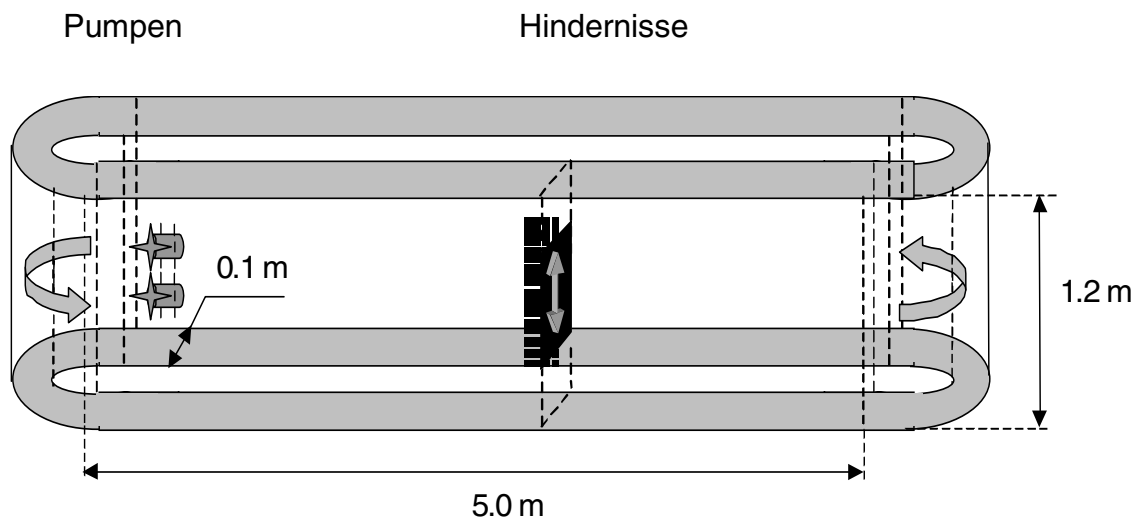


Bild 4: Kanal zur Untersuchung des Ablagerungs- und Re-Suspensionsverhaltens der Fasern

4.2. Simulation des Sedimentations- und Re-Suspensionsverhaltens

Bei der Anwendung des Euler/Euler-Ansatzes kann das Sedimentations- und Re-Suspensionsverhalten der Fasern durch eine variable Viskosität modelliert werden. Ursprünglich wurde die Simulation als Nicht-Newton'sches Fluid vorgeschlagen, bei der die Viskosität abhängig von der Scherspannung dargestellt wird. Die in Abschnitt 4.1 beschriebenen Beobachtungen einer „Verzahnung“ der Fasern oberhalb eines kritischen Faser-Volumenanteils legten jedoch die Darstellung der Viskosität abhängig vom Volumenanteil nahe.

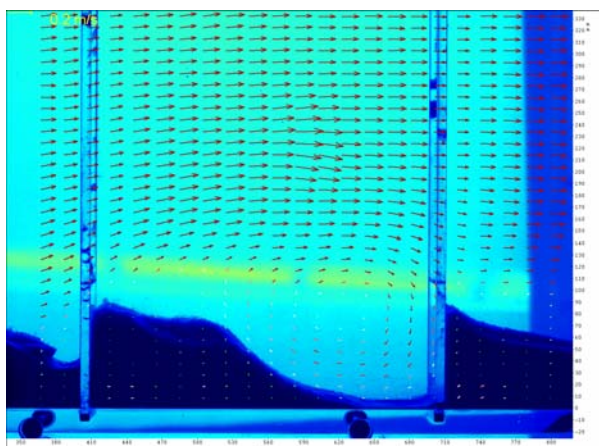


Bild 5: Laser PIV Messungen des Wasser-Geschwindigkeitsfeldes und der Faserverteilung zwischen zwei Wehren

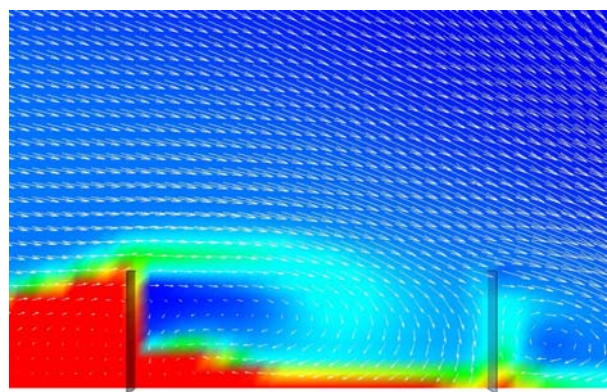


Bild 6: CFX Simulation unter Anwendung des Euler/Euler-Ansatzes

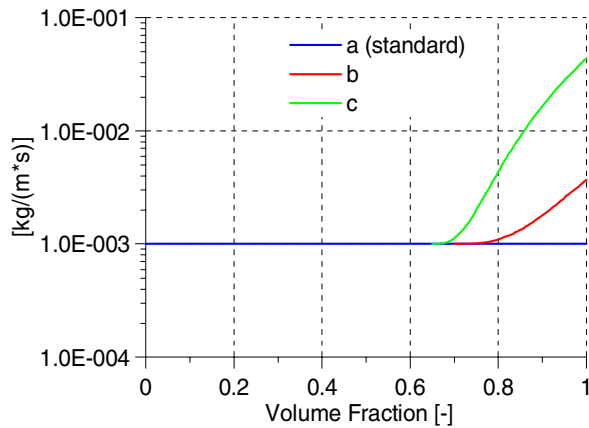


Bild 7: Angenommene Abhängigkeit der Faserviskosität vom Faservolumenanteil

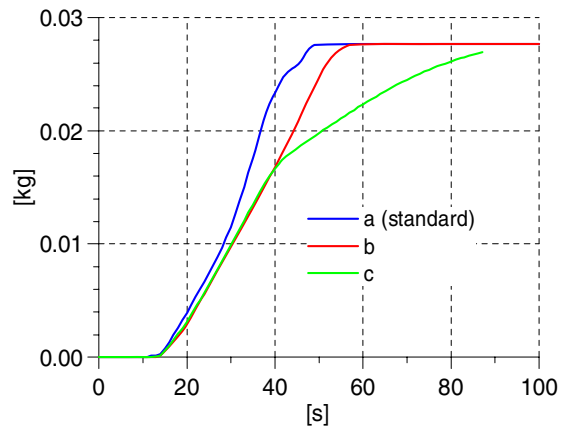


Bild 8: Zwischen den Wehren abgelagerte Fasermengen

Die Ablagerung von Fasern zwischen zwei Wehren der Höhe 0,1 m im Abstand von 0,3 m wurde mit CFX simuliert und entsprechende Experimente wurden durchgeführt (s. Bilder 5 und 6). Es wurden Varianten der funktionellen Abhängigkeit der Viskosität angenommen (s. Bild 7) und die Ablagerungsmengen zwischen den Wehren wurden berechnet (s. Bild 8). Weitere Untersuchungen und Experimente zu dieser Thematik sind geplant.

5. Modellierung von Sieben

5.1. Bestimmung des Differenzdrucks als Funktion der Faserbelegung und der Leerrohrgeschwindigkeit

Durchströmte Packungen faserförmiger Materialien sind durch eine hohe Porosität gekennzeichnet. Außerdem sind sie unter dem Einfluss des Strömungswiderstandes oder eines extern aufgeprägten Kompaktierungsdrucks hochgradig kompressibel. Aus dem kumulativen Effekt des Strömungswiderstandes, welcher auf jede einzelne Faser wirkt, ergibt sich ein in Strömungsrichtung wachsender Kompaktierungsdruck, der zu einer Porositätsverteilung mit einem Maximum am stromaufwärtigen Ende und einem Minimum an der stromabwärts gelegenen Rückhaltevorrichtung führt (Abb. 9). Die aus dem lokalen Kompaktierungsdruck resultierende Porosität der Faserpackung bestimmt wiederum die lokale Änderung des Kompaktierungsdrucks. Dieser Zusammenhang wird durch eine Differenzialgleichung der Form:

$$\frac{dp}{dx} = f(U, U^2, \varepsilon) \quad (8)$$

und durch ein Materialgesetz $\varepsilon(p)$ beschrieben. Darin sind U die Leerrohrgeschwindigkeit der kontinuierlichen Phase und ε die Porosität der Packung. Die Abhängigkeit der Porosität vom Kompaktierungsdruck wird durch die empirische Gleichung

$$\varepsilon(p) = \varepsilon_{\min} + (\varepsilon_0 - \varepsilon_{\min})e^{-Cp^D} \quad (9)$$

mit guter Genauigkeit wiedergegeben, wobei die Koeffizienten ε_0 , ε_{\min} , C und D durch Kompaktierungsversuche zu ermitteln sind. Das Messprinzip und der gemessene $\varepsilon(p)$ -Verlauf sind in den Abbildungen 10 und 11 dargestellt. Gln. (8) und (9) bilden ein Anfangswertproblem mit den Randbedingungen $p = 0$ und $\varepsilon = \varepsilon_{\min}$ am stromaufwärtigen Ende, dessen Lösung, welche durch numerische Integration in Strömungsrichtung erfolgt, die Verläufe von Porosität und Kompaktierungsdruck sowie den Gesamtdruckverlust über der Faserpackung in Abhängigkeit von der Leerrohrgeschwindigkeit liefert.

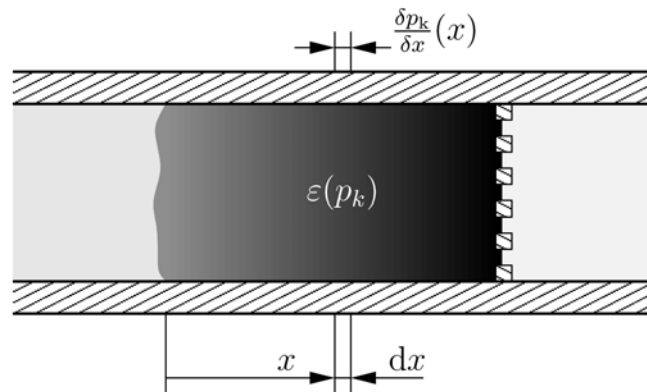


Bild 9: Porositätsverteilung in der Faserpackung

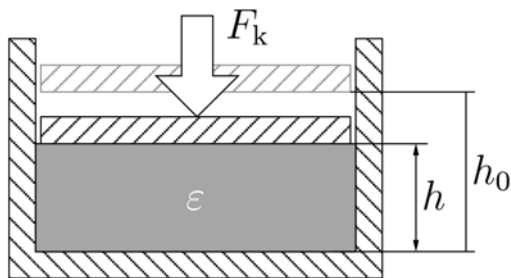


Bild 10: Messprinzip der Kompaktierungsversuche

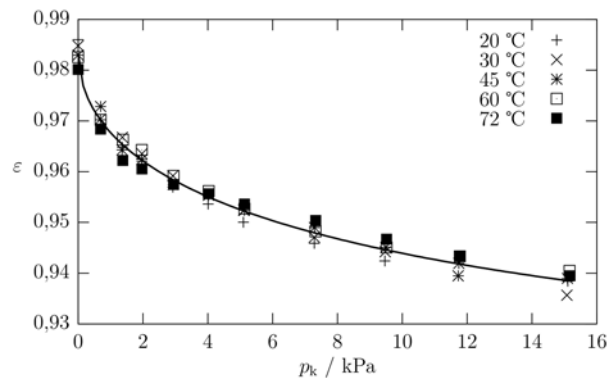


Bild 11: Gemessener Zusammenhang zwischen Porosität und Kompaktierungsdruck

Der so genannte Dünnschichteffekt resultiert von kleinen Schmutzpartikeln, die sich zwischen den Fasern oder an der stromaufwärtigen Oberfläche der Faserpackung ablagern, und dort Schlammschichten geringerer Porosität und hohem Druckabfall bilden. Diese führen zur verstärkten Kompression der Packung und zu einem weiteren Anstieg des Gesamtdruckverlustes. Die Eindringtiefe der Partikel in die Fasermatrix wird von Art und Stärke der Wechselwirkungen zwischen Partikel und Faser bestimmt. Die physikalischen Vorgänge sind komplex und nur wenig erforscht. Deshalb wurde ein einfacher Ansatz zur Bestimmung der Eindringtiefe in Abhängigkeit vom lokalen äquivalenten Kapillardurchmesser

$$d_{\text{äquiv}} = \frac{4}{\rho_s A_s} \cdot \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \quad (10)$$

der Faserpackung gewählt. Darin sind ρ_s und A_s Dichte und spezifische innere Oberfläche des Fasermaterials. Partikel des Durchmessers d_p dringen in die Packung ein, solange die Bedingung

$$d_{\text{äquiv}} \geq F \times d_p \quad (11)$$

erfüllt ist. F ist ein Parameter, mit dem die Eindringtiefe variiert werden kann. Transiente Rechnungen mit verschiedenen Werten von F wurden durchgeführt, um den Einfluss der Eindringtiefe auf den Gesamtdruckverlust abzuschätzen (Bild 12). Dabei hat sich gezeigt, dass die Eindringtiefe den Druckverlust nur wenig beeinflusst, sodass der Aufwand zur Modellierung der Partikel-Faser-Wechselwirkungen nicht gerechtfertigt ist.

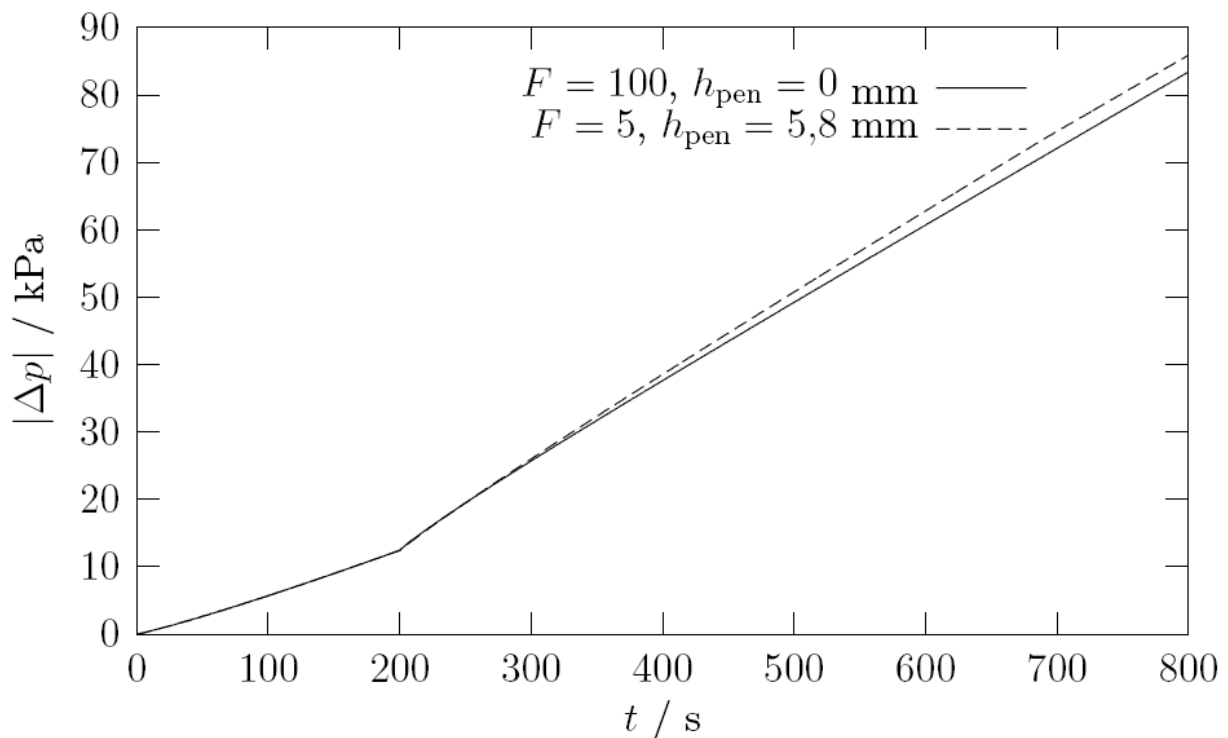


Bild 12: Druckverlustzunahme am zusammengesetzten Partikel/Faser-Bett; Feststoffbeladung $\varepsilon_s = 0,0001$; Leerrohrgeschwindigkeit $U = 6$ cm/s; $t < 200$ s: Faserbettbildung; $t > 200$ s: Dünnschichtbildung mit Partikeldurchmesser $d_p = 50$ μm ; h_{pen} ... Eindringtiefe

5.2. Implementierung in einen CFD Code

Die Implementierung der abgeleiteten Korrelationen ermöglicht die Simulation auch eines nur teilweise blockierten Siebes und die Untersuchung des Einflusses auf das Strömungsfeld. Es wurde das CFD Konzept eines porösen Körpers benutzt. Hier kann der lokale Strömungswiderstand im Raum modelliert werden:

$$-\frac{\partial p}{\partial x_i} = K_{\text{loss}}(y, z, t) \rho |U| U_i \quad (10)$$

Der Strömungswiderstand kann näherungsweise abhängig vom integralen Fasermassenstrom dargestellt werden:

$$K_{loss}(y, z, t) = F \left(\int_0^t \dot{m}_{fibres}(y, z, t) dt \right) \quad (11)$$

Die Funktion in Gleichung (11) ist durch die in Kapitel 5.1. abgeleitete Korrelation gegeben. Bild 12 zeigt das Ergebnis einer Machbarkeitsstudie dieses Konzeptes in einer CFX-Simulation. Das Bild zeigt, wie das teilweise belegte Sieb die Strömung verändert.

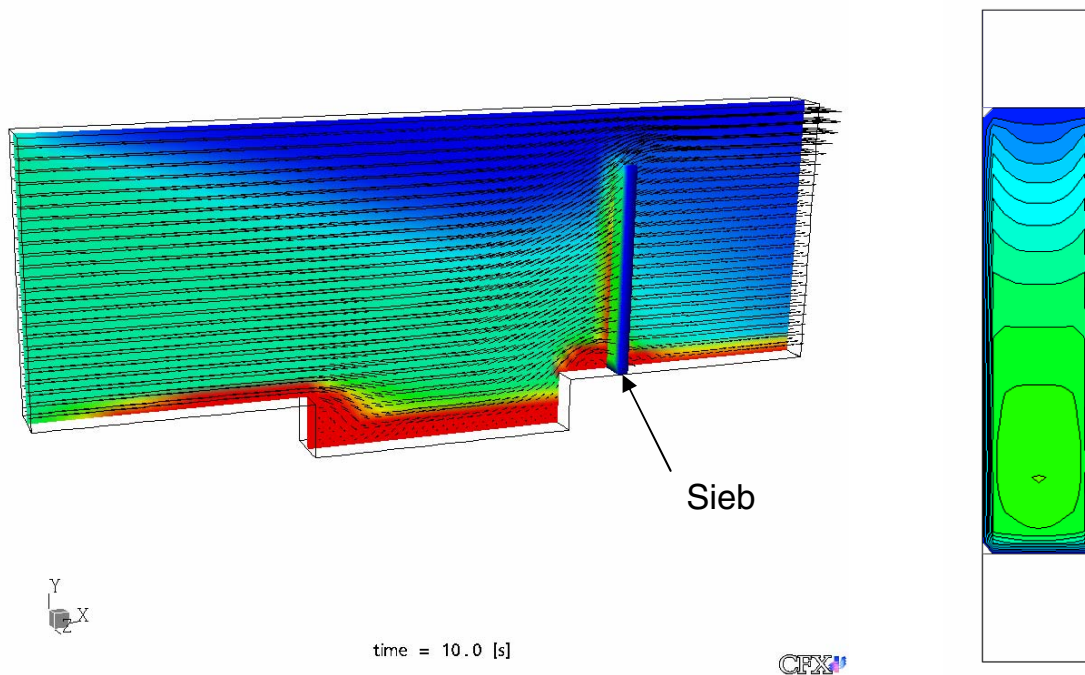


Bild 12: Machbarkeitsstudie des beschriebenen Siebmodells in einer transienten CFX-Rechnung (linke Seite) und teilweise belegtes Sieb (rechte Seite)

Zusammenfassung

Die Arbeiten sind noch im Gange. Die noch bestehenden Probleme bei der Modellierung des Partikeltransports und der Sedimentation und Re-Suspension wurden aufgezeigt. Sie bestehen insbesondere in der Berücksichtigung der Partikelstreuung beim Fasertransport und in der Verbesserung Anpassung der Modellierung an die experimentellen Befunde bei der Sedimentation und Re-Suspension. Des weiteren ist die Untersuchung eines auf eine Wasseroberfläche auftreffenden Jets auf die Mobilisierung am Boden liegender Partikel vorgesehen. Die innerhalb dieses Projektes entwickelten Modelle werden die Beantwortung zahlreicher praktischer Fragestellungen ermöglichen.

Danksagung

Die Untersuchungen werden durch das Bundesministerium für Wirtschaft unter dem Förderkennzeichen 1501270 und 1501307 gefördert.

Literatur

- [1] Knowledge Base for Emergency Core Cooling System Recirculation Reliability, NEA/CSNI/R(95)11
- [2] Knowledge Base for the Effect of Debris on Pressurized Water Reactor Emergency Core Cooling Sump Performance, NUREG/CR-6808; LA-UR-03-0880
- [3] Knowledge Base for Strainer Clogging -- Modifications Performed in Different Countries Since 1992, NEA/CSNI/R(2002)6
- [4] Debris impact on Emergency coolant recirculation, Workshop Albuquerque, NM, USA February 2004, Proceedings OECD 2004 NEA No. 5468

CFD-Simulation von Mineralwollpartikeln in der Sumpfstromung

E. Krepper, A. Grahn (FZR), W. Kästner (IPM Zittau)

Fachtagung der KTG-Fachgruppen „Sicherheit kerntechnischer Anlagen“, „Thermo- und Fluidodynamik“ und „Betrieb von kerntechnischen Anlagen

03.-04.04.2006



Forschungsprojekt gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit

- Partikelbelastete Kühlmittelströmung im Sumpf und in der Kondensationskammer
- Institut für Prozesstechnik, Prozessautomatisierung und Messtechnik (IPM) Zittau
 - Experimente
- Forschungszentrum Rossendorf e.V., Institut für Sicherheitsforschung
 - Modellentwicklung
 - Implementierung in den CFD-Code ANSYS/CFX



Schwerpunkte des Projektes

1. Bestimmung der Primärzusammensetzung der Partikel
2. Untersuchung des Transportverhaltens der Partikel in einer Wasserströmung
3. Sedimentation und Re-Suspension
4. Verhalten an Sieben
5. Eintauchen eines Wasserstrahls in eine Wasservorlage

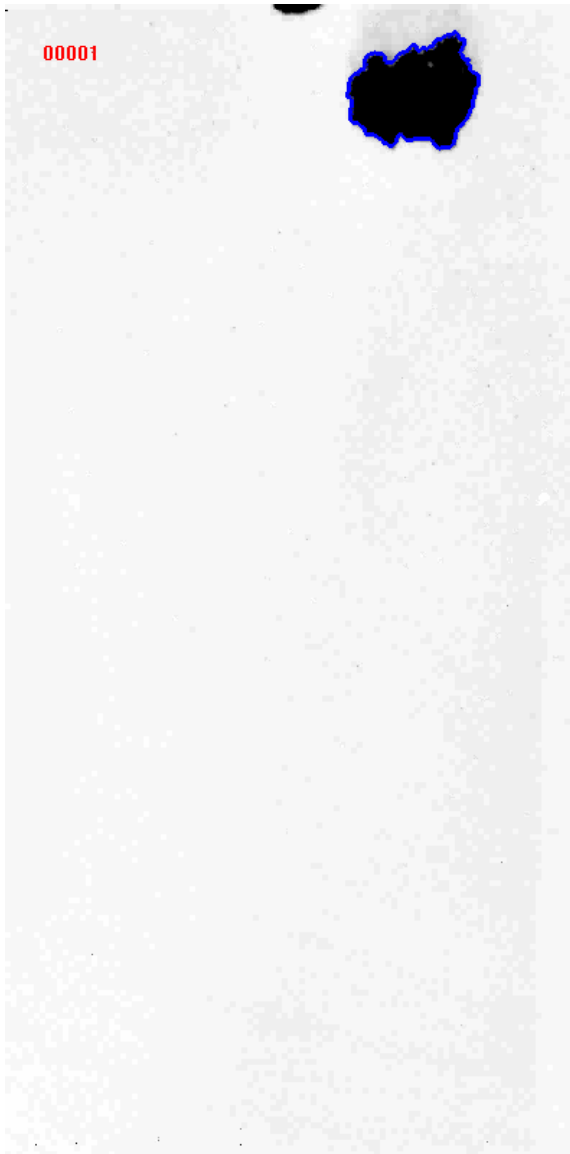


Versuchsstände in Zittau

Säule

- Untersuchung des Sinkverhaltens
- Messtechnik:
Hochgeschwindigkeits-Video
- Ableitung der Transportparameter
- Klassifizierung der Partikel





Beobachtungen

- Fasern unterschiedlicher Größe und Gestalt
- Erzeugung eines Feinanteils
- Auseinanderbrechen größerer Teilchen unter dem Einfluss der Wasserströmung
- Sinkverhalten durch Benetzungsfähigkeit der Partikel bestimmt (Herstellungsverfahren, Hydrophobie, Alter, usw.)

CFD Modellansatz zum Transport von Partikeln in einer Wasserströmung

- Zweifluidmodell:
 - Impulsaustausch zwischen den Phasen:

$$F_{drag} = \frac{1}{2} n \rho_{Wasser} A_{Partikel} C_D |U|U$$

- n – Partikelanzahldichte
- ρ – Dichte der kontinuierlichen Phase
- $A_{Partikel}$ – Querschnitt des Partikels in Strömungsrichtung
- $V_{Partikel}$ – Volumen des Partikels
- C_D - Drag-Koeffizient
- U – Relativgeschwindigkeit

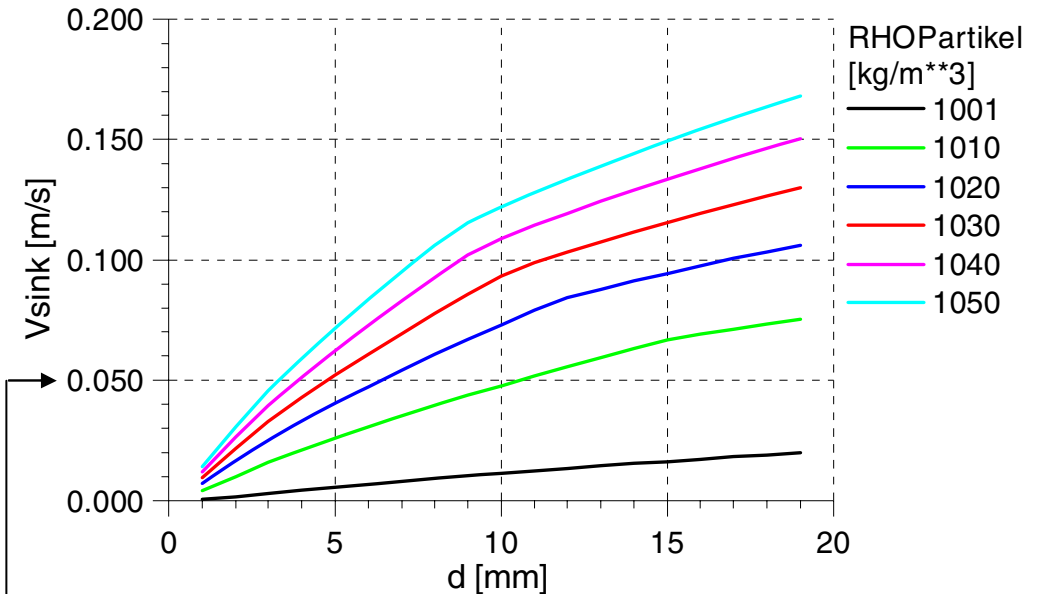
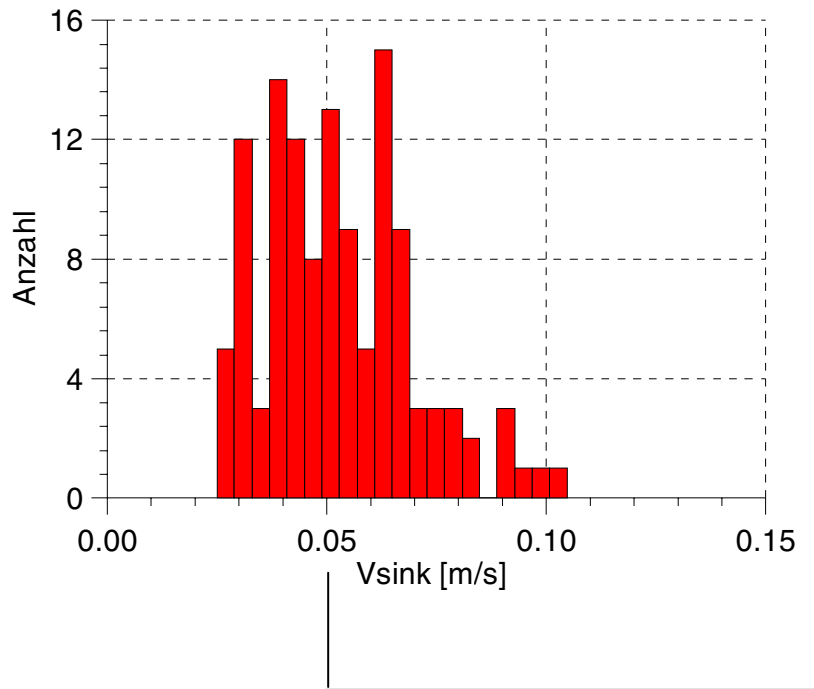
- Ermittlung des Drag-Koeffizienten aus den Sinkversuchen:

$$F_{sink} = ngV_{Partikel} (\rho_{Partikel} - \rho_{Wasser}) \quad V_{sink} = \sqrt{\frac{4}{3} g \frac{\rho_{Partikel} - \rho_{Wasser}}{\rho_{Wasser}} d \frac{1}{C_D}}$$

Modellierung der Sinkgeschwindigkeit

Messung

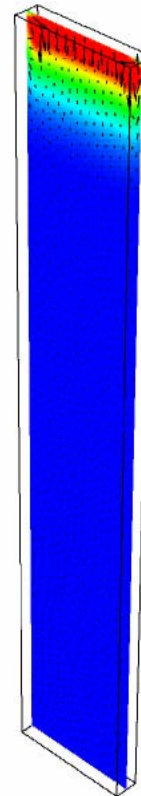
$$V_{\text{sink}} = \sqrt{\frac{4}{3} g \frac{\rho_{\text{Partikel}} - \rho_{\text{Wasser}}}{\rho_{\text{Wasser}}} d \frac{1}{C_D}}$$



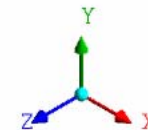
$d = 5 \text{ mm}, \rho_{\text{Partikel}} = 1030 \text{ kg/m}^3$
 $\rightarrow V_{\text{sink}} = 0.05 \text{ m/s}$

$$\rho_{Fibres} = 1080 \text{ kg/m}^3, d = 5\text{mm} \rightarrow V_{sink} = 0.1 \text{ m/s}$$

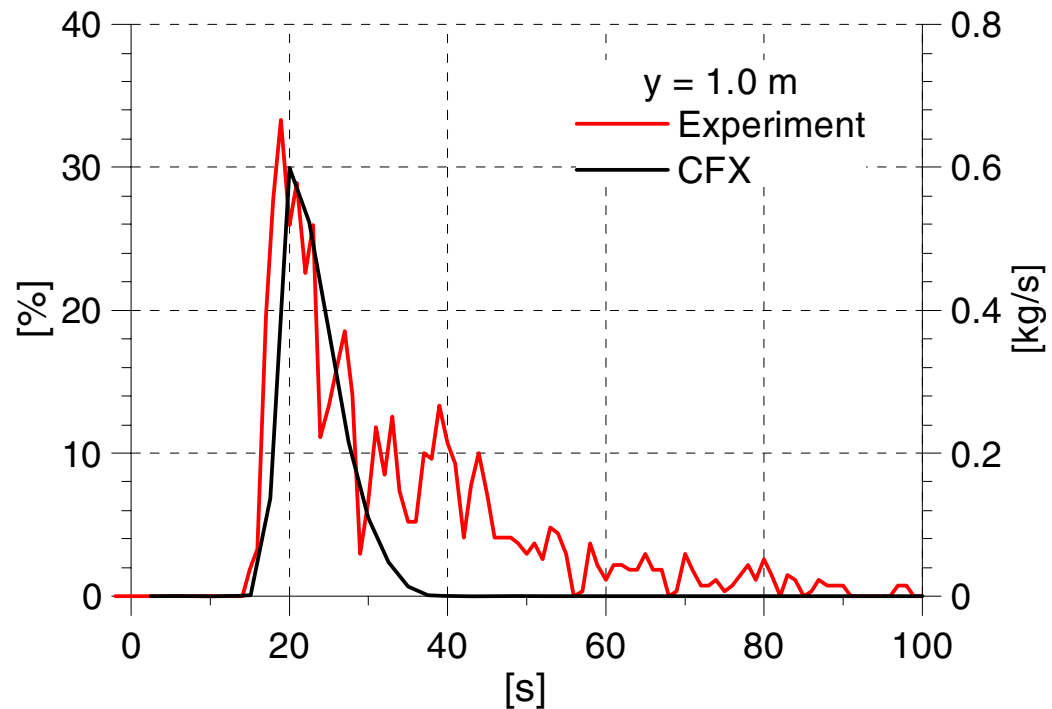
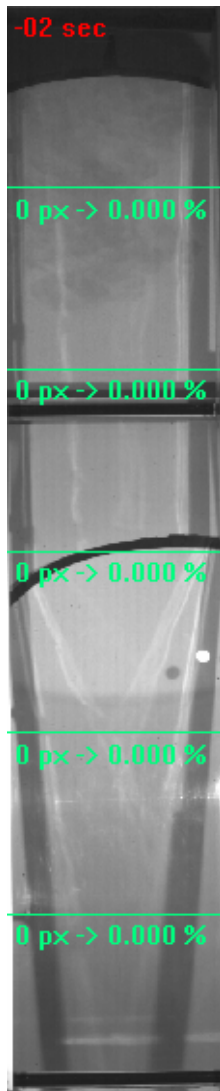
CFX



time = 2.5 [s]



Massenstrom durch eine Ebene bei $y = 1.0$ m



Modellierung des Transportverhaltens

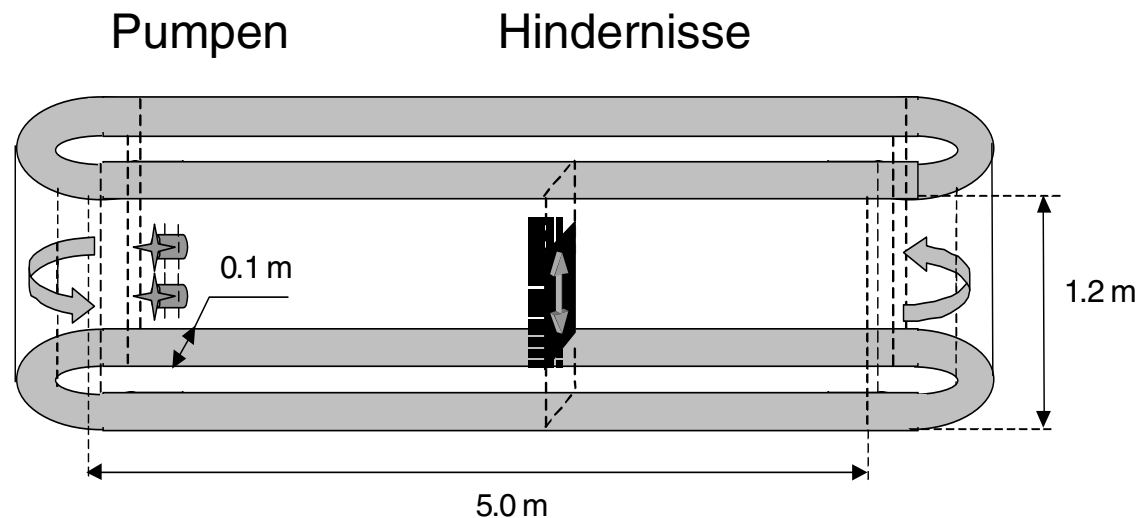
- Drag-Koeffizient kann aus den Sinkexperimenten abgeleitet werden durch Kenntnis der Sinkgeschwindigkeit und Parametrierung über die beiden Parameter Partikeldichte und Partikeldurchmesser
- Mit dem Euler/Euler-Ansatz sind plausible Lösungen möglich
- Probleme:
 - Im Experiment Spektrum der Teilchengrößen ermittelt
 - Modellierung erfolgt nur mit einer Teilchengröße



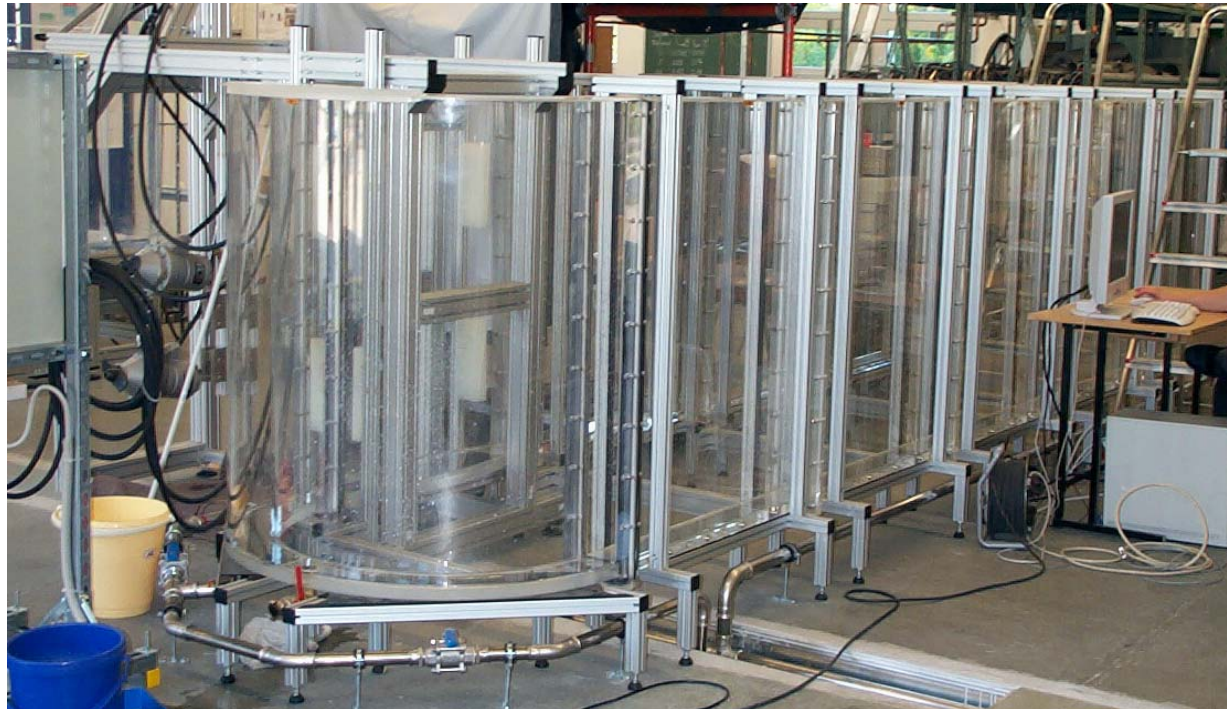
Versuchsstände in Zittau

Kanal

- Untersuchung des Sedimentations und Re-Suspensionsverhaltens am Boden und an Hindernissen
- Hochgeschwindigkeits-Video
- Laser (PIV, LDA) → genaue Kenntnis des Geschwindigkeitsfeldes

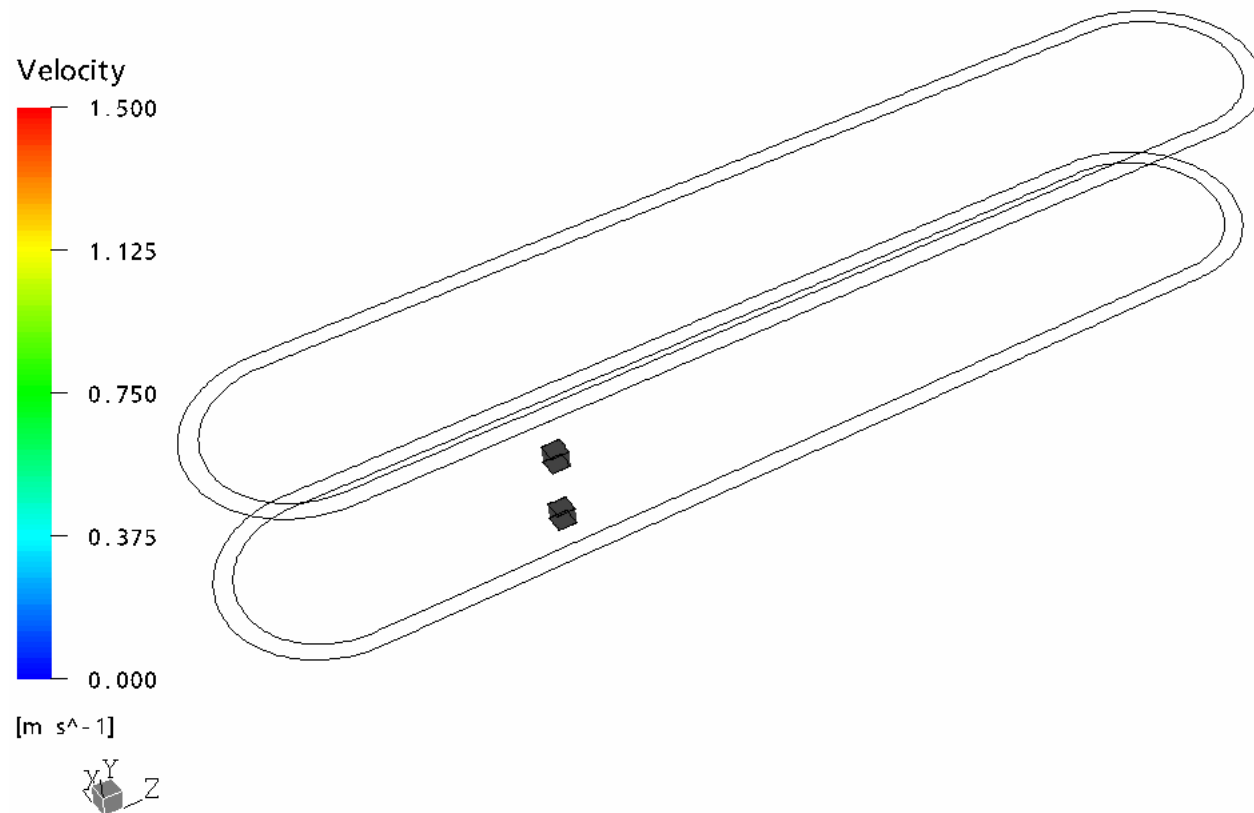


Kanal



Kanal

2 * 45 N



time = 0.0 [s]

CFX



**Forschungszentrum
Rossendorf**

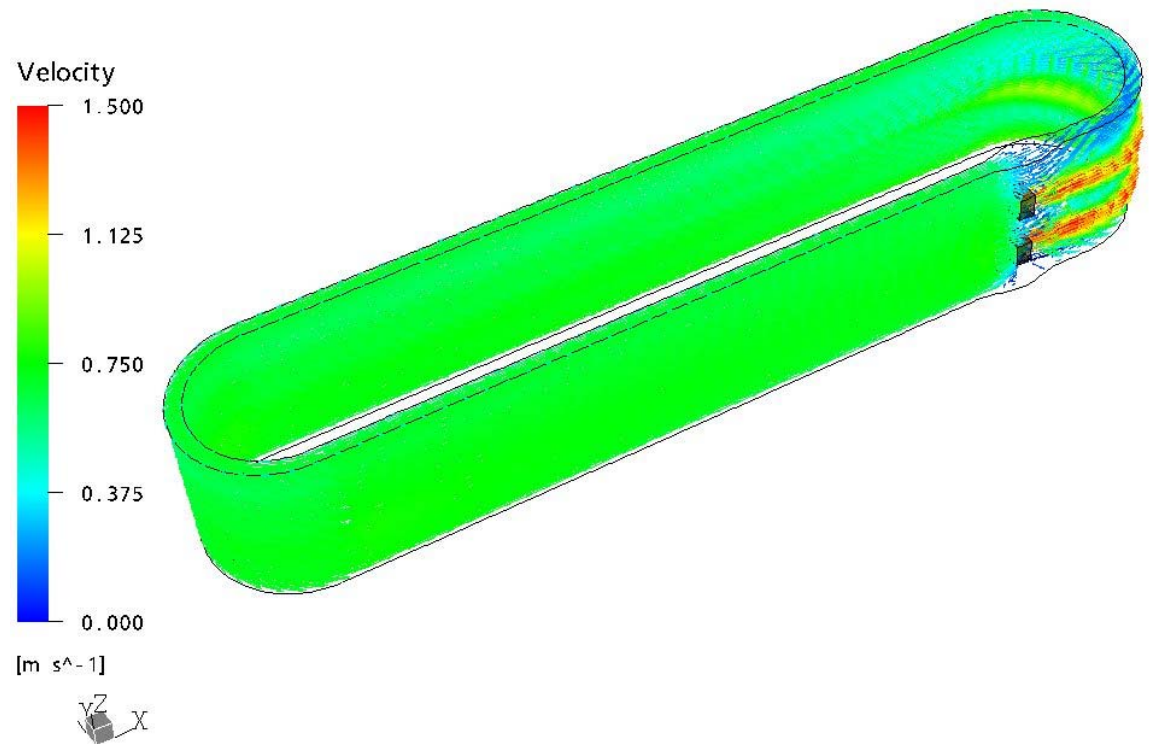
Mitglied der Wissenschaftsgemeinschaft Gottfried Wilhelm Leibniz

Institut für Sicherheitsforschung

04.04.2006

13

Pumpenanordnung



CFX



**Forschungszentrum
Rossendorf**

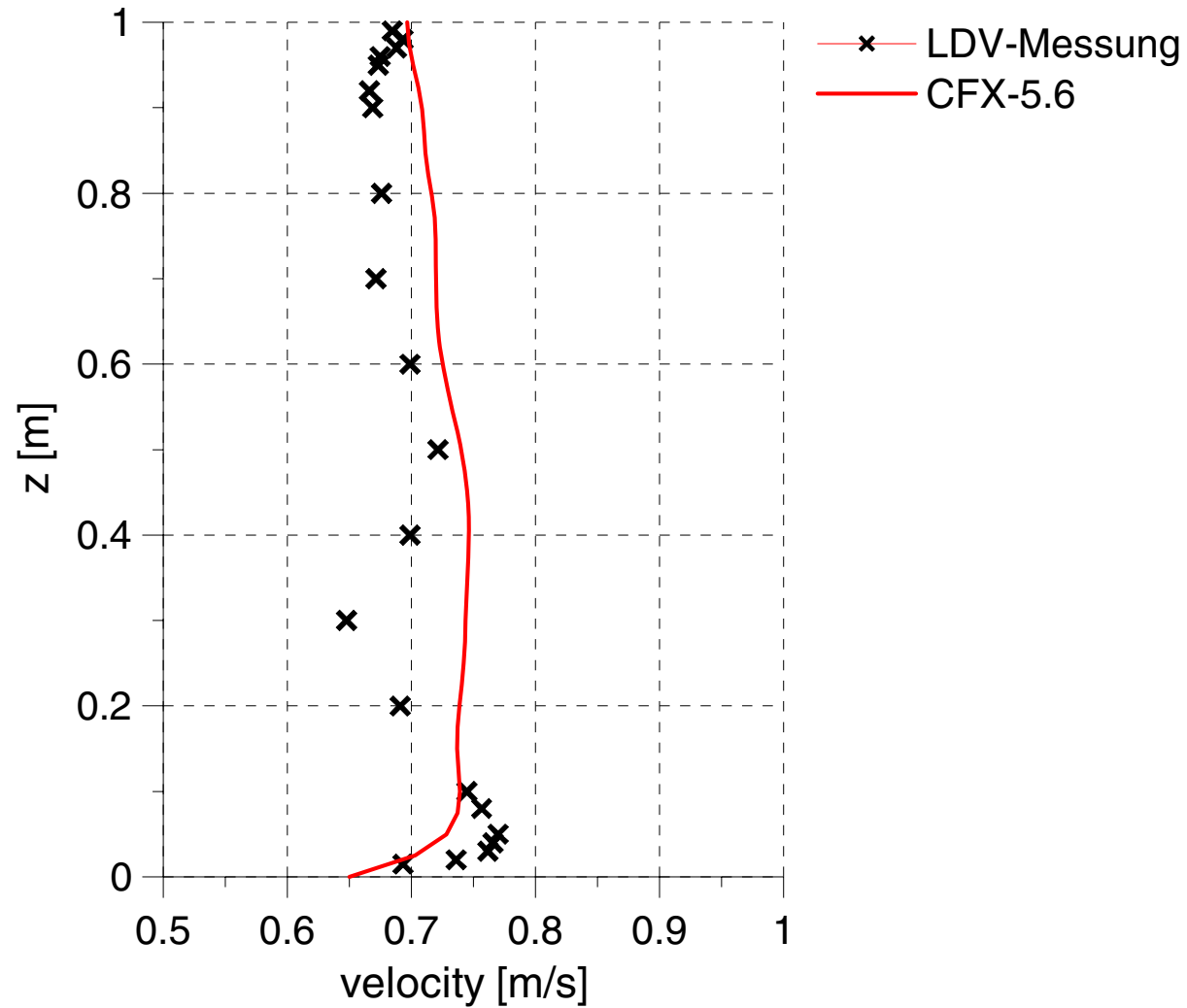
Mitglied der Wissenschaftsgemeinschaft Gottfried Wilhelm Leibniz

Institut für Sicherheitsforschung

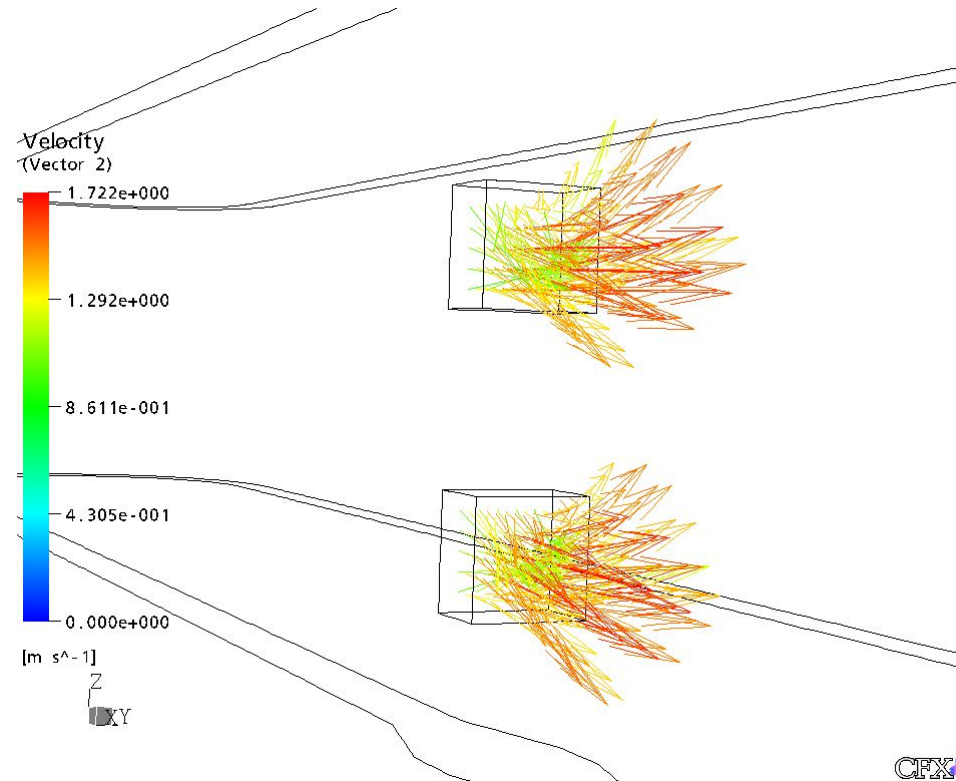
04.04.2006

14

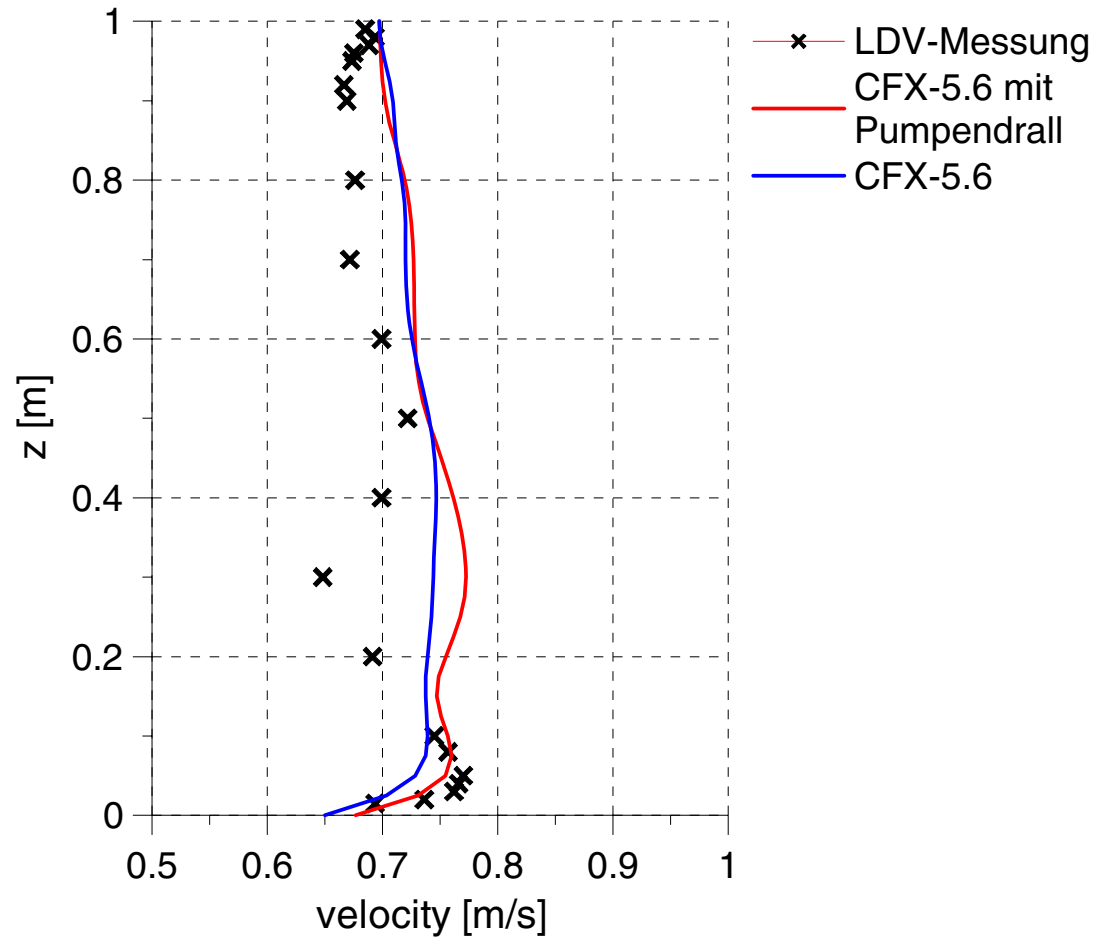
Axiales Geschwindigkeitsprofil



Berücksichtigung des Pumpendralls

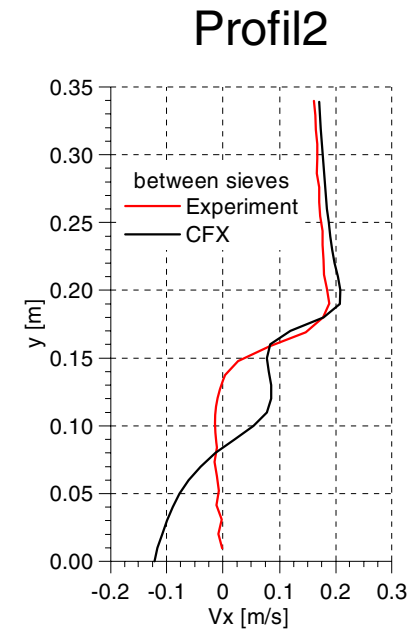
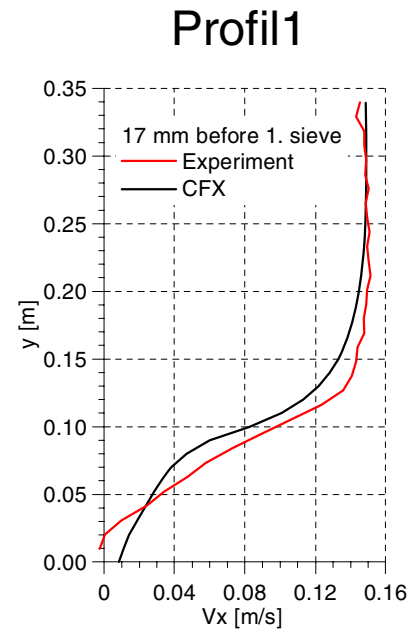
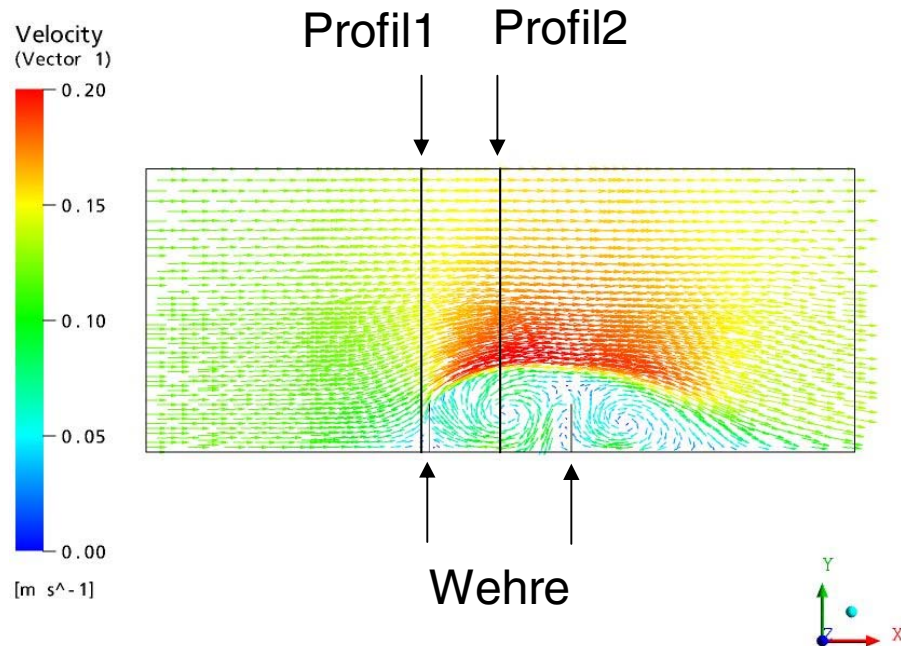


Axiales Geschwindigkeitsprofil



Wasserströmung in einem Kanal

CFX



Experiment: Partikelströmung in einem Kanal



Grundlegende Phänomene

1. Fasern agglomerieren bei einem kritischen Feststoff-Volumenanteil r_{crit}
 - Starkes Anwachsen der Viskosität μ oberhalb r_{crit}
 - Viskosität μ zwischen der des Wassers (bei $r = 0$) und einem Maximalwert (bei $r = 1$)
2. Kritische Wassergeschwindigkeit V_{crit}
 - Geschwindigkeit $< V_{crit} \rightarrow$ Fasern lagern sich am Boden ab
 - Geschwindigkeit $> V_{crit} \rightarrow$ Fasern werden mobilisiert



Modellierung der Viskosität μ

- Non-Newtonian Fluid: Abhängigkeit von der Scherspannung γ
z.B.:

$$\mu = k\gamma^{n-1}$$

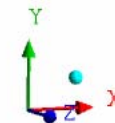
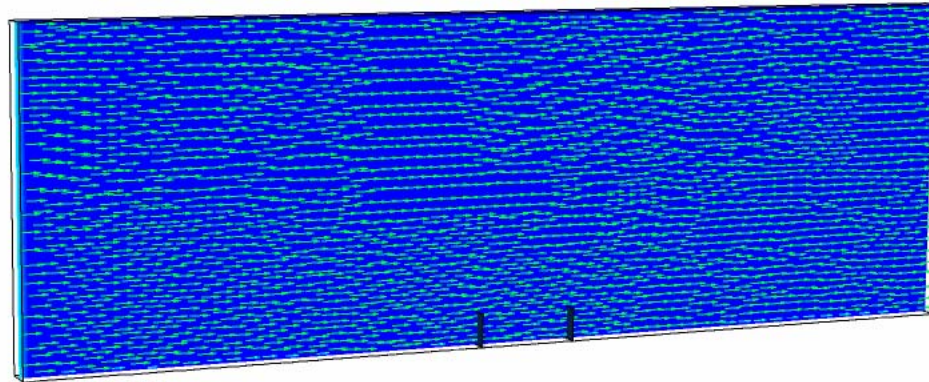
- Abhängigkeit vom Feststoff-Volumenanteil

$$\mu = F(r)$$



Strömung in einem Kanal

CFX



time = 0.0 [s]



**Forschungszentrum
Rossendorf**

Mitglied der Wissenschaftsgemeinschaft Gottfried Wilhelm Leibniz

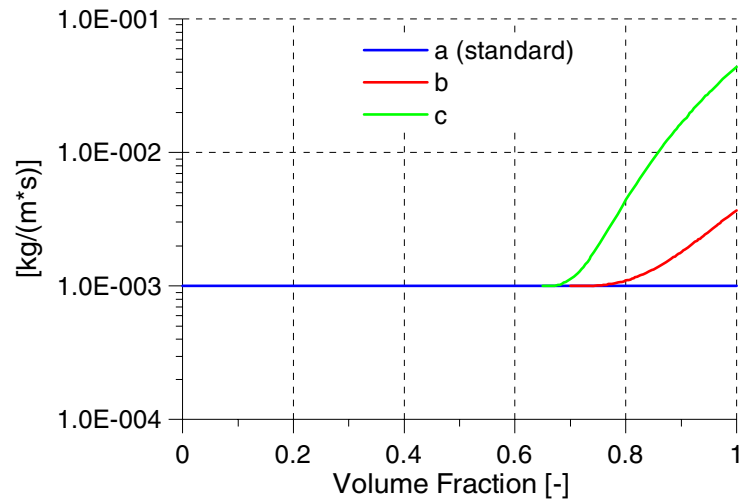
Institut für Sicherheitsforschung

04.04.2006

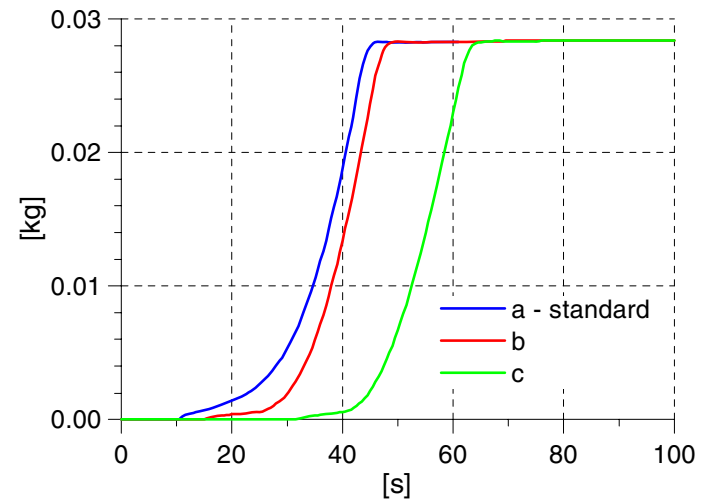
22

Partikelmasse zwischen den Wehren

Abhängigkeit der Viskosität
Vom Feststoff-Volumenanteil



Partikelmasse



Modellierung von Sieben

Modellansatz des porösen Körpers:

- Zeit- und richtungsabhängige Modellierung des Strömungswiderstandes

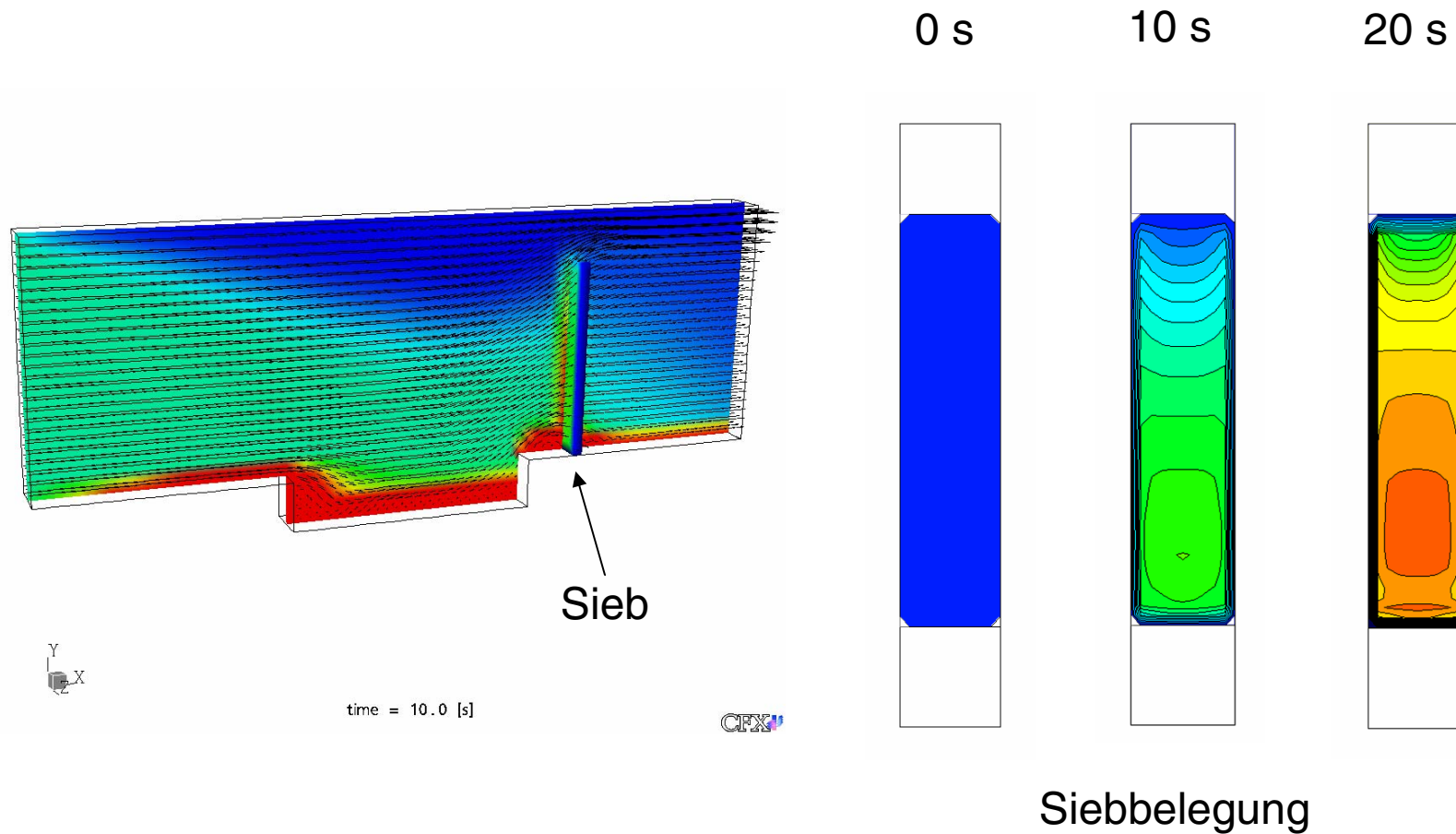
$$-\frac{\partial p}{\partial x_i} = K_{loss} \rho |U| U_i$$

- Vorgabe des Strömungswiderstandes über eine beliebig zu definierende Funktion möglich

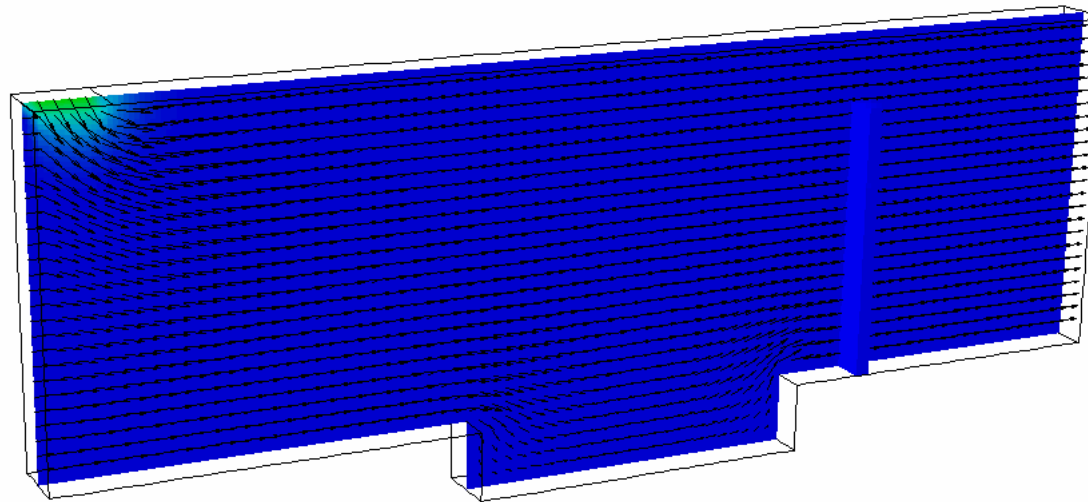
$$K_{loss}(y, z, t) = F\left(\int_0^t \dot{m}_{fibres}(y, z, t) dt\right)$$



Strömungswiderstand als Funktion des integralen Durchsatzes



Modellierung von Sieben - Machbarkeitsstudie



time = 0.1 [s]



Druckverlust an Rückhaltevorrichtungen

- Berücksichtigung viskoser (prop. μU) und trägheitsbedingter (prop. ρU^2) Beiträge:

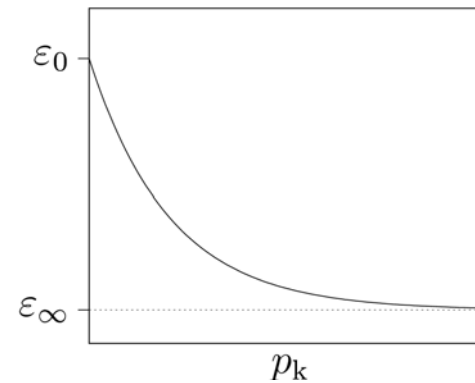
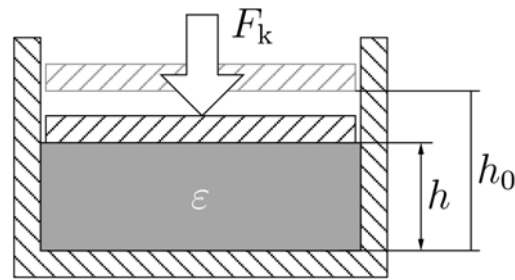
$$\frac{\Delta p}{\Delta L} = A\mu U + B\rho U^2$$

- Ergun (1952), modifiziert durch Davies (1952) für faserförmige Materialien:

$$\frac{dp}{dx} = a(A_S \rho_S)^2 (1 - \varepsilon)^{1.5} [1 + a_0 (1 - \varepsilon)^3] \mu U + b \frac{A_S (1 - \varepsilon)}{\varepsilon} \rho U^2$$

Kompressibilität der Faserpackung

- Porosität ε ; Kompaktierungsdruck p_{comp}

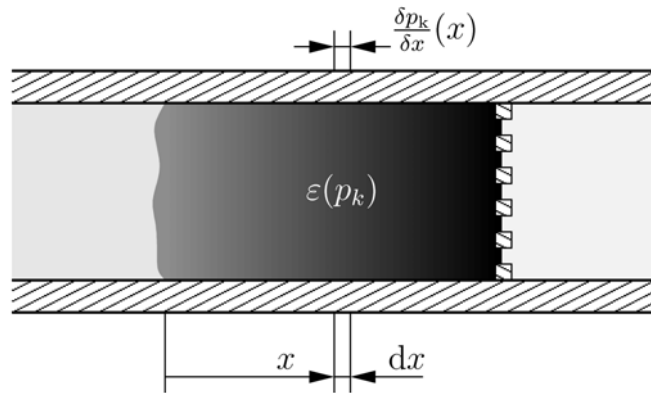


- Materialgleichung, 4 empirische Parameter

$$\varepsilon(p_{comp}) = \varepsilon_{\min} + (\varepsilon_0 - \varepsilon_{\min}) e^{-C p_{comp}^D}$$

Integration der Druckverlustgleichung

- p_{comp} veränderlich entlang Faserpackung



$$p_{\text{comp}}(x) = \int_0^x \frac{\partial p}{\partial \xi} d\xi$$

- Anfangswertproblem, numerische Integration in Strömungsrichtung

$$\frac{dp}{dx} = f(U, U^2, \varepsilon)$$

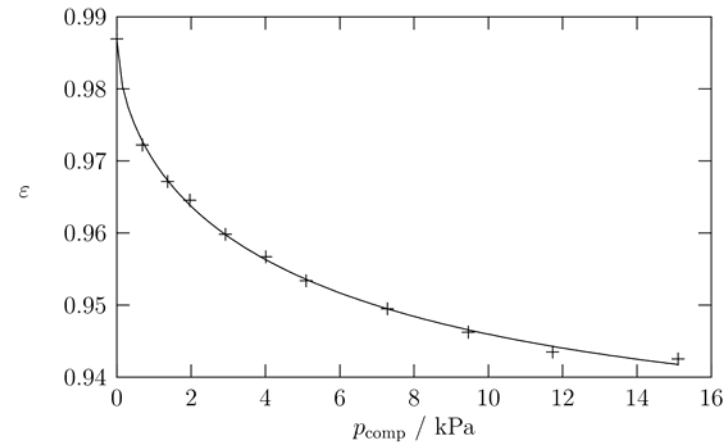
$$p(x=0) = 0$$

$$\varepsilon = f(p)$$

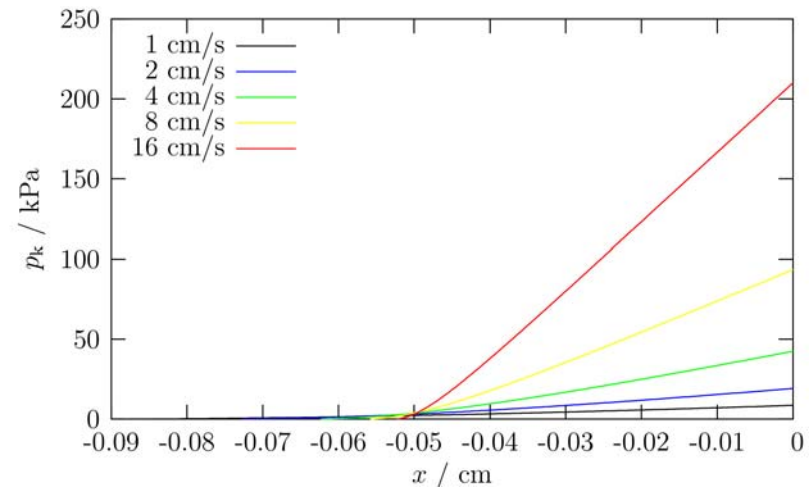
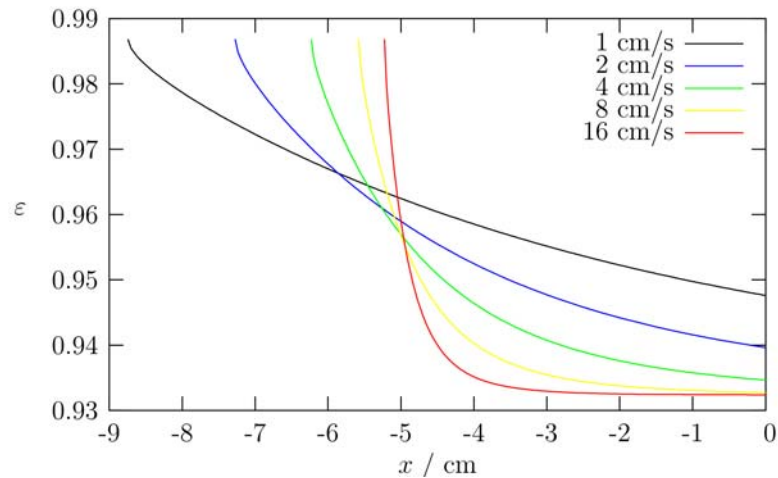
$$\varepsilon(x=0) = \varepsilon_0$$

1-D Druckverlustberechnungen

- Kompressibilitätsmessungen

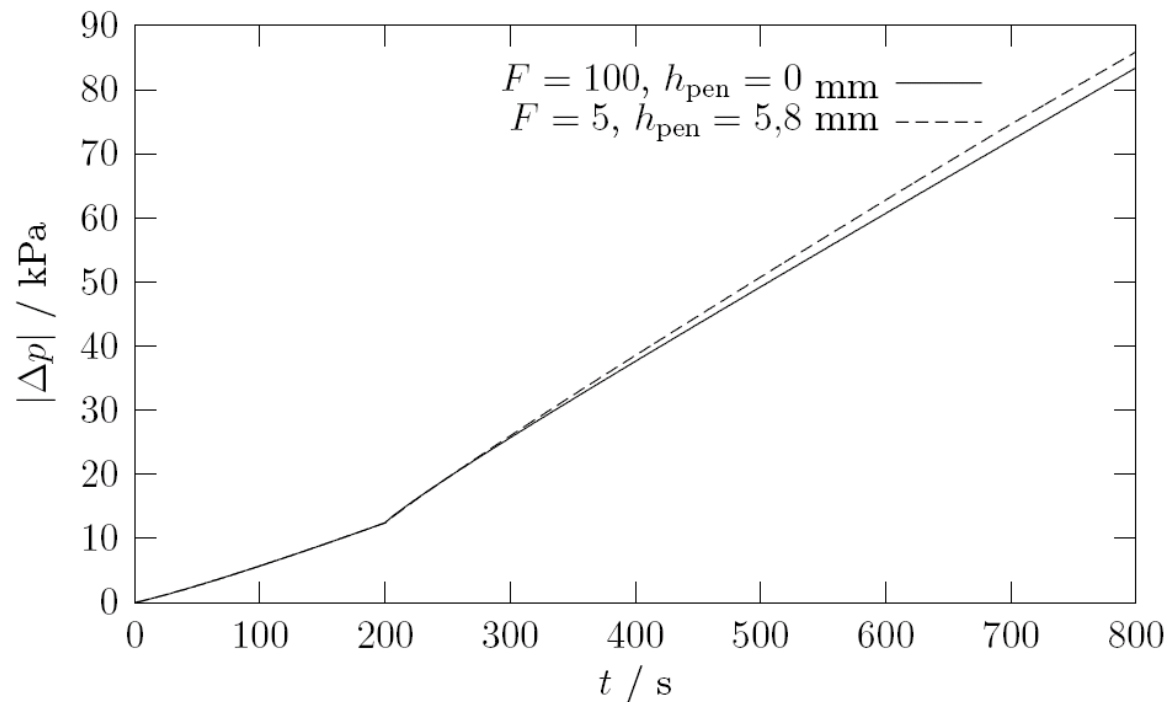


- Porositäts- und Druckprofile entlang der Faserpackung, Siebbeladung: 10 kg/m²



Dünnschichteffekt

- Ablagerung auf und/oder Eindringen von Feinpartikeln in die Faserpackung
- Abhängigkeit des Gesamtdruckverlusts von der Eindringtiefe h_{pen}
 - t < 200 s: Faserschichtbildung
 - t > 200 s: Dünnschichtbildung mit Partikeldurchmesser 50 μm



→ geringer Einfluss der Eindringtiefe

Versuchsstände in Zittau

Tank

- Einfluss eines Jets auf das Flüssigkeits-Strömungsfeld im Tank
 - Einphasig: Eintauchen des Zuspiesungsrohres kurz unter die Wasseroberfläche
 - Zweiphasig: Jet oberhalb der Wasseroberfläche, Mitriss von Luftblasen



Eintauchen eines Wasserstrahls in eine Wasservorlage

- Fragestellung:
 - Wie wird der auf der Wasseroberfläche auftreffende Impuls im Volumen übertragen?
 - Ist ein Wasserstrahl in der Lage, am Boden liegende Partikel zu mobilisieren?
- Problem:
 - Es gibt bisher kein befriedigendes Modell für den Blasenmitriss



Vorgehenskonzept

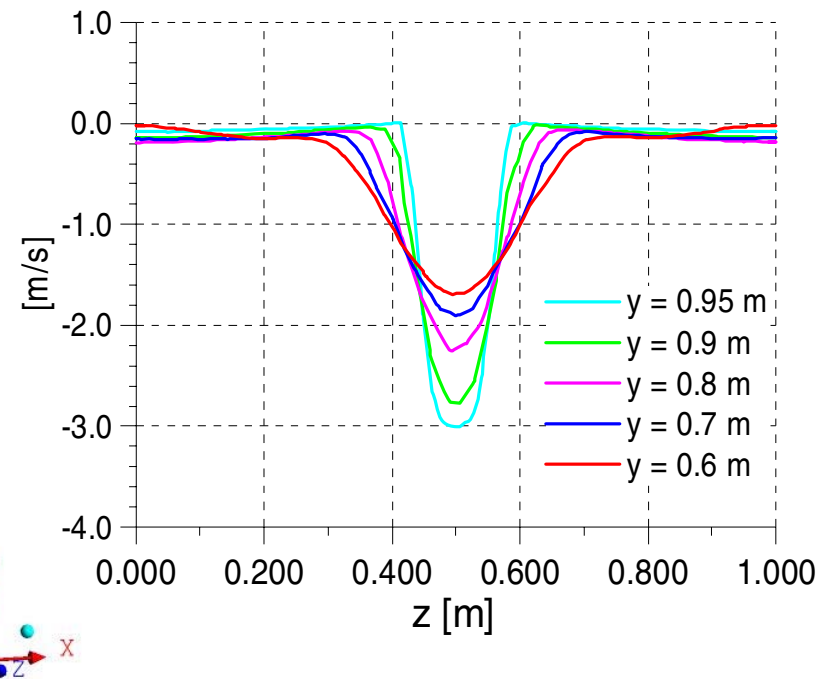
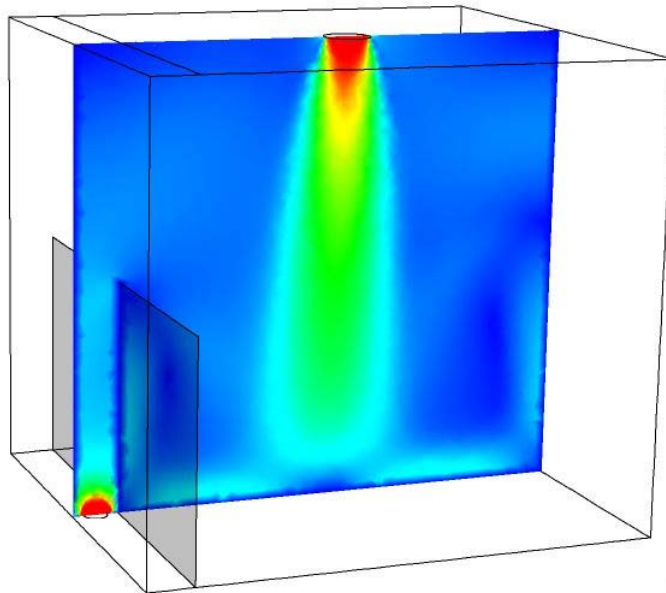
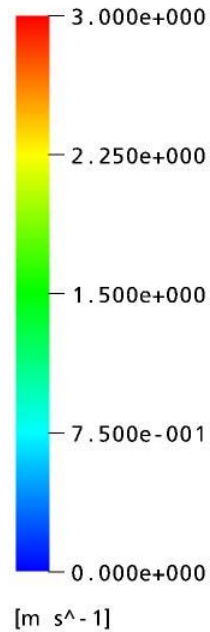
- Experimente:
 1. Zuspeisungsrohr taucht unter die Wasseroberfläche
 - Zuspeisung einphasig
 2. Zuspeisungsrohr über der Wasseroberfläche
 - Mitriss von Blasen
- Rechnungen
 1. Einphasig
 2. Zweiphasig bei vorgegebenem Blasenmitriss
 - Berücksichtigung von Blasenkräften
 - Wie wirkt sich das auf die Impulsübertragung aus?



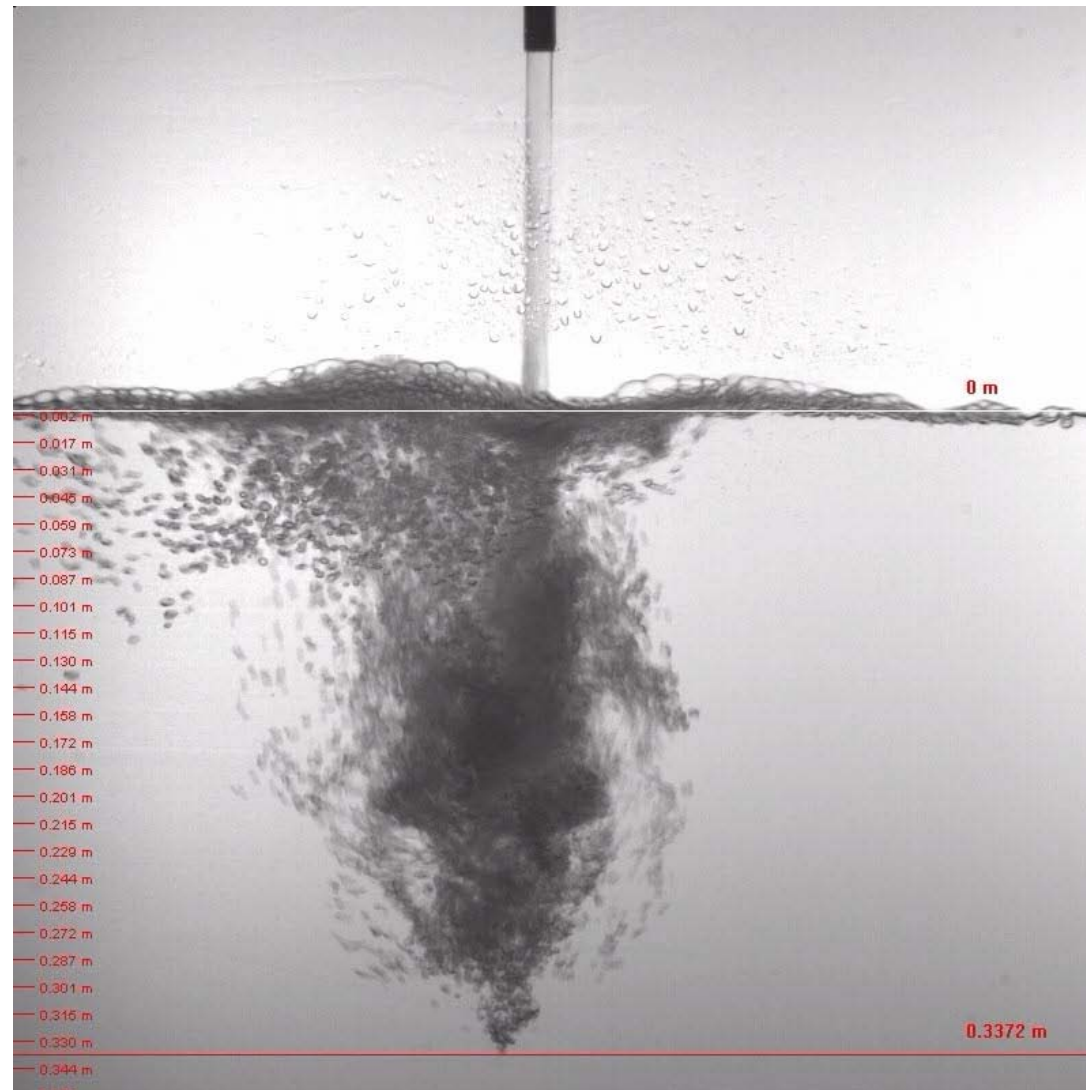
Einphasige Simulation

CFX

Velocity
(Plane 1)

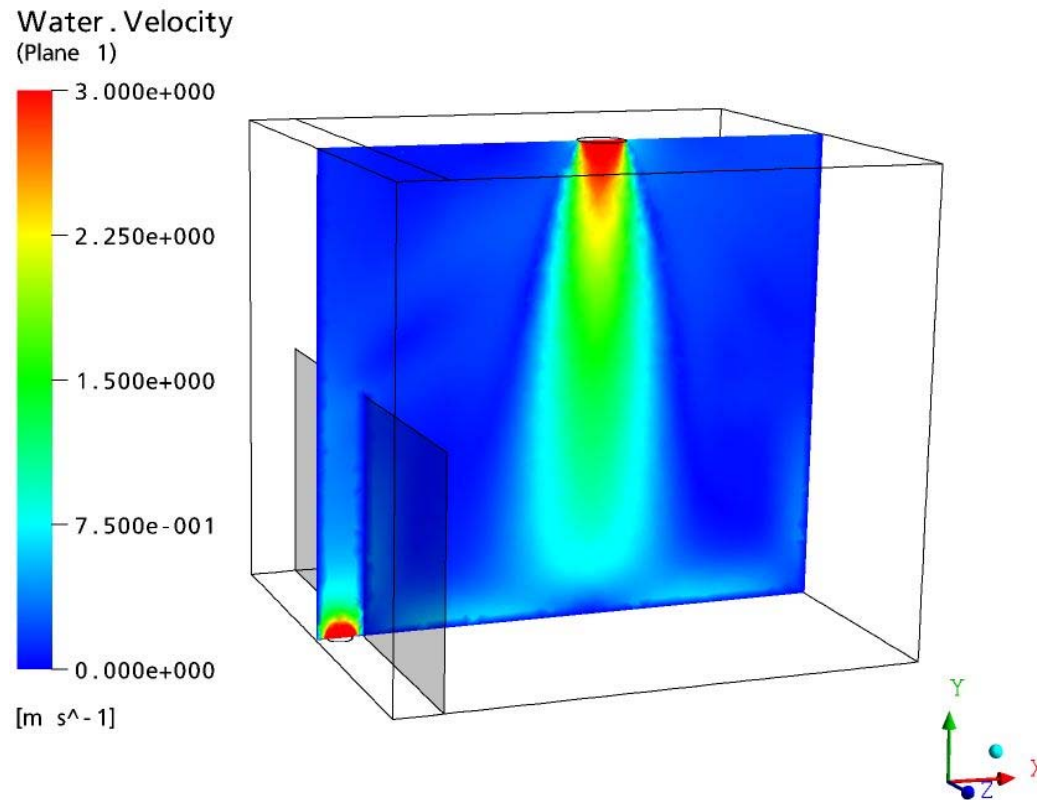


Blaseneintrag



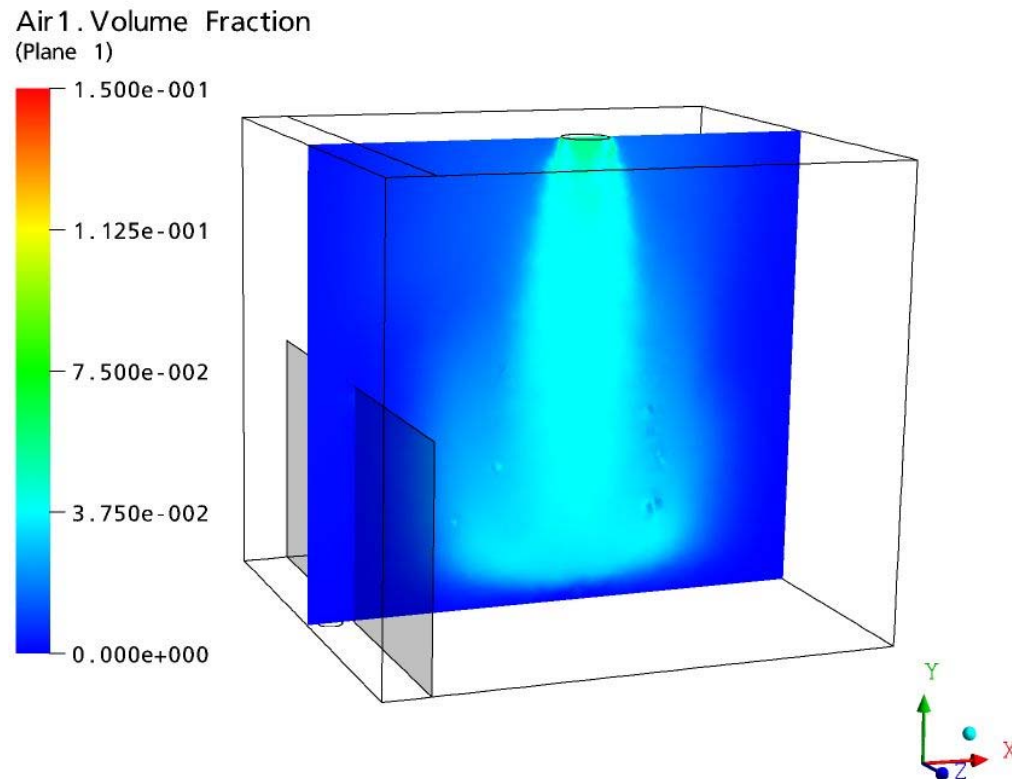
Zweiphasige Simulation

CFX



Verteilung des eingetragenen Gases

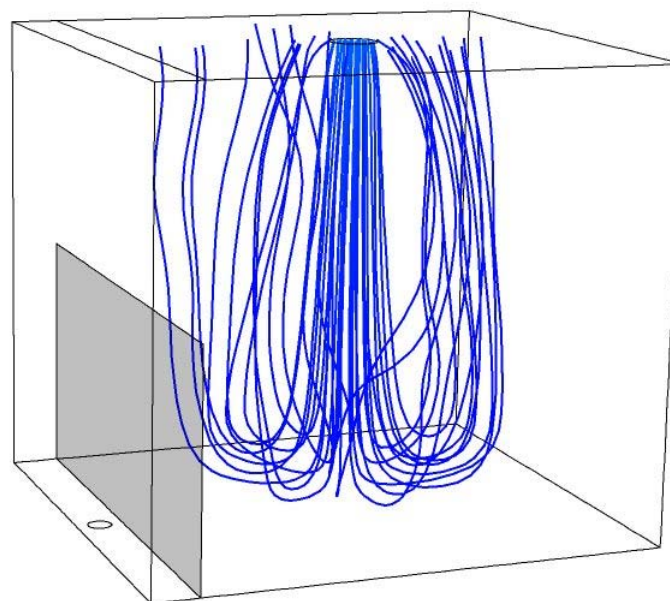
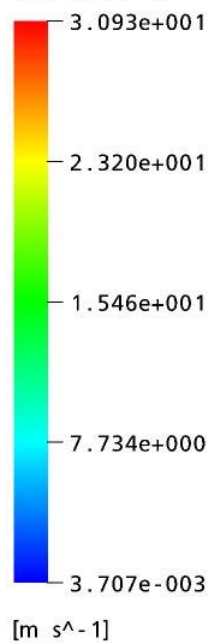
CFX



Luft-Stromlinien

CFX

Air1 . Velocity
(Streamline 1)

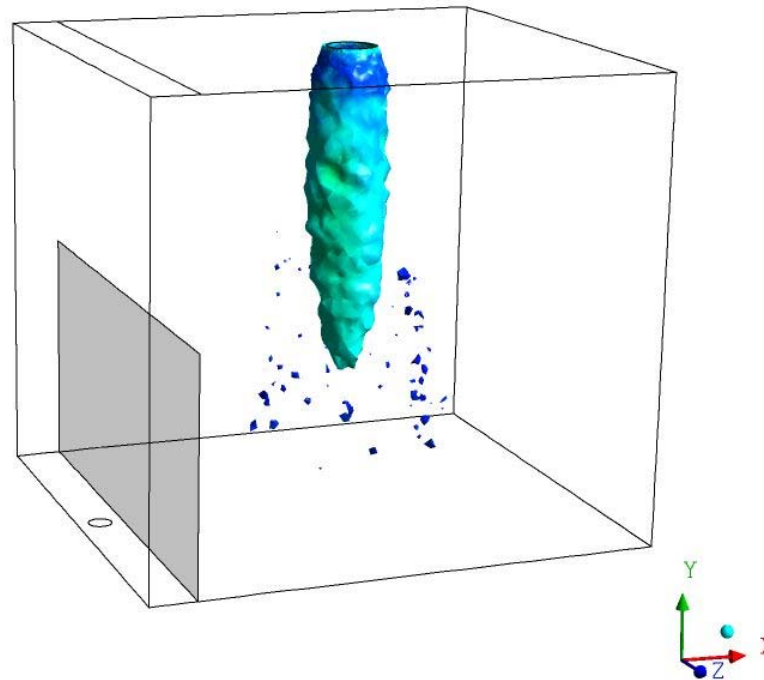


Blaseneindringtiefe?

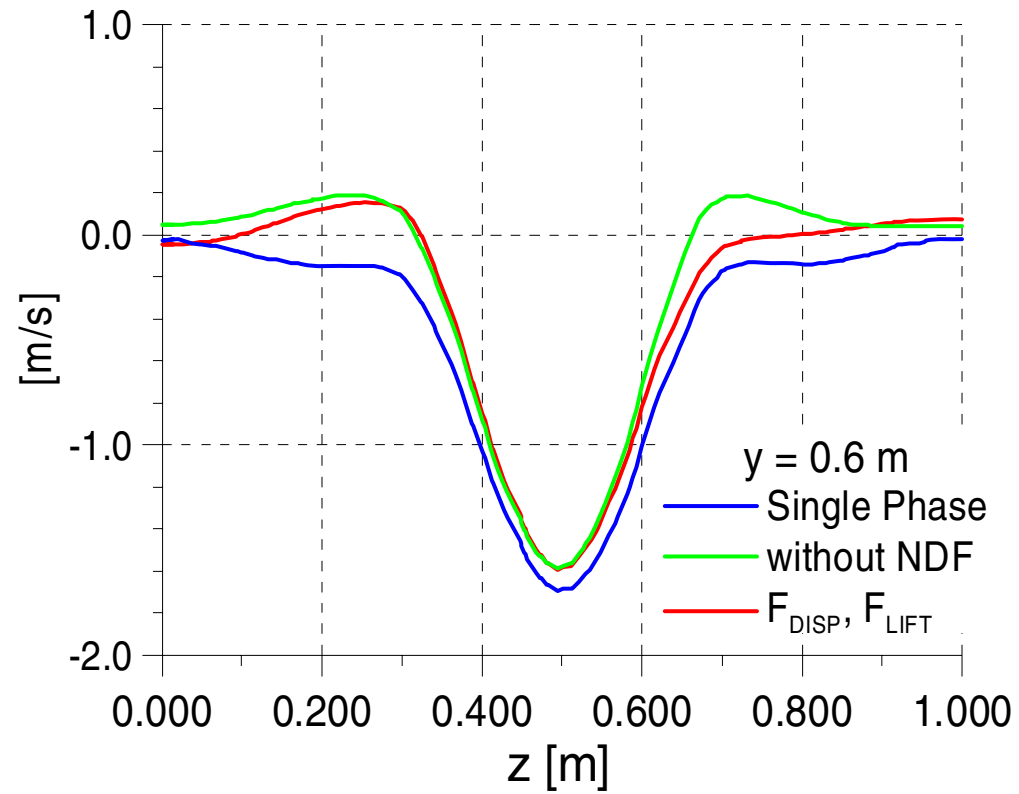
VF = 0.035

CFX

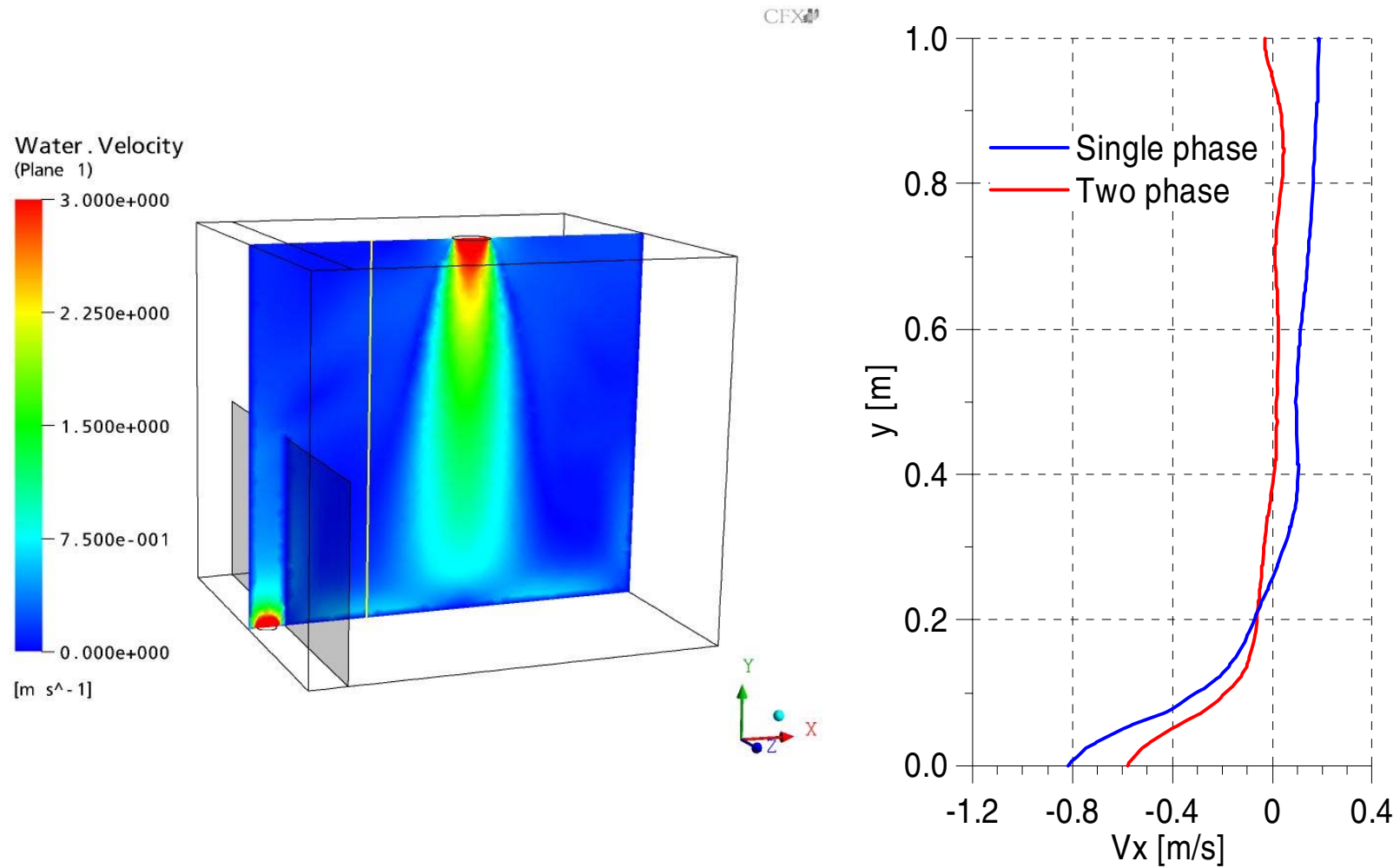
Air1 . Velocity
(Isosurface 1)
3.000e+000
2.250e+000
1.500e+000
7.500e-001
0.000e+000
[m s⁻¹]



Profile



Profile



Offene Probleme

- Transport:
 - Berücksichtigung der Partikelstreuung in Größe und Strömungseigenschaften
- Sedimentation und Re-Suspension
 - Verbesserung der Anpassung an die Messungen
 - Berücksichtigung des Einflusses der Partikelzusammensetzung auf das Sedimentationsverhalten
- Untersuchung von Jets



CFD-Analysen zur Kühlmittelvermischung in DWR

Tobias Höhne, Sören Kliem, Ulrich Rohde, Frank-Peter Weiß,
Forschungszentrum Rossendorf e. V., Dresden

Volker Noack, RWE Power AG, Essen

CFD-Analysen zur Kühlmittelvermischung in DWR

T. Höhne, S. Kliem, U. Rohde, F.P. Weiß

Auftriebsgetriebene Strömungen in Druckwasserreaktoren stellen sich in einer Vielzahl von sicherheitsrelevanten Szenarien, insbesondere unter Naturumlaufbedingungen z.B. nach einem postulierten Leckstörfall bzw. bei "Pressurized Thermal Shock (PTS)" Szenarien, wie der Einspeisung von kaltem Notkühlwasser in die noch heißen Loops, ein. Bei der Untersuchung dieser Klasse von Strömungen mit numerischen Tools zeigte es sich, dass vor allem die vorhandenen Turbulenz- und Zweiphasenmodelle noch weiterzuentwickeln sind. Die umfangreichen Messdaten der Versuchsanlage ROCOM bieten eine Grundlage für die Validierung von CFD-Codes. Zur Bewertung der Güte der Modelle wurden quantitative Vergleiche zwischen Rechnung und Messung durchgeführt.

Im ersten Teil des Vortrages erfolgt eine Vorstellung von Nachrechnungen dichtegetriebener Experimente an der ROCOM-Versuchsanlage. Im zweiten Teil wird näher auf Simulationen eines Auffüllvorganges eines Notkühlbehälters mit deborierten Kühlmittel eingegangen.

Hierbei werden Fortschritte in der CFD-Modellierung der letzten Jahre, der Einbezug von sogenannten Best Practice Guidelines in der CFD-Modellierung in der Reaktorsicherheitsforschung aber auch bestehender Forschungsbedarf und Grenzen der Modellierung dargestellt.

CFD-Analysen zur Kühlmittelvermischung in DWR

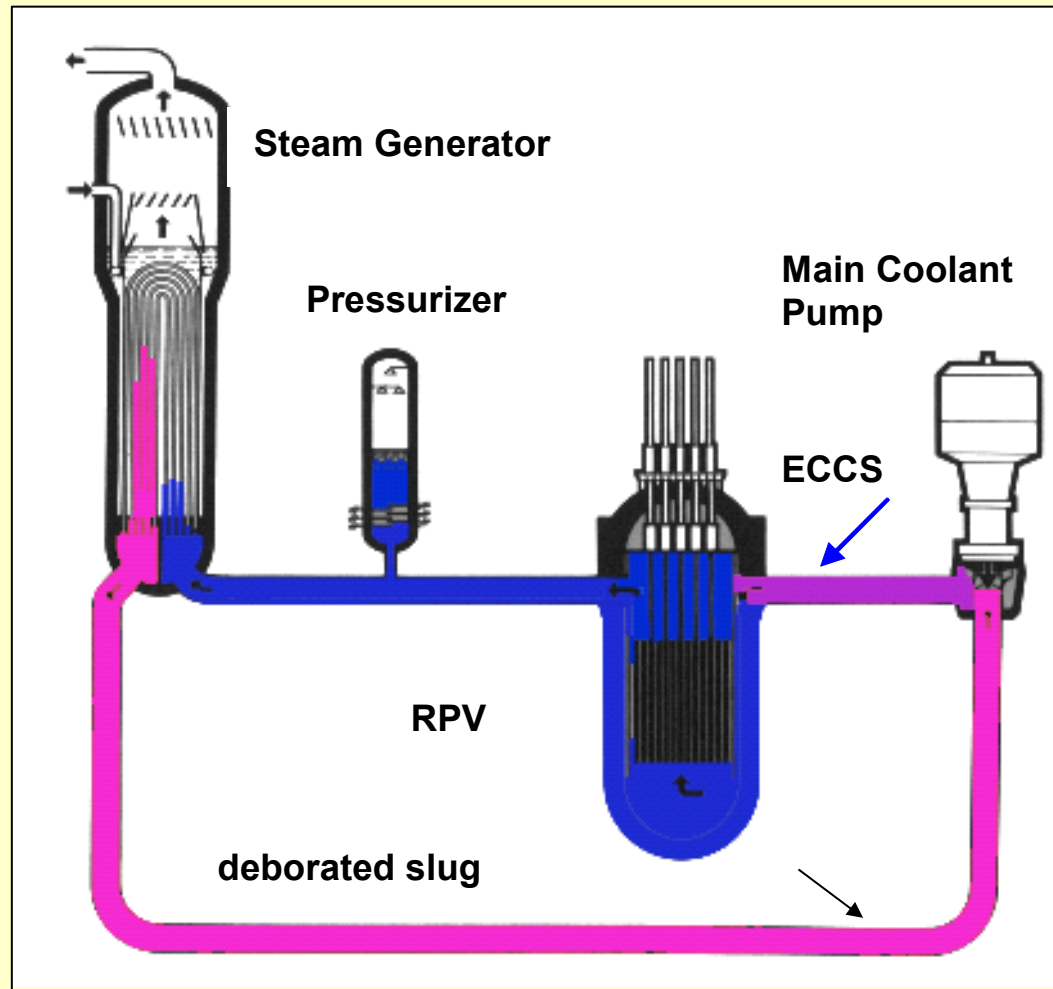
T. Höhne, S. Kliem, U. Rohde, F.-P. Weiß (FZR)
V. Noack (RWE)

Fachtagung der KTG-Fachgruppen "Sicherheit kerntechnischer Anlagen,"
„Thermo- und Fluidodynamik“ und "Betrieb von kerntechnischen Anlagen"

3. – 4. April 2006, FZR, Dresden

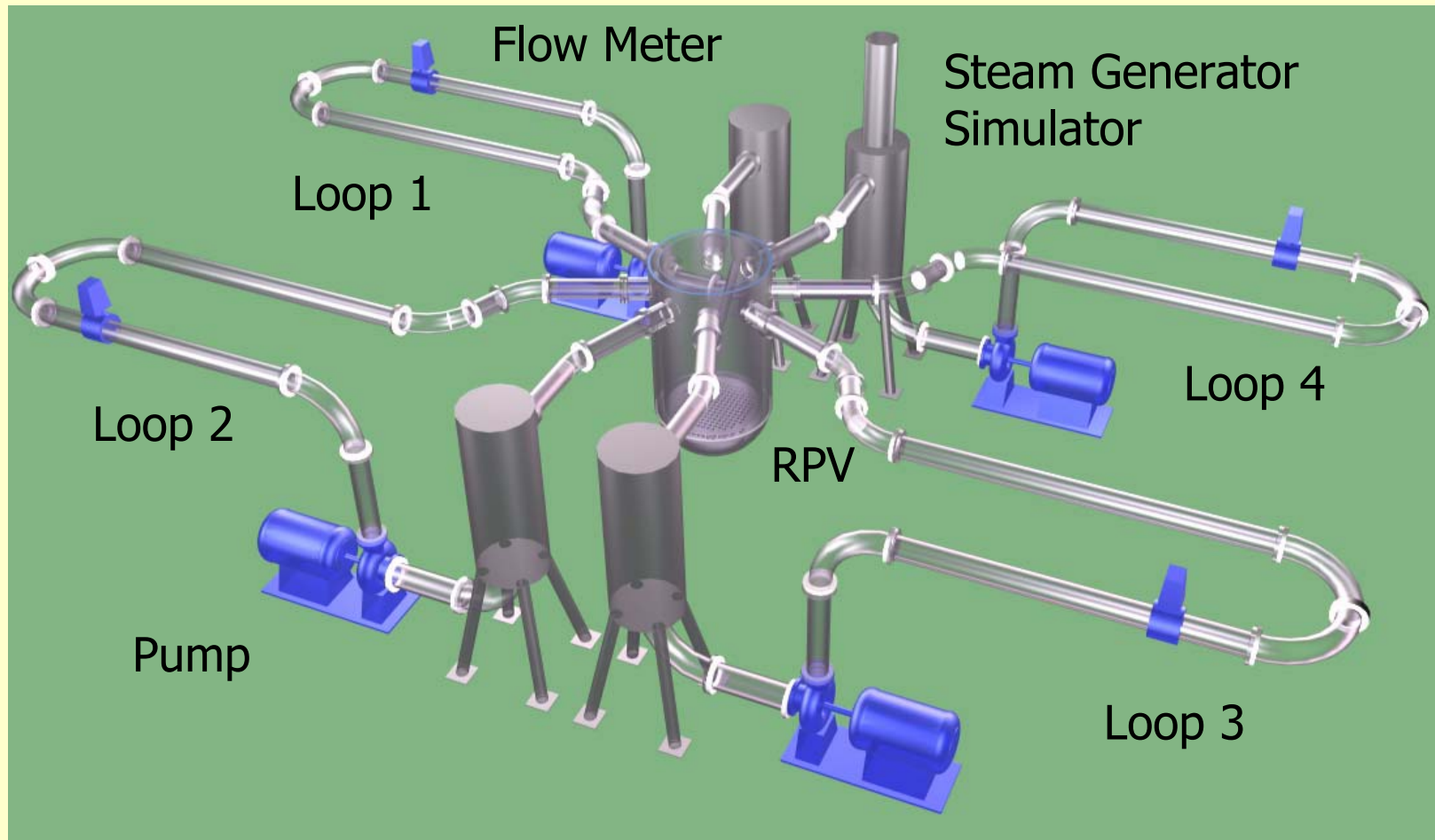


Motivation



Scheme of the primary circuit

ROCOM: Rossendorf Coolant Mixing Test Facility



Selected Test Cases

❑ Density Driven Experiments- Part I: PTS experiments

- ❑ Flow rate in the range of natural circulation (1 loop operating with constant mass flow, 3 idle loops backflow)
- ❑ Density difference mixture between coolant and ECC water in the range from 0 ... 10 % (modeled with **glucose** water = **higher density**), tracer injection at the ECC injection line

❑ Density Driven Experiments- Part II: BDT experiments

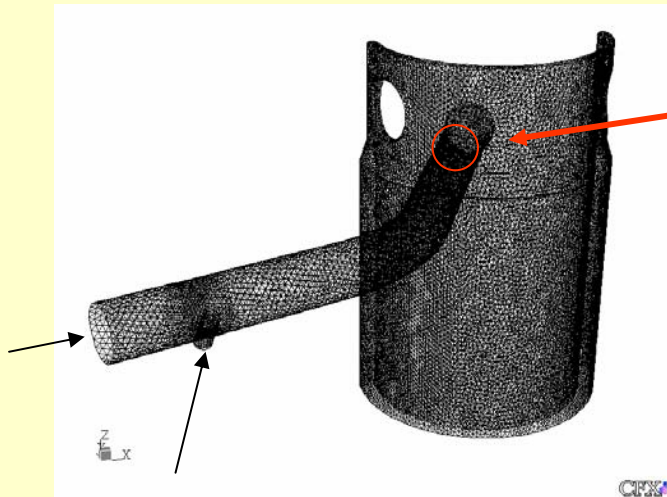
- ❑ Flow rate in the range of natural circulation (2 loops operating, start-up of coolant circulation in 2 loops)
- ❑ Density difference mixture between condensate and ambient coolant in the range from 0 ... 2 % (modeled with **ethyl alcohol** water = **lower density**), tracer between 2 valves in 2 cold legs

❑ Modeling of flooding a safety tank

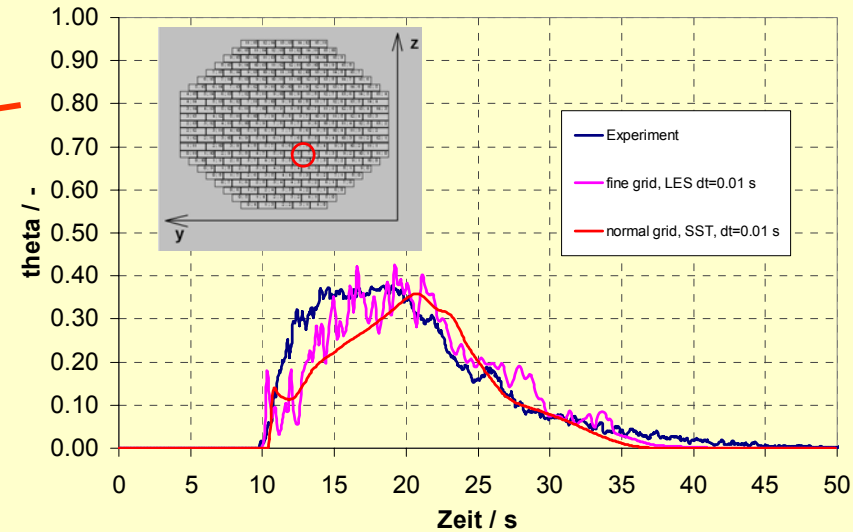
- ❑ Injection of unborated water into a safety tank with borated water



Example of using the BPG*



Simplified grid model

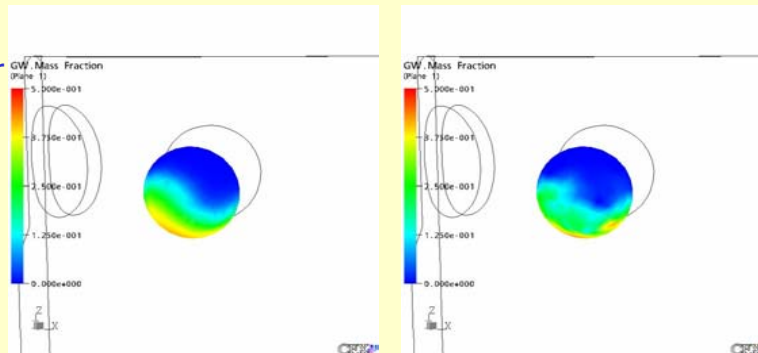


Mixing scalar at the reactor inlet

Fine grid, SST

Fine grid LES Smagorinsky

Inlet
Sensor
11s



Mesh: fine 300000, normal 120000

Time Step: 0.1s, 0.01s

Turbulence Models: SST, RNG
k- ϵ , LES, BSL

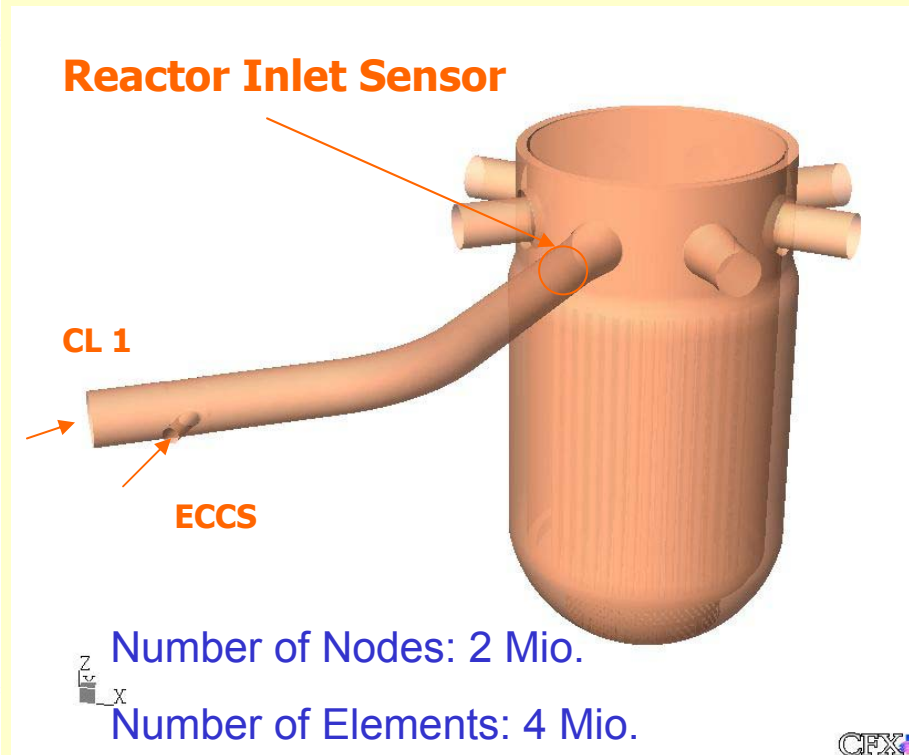
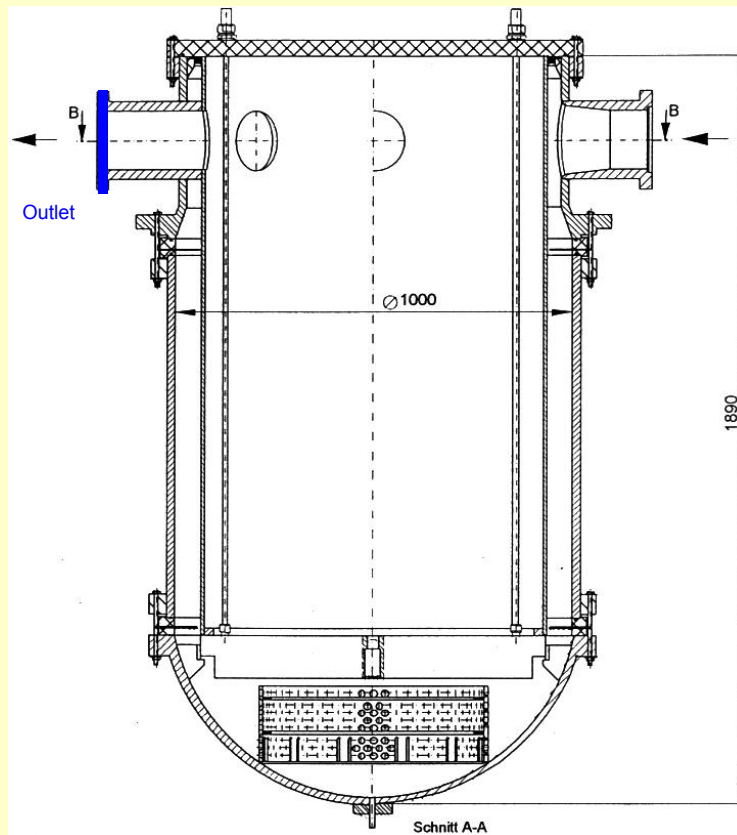
*CFD Best Practice Guidelines for CFD Code Validation for Reactor-Safety Applications (2002), Menter, ECORA



Density Driven Experiments- Part I: PTS experiment

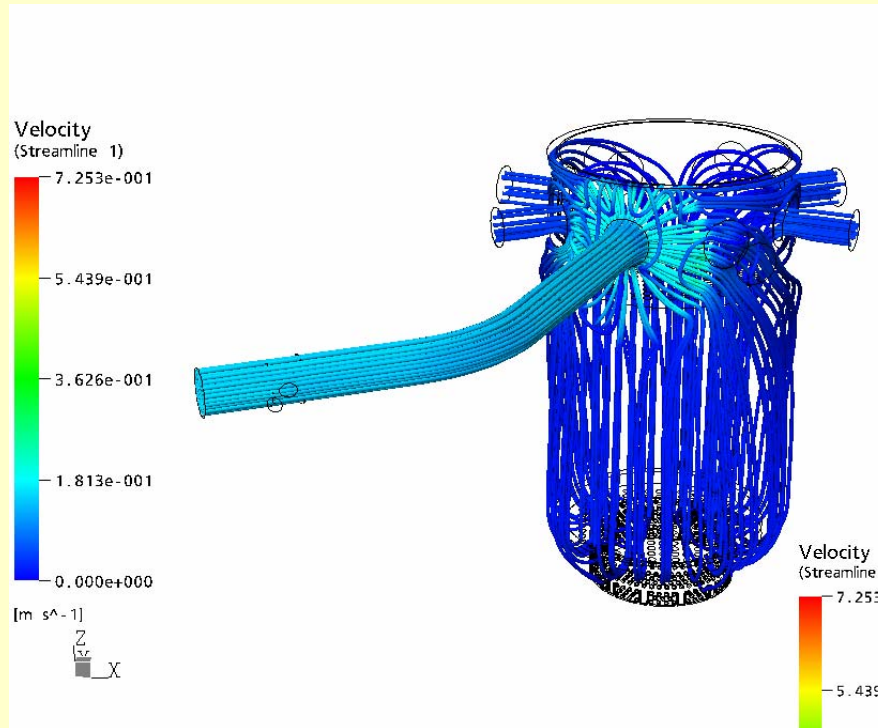


The Grid



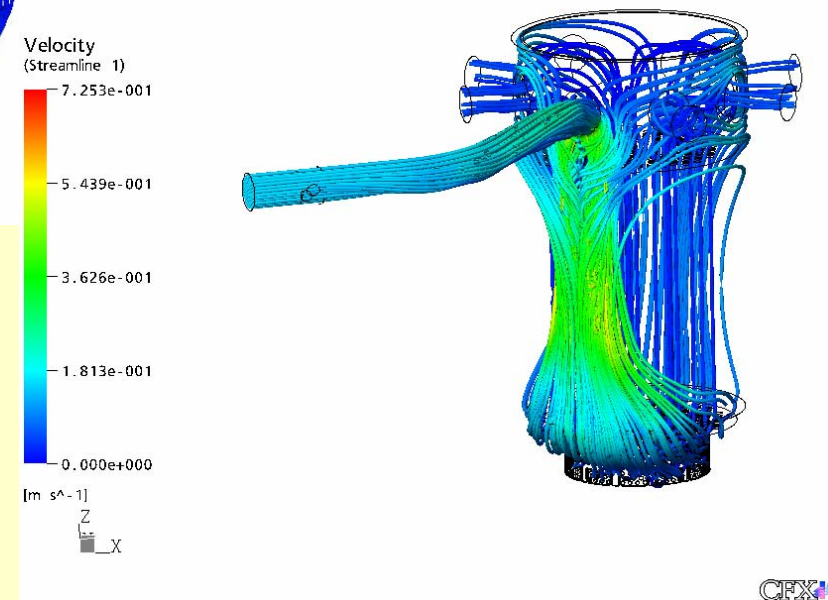
- One cold leg part including the ECC injection line for simulating the stratified flow; Inlet BC at the cold leg 1-4 and at the ECC injection line
- Outlet BC Outlet Nozzles, hybrid grid based on IGES-CAD-File (generated with ICEM-CFD), mesh refinement at the ECCS injection line

Qualitative Results



Streamlines representing the flow field 4 s after start of simulation

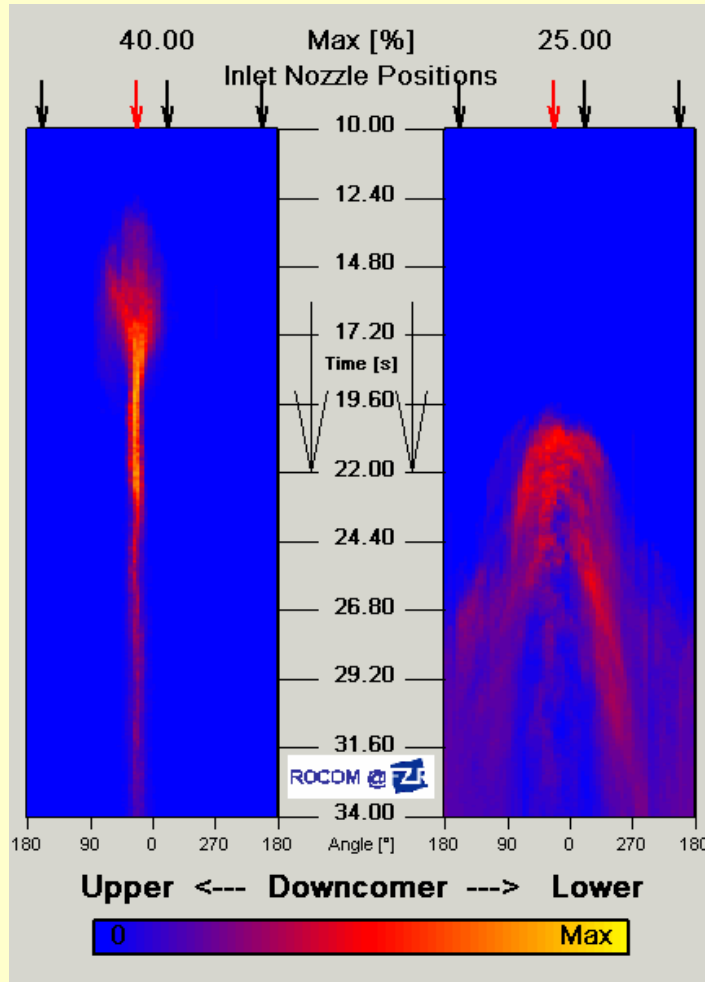
Streamlines at 23 s



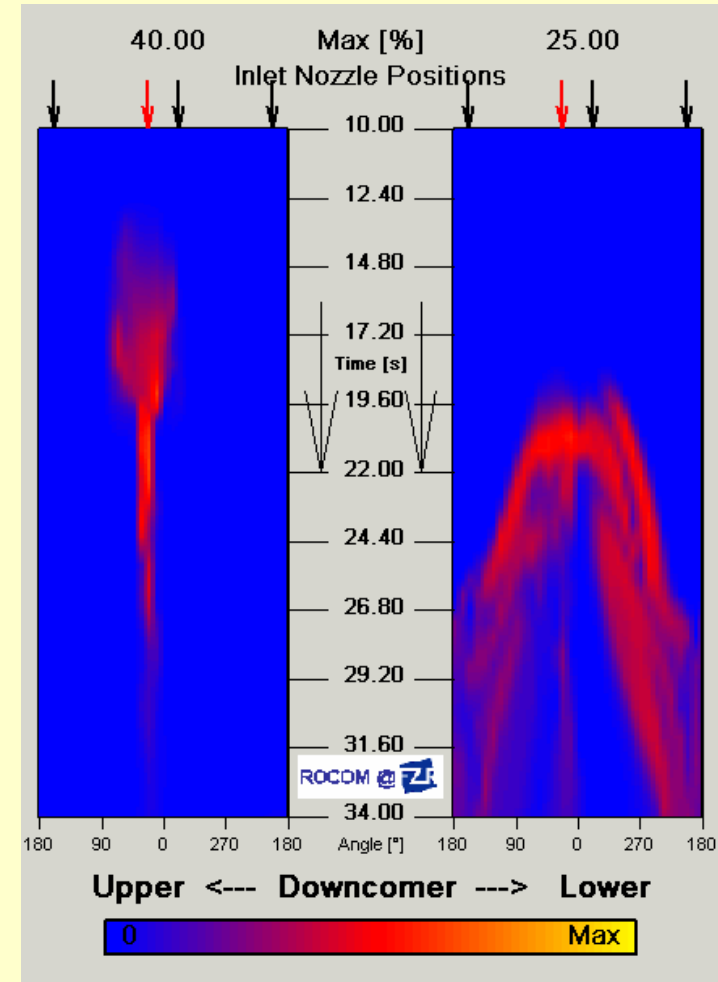
Momentum driven flow field is present, after: the density difference partly suppresses the propagation of the ECC water in circumferential direction

Qualitative Results

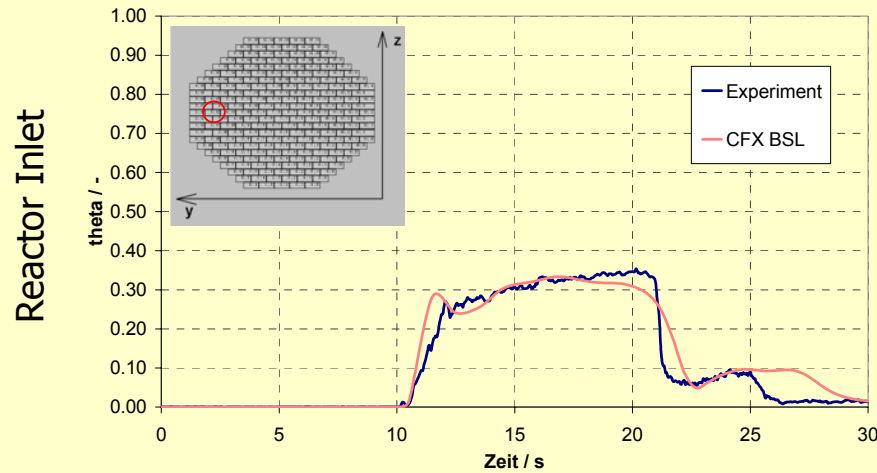
Experiment



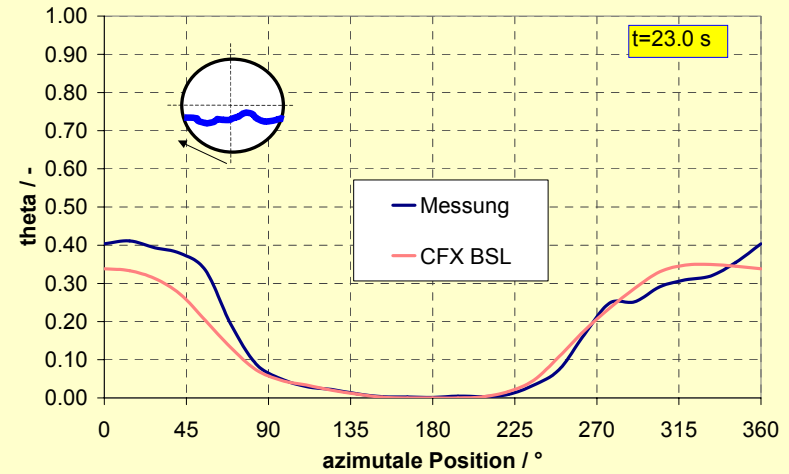
CFX



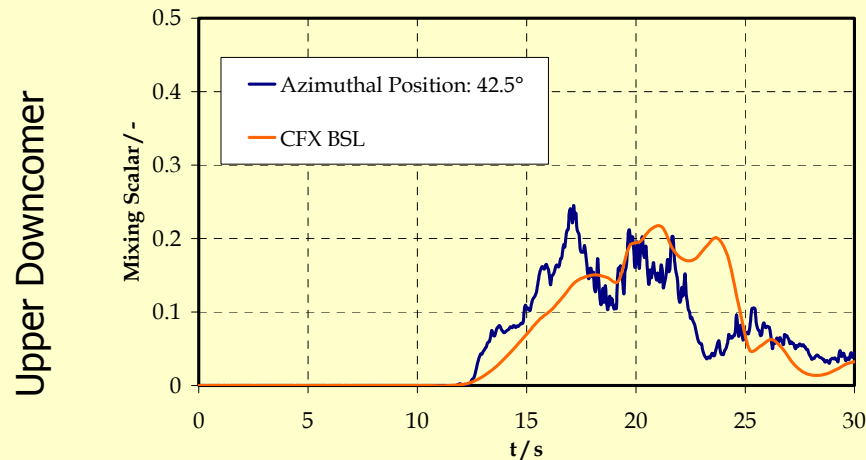
Quantitative Results



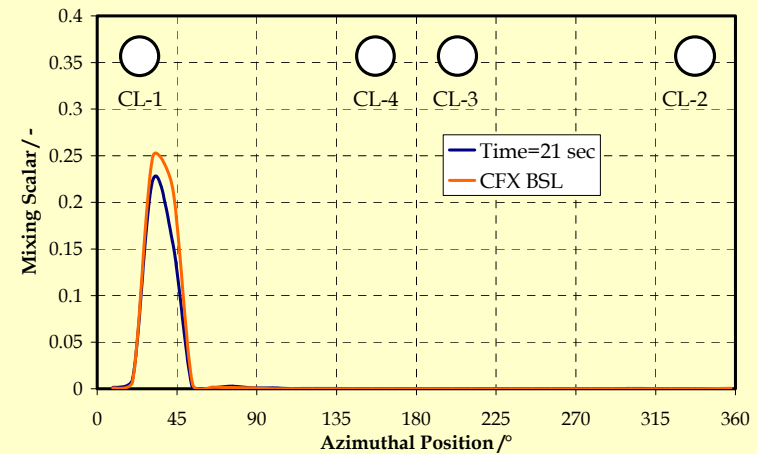
Local $\Theta_{x,y}(t)$ Pos. 3:17



Θ_{φ} at 23 s



Local $\Theta_{x,y}(t)$ (42.5°)



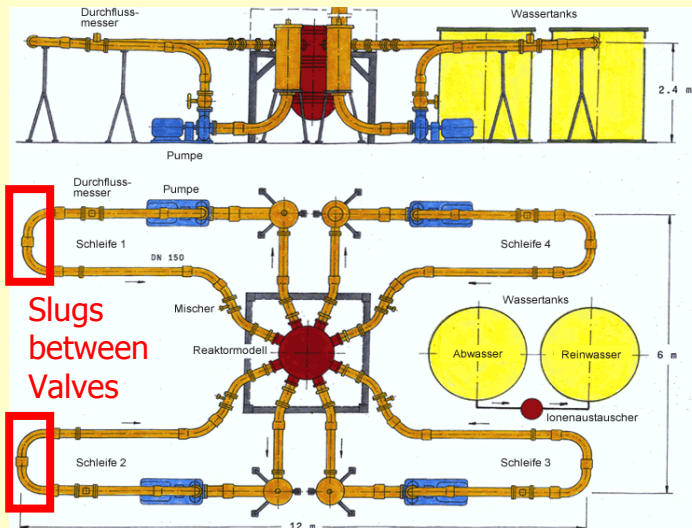
Θ_{φ} at 21 s

Density Driven Experiments- Part II: BDT experiment

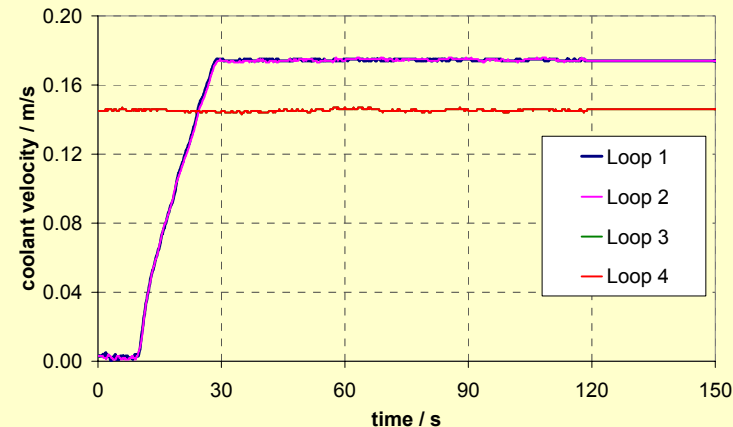


BDT Experiment¹

- the loops 3 and 4 are operated with 5% of the nominal flow rate (9.25 m³/h),
- slugs of water with a 2% lower density are introduced in the bends between the valves in loop 1 and 2 (the density decrease is achieved by mixing water with alcohol) and
- the flow rate in loop 1 and 2 is increased from 0 to 6% of the nominal flow in 18 s



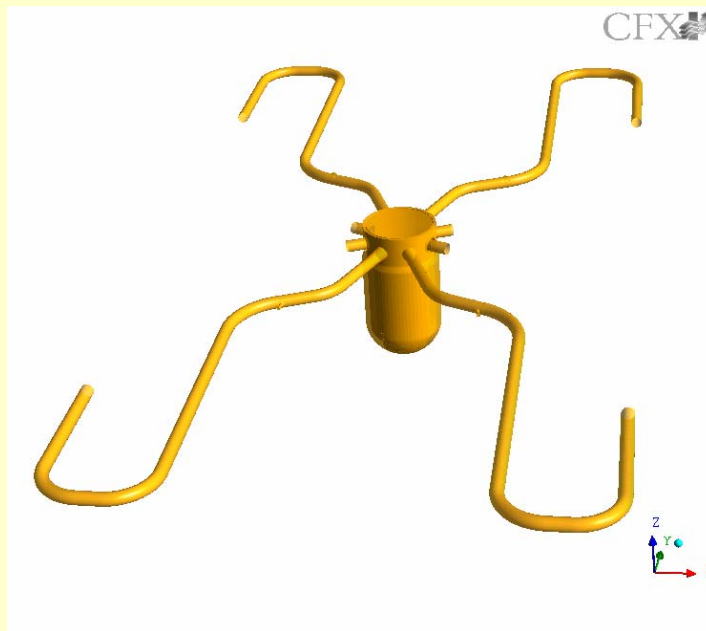
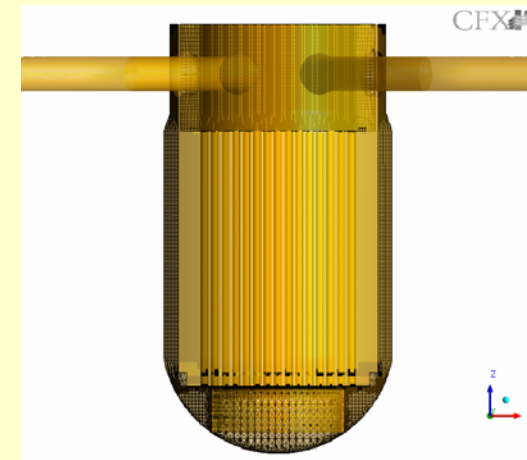
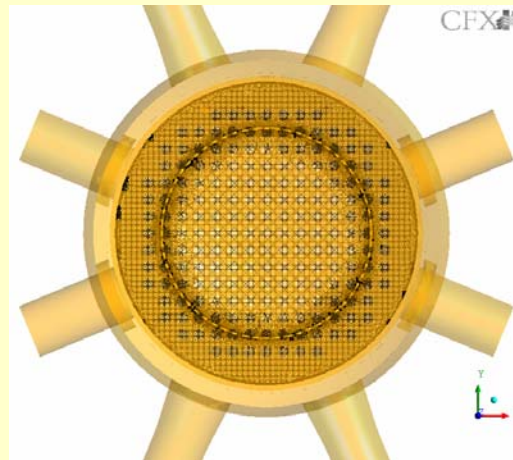
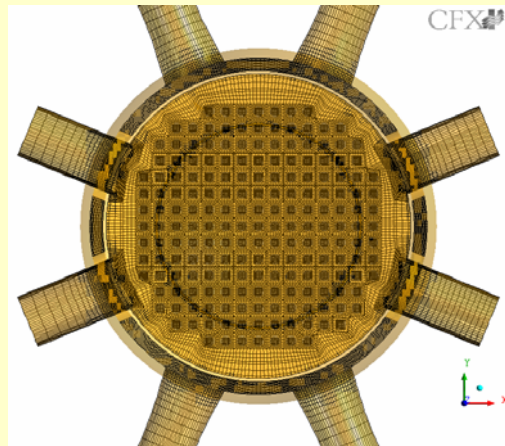
Scheme of the test facility ROCOM



Coolant velocity, loops 1-4

¹Pointner, W. and Wohlstein, R. Initiating events and scenarios of boron dilution transients (in German). *Annual meeting on Nuclear Technology 2003.*; *Proc. Of the Topical session: Experimental and theoretical investigations on boron dilution transients in PWRs.* pp. 5-22. 2003

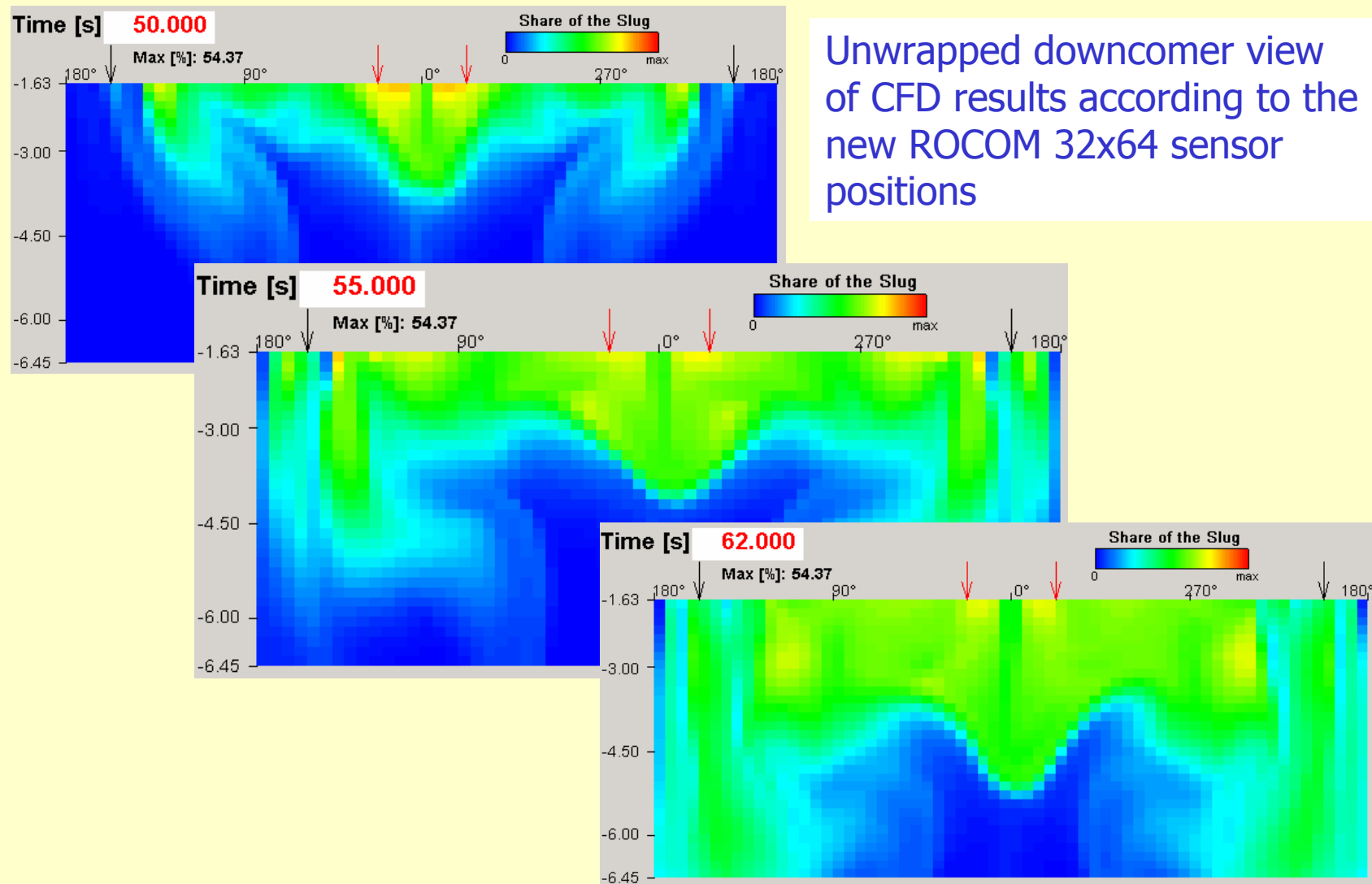
Grid (ICEM-CFD)



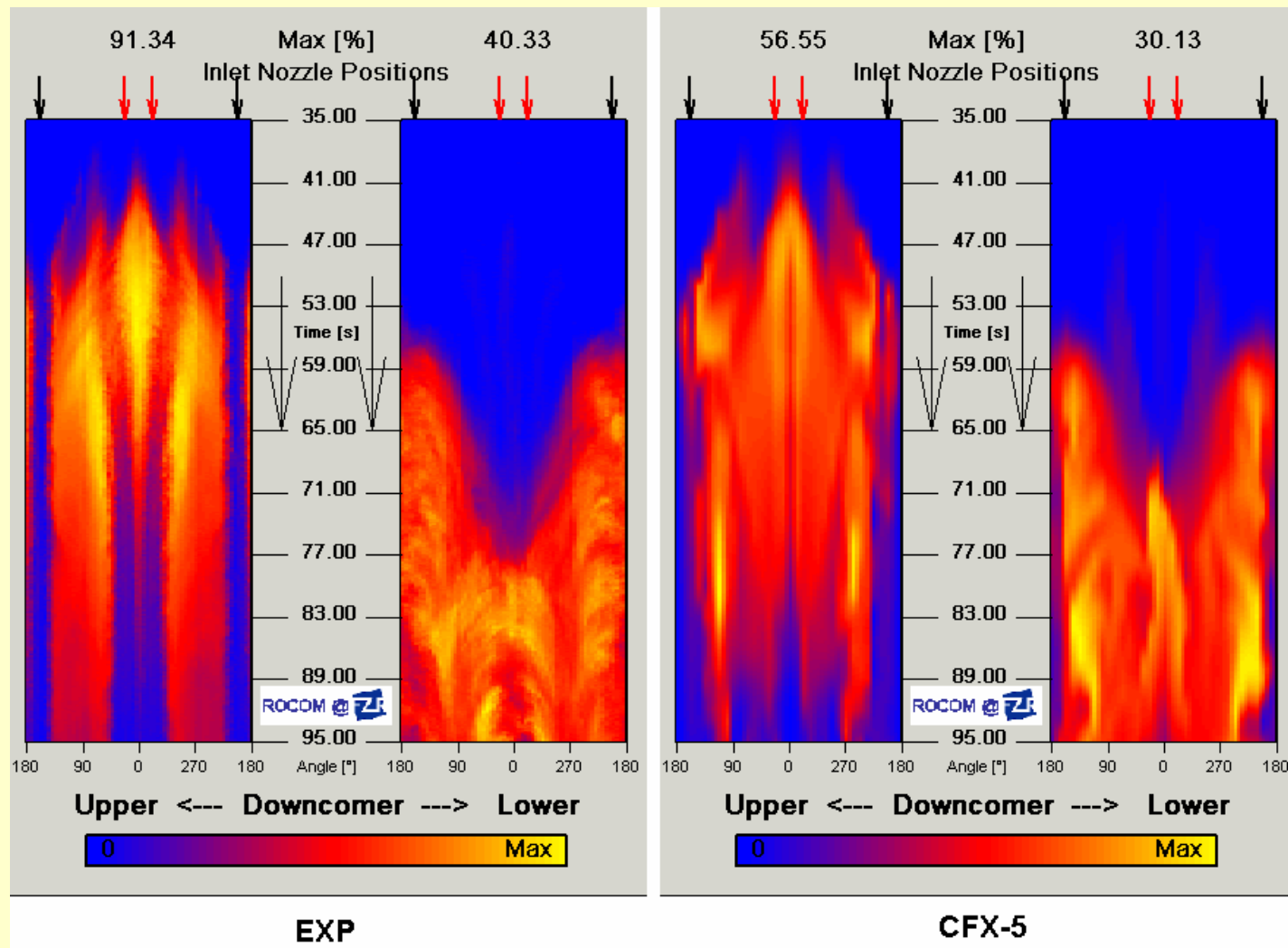
- ❑ Mesh: 3.6 million nodes and 6.5 million hybrid elements
- ❑ Combination of Hexahedral and Tetrahedral cells, mesh refinement at the perforated drum, in the lower support plate and at the wall regions of the cold legs



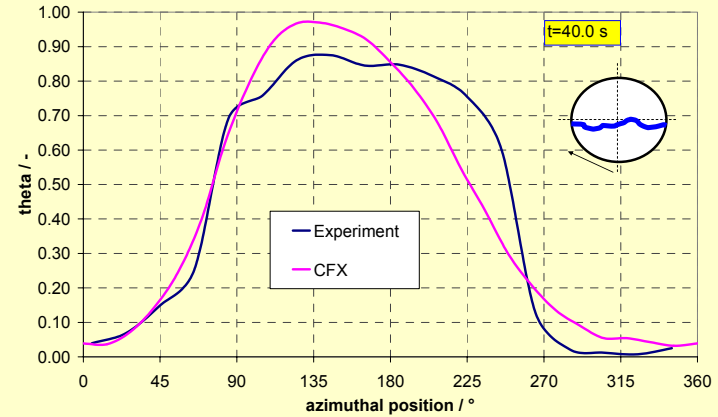
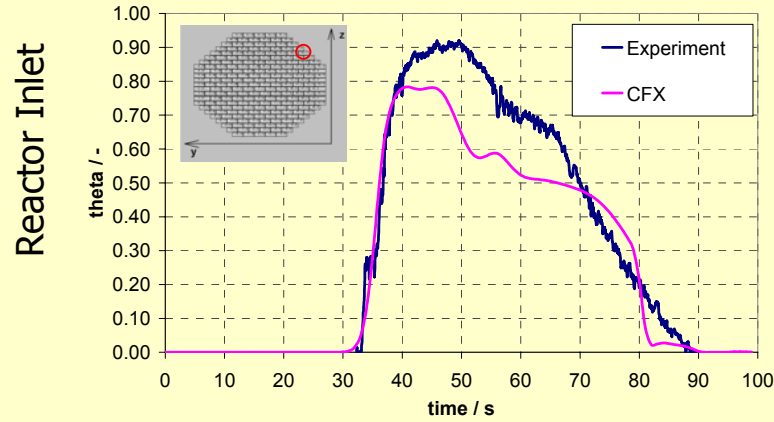
Qualitative Results - Downcomer



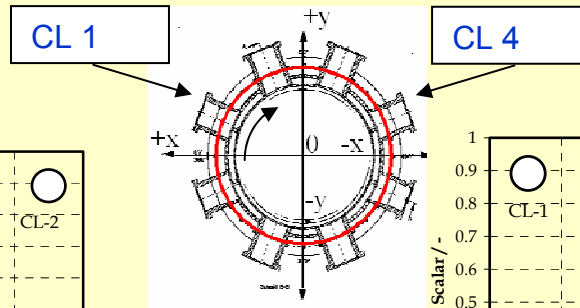
Qualitative Results – Agreement in Downcomer



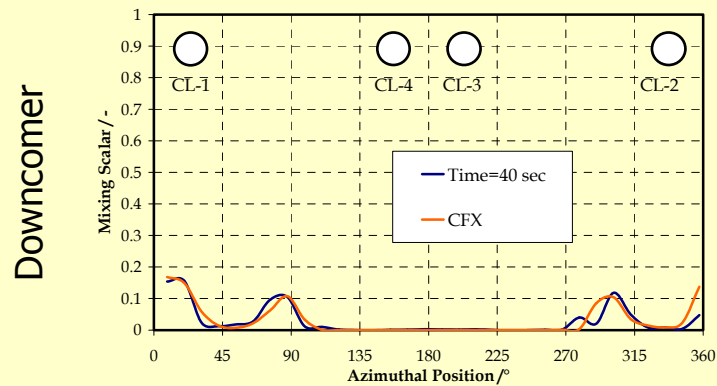
Quantitative Results



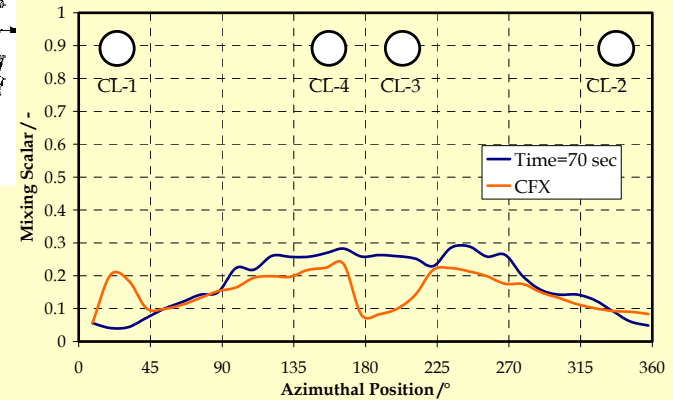
Local $\Theta_{x,y}(t)$ (42.5°)



Θ_{ϕ} at 40 s



Θ_{ϕ} at 40 s



Θ_{ϕ} at 70 s

Cooperation and Knowledge transfer

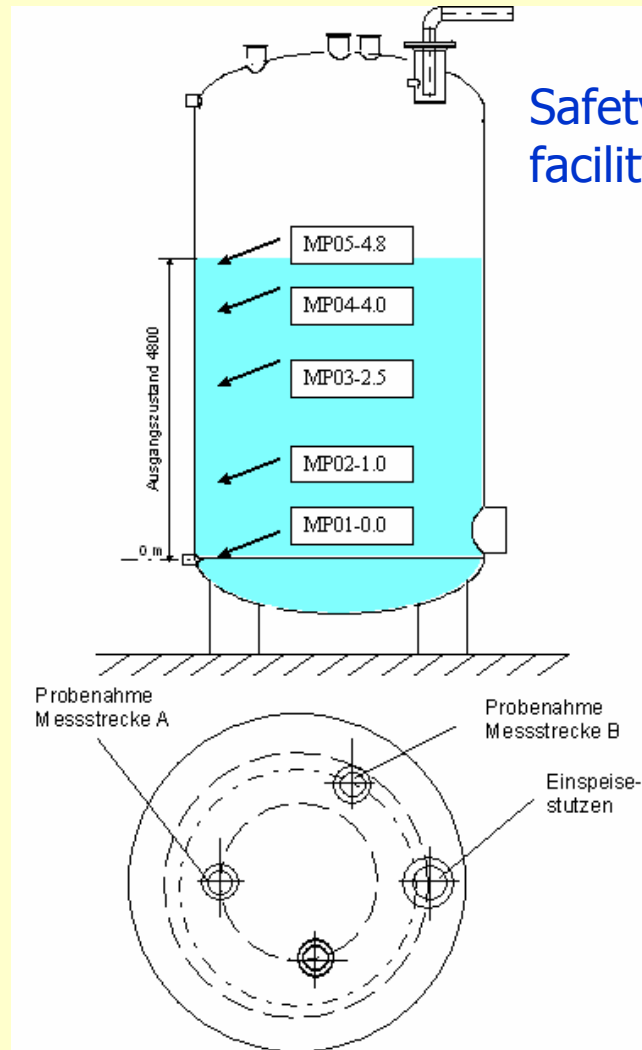
- GRS Garching
- TÜV Nord Hamburg
- NRG Petten, Holland
- CEA Grenoble, France
- ANSYS CFX Inc.
- Uni Pisa, Italy



Numerical modeling of flooding a safety tank



Experiment



Safety tank test facility

Goal: Analyses of Boron and temperature mixing under the influence of density differences in the safety tank, transfer the results to other tank geometries

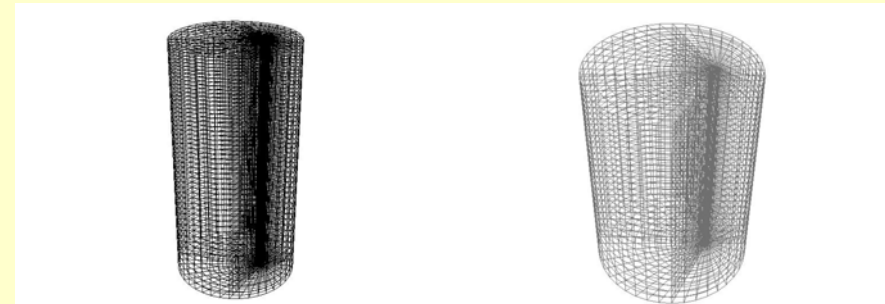
Water level (initial condition)	4,8 m
Injection nozzle	8030 mm
Duration	4440 s
Temperature tank:	28,2 °C
Temperature Deionat	25,2 °C
Mass flow rate	4 kg/s \pm 2%



Grid generation and modeling of density differences of borated and unborated water

Simple correlation based on experiments:

$$\rho_{mix} = 329.58 \frac{kg}{m^3} \cdot c_{B(OH)_3} + \rho_{H_2O}$$



level_low/high	Hexaheder	Hexaheder
Nodes	68079	47179
Water surface at	6.83 m	4.8 m

□ Borated water with 2200 ppm (28,2°C) density 1000,49 kg/m³, deborated water with 0 ppm (25,2°C) density 997,11 kg/m³

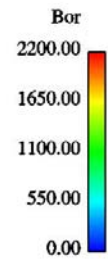
□ In the calculation the boron concentration differences were modeled using temperature differences (21.5 K at a pressure of 1 bar)

□ **Weaker** deborated water is injected into **heavier** borated water, even if the temperature of deborated water is **lower** than borated water

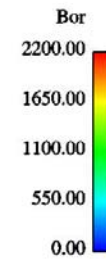


CFD Results 2001, high level, low level

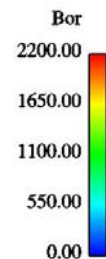
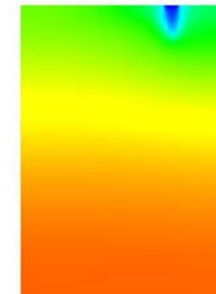
500 sec



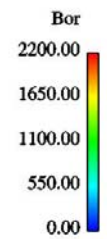
3000 sec



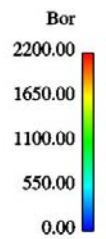
4400 sec



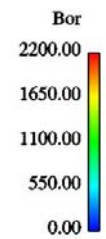
500 sec



3000 sec



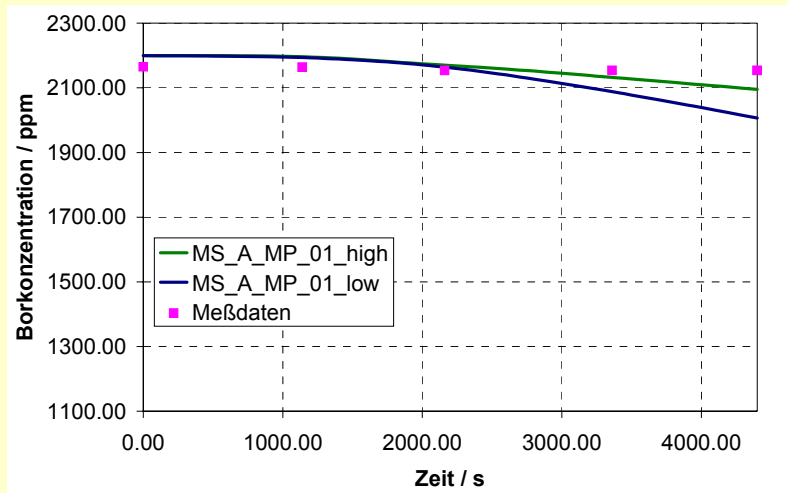
4400 sec



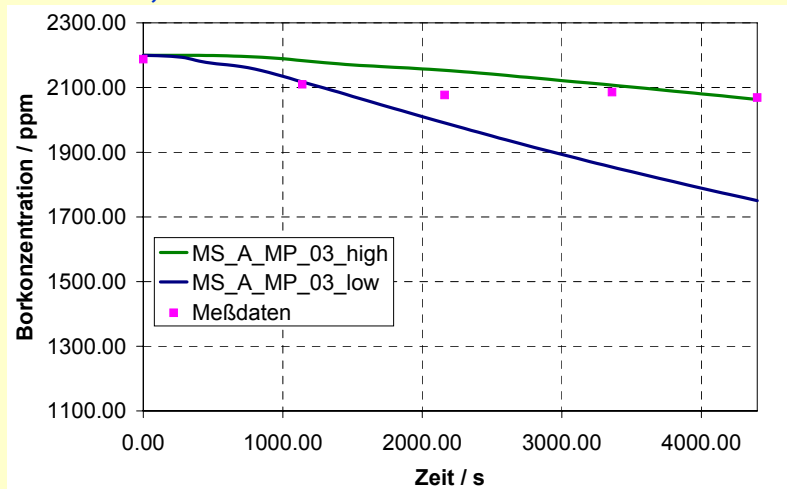
Center plane, Boron concentration during the experimental run, CFX



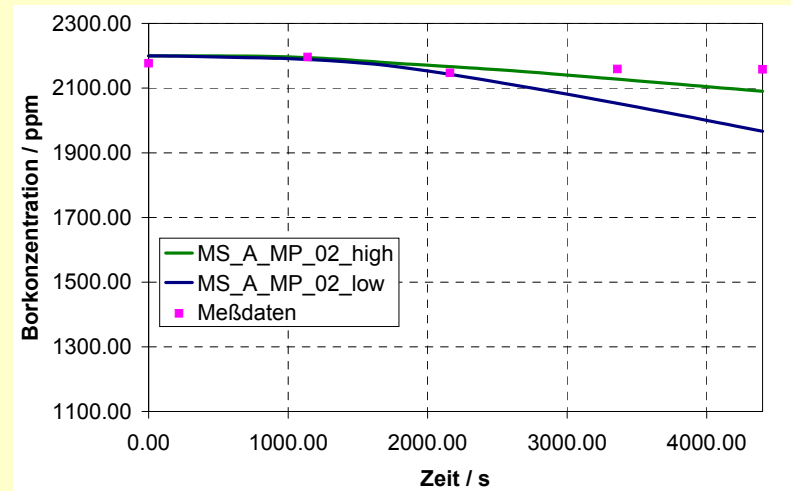
CFD Results, Comparison with experiment at probe lance A



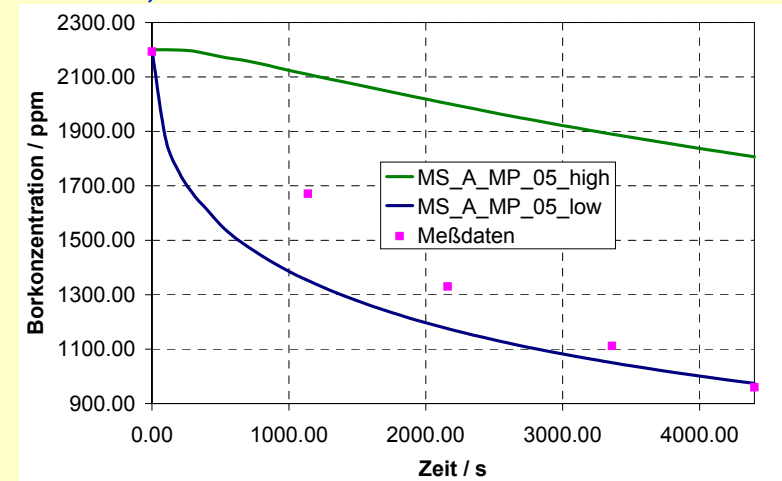
MP01, 0 m



MP03, 2.5 m



MP02, 1 m



MP05, 4.8 m



Results of Comparison and Limits

- Qualitative similar CFD results compared with experiments:
- Probe positions on top show fast and heavy decreasing of boron concentration
- Probe positions at the tank bottom show almost no boron concentrations changes
- At the beginning of the experiments the lower water level CFD case is more realistic, the two CFD cases are bounding the experimental values most of the time

Limits of CFD Modeling (2001):

Two phase modeling of "impinging jets" and water level rising was impossible due to

- computational resources and
- lack of implemented models

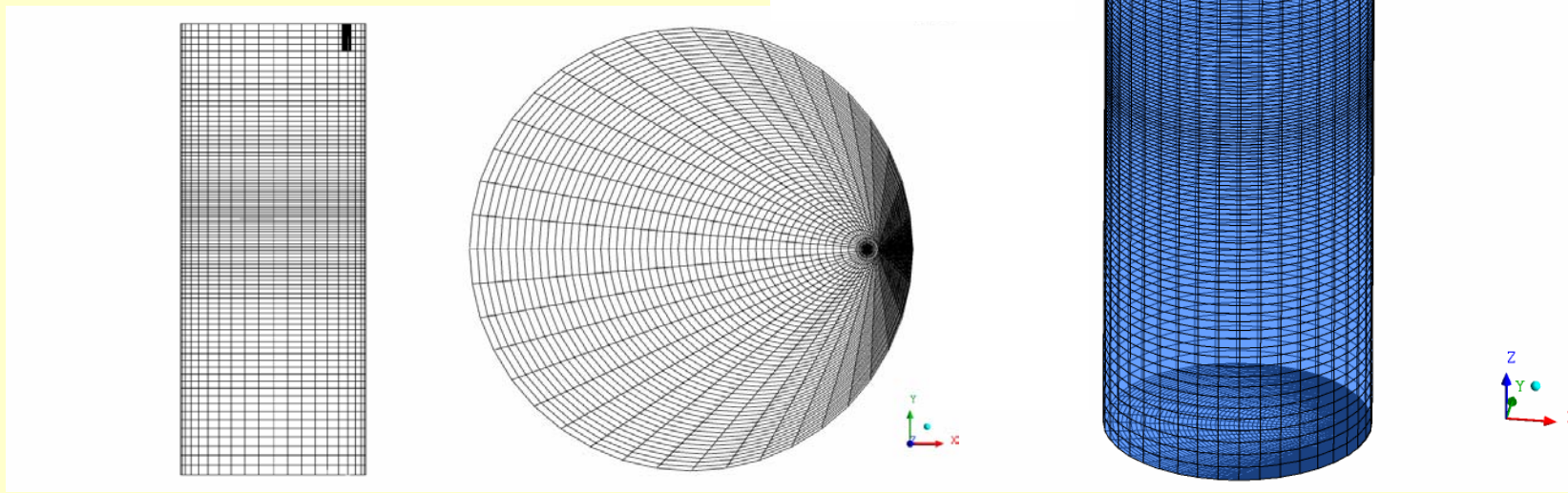


Input deck and grid generation

- ❑ Euler-Euler two-fluid model
- ❑ Standard free surface model, surface sharpening algorithm
- ❑ Transient simulation
- ❑ Mixture model for momentum exchange with constant drag coeff.

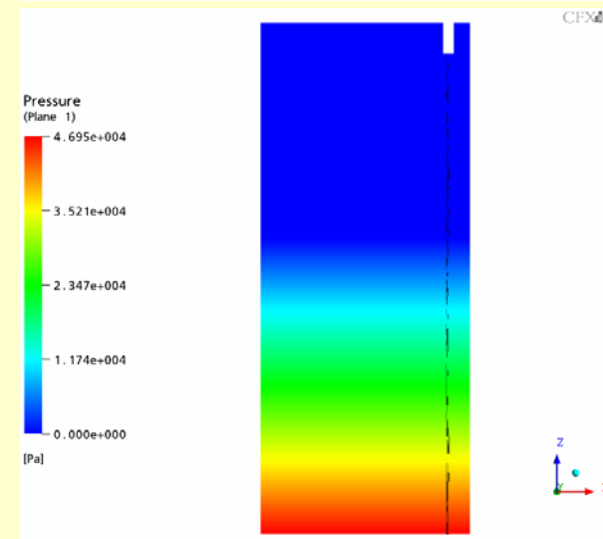
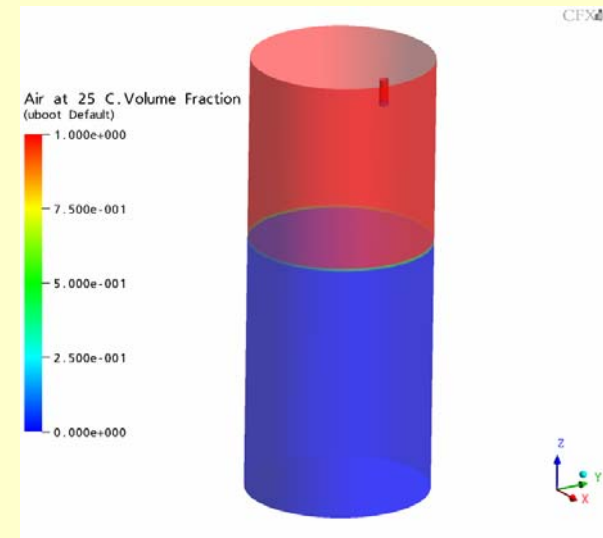
$$D = \frac{1}{2} \cdot \rho_{\alpha} \cdot (U_{\alpha} - U_{\beta})^2 \cdot A \cdot C_D$$

Grid of the fully modelled safety tank

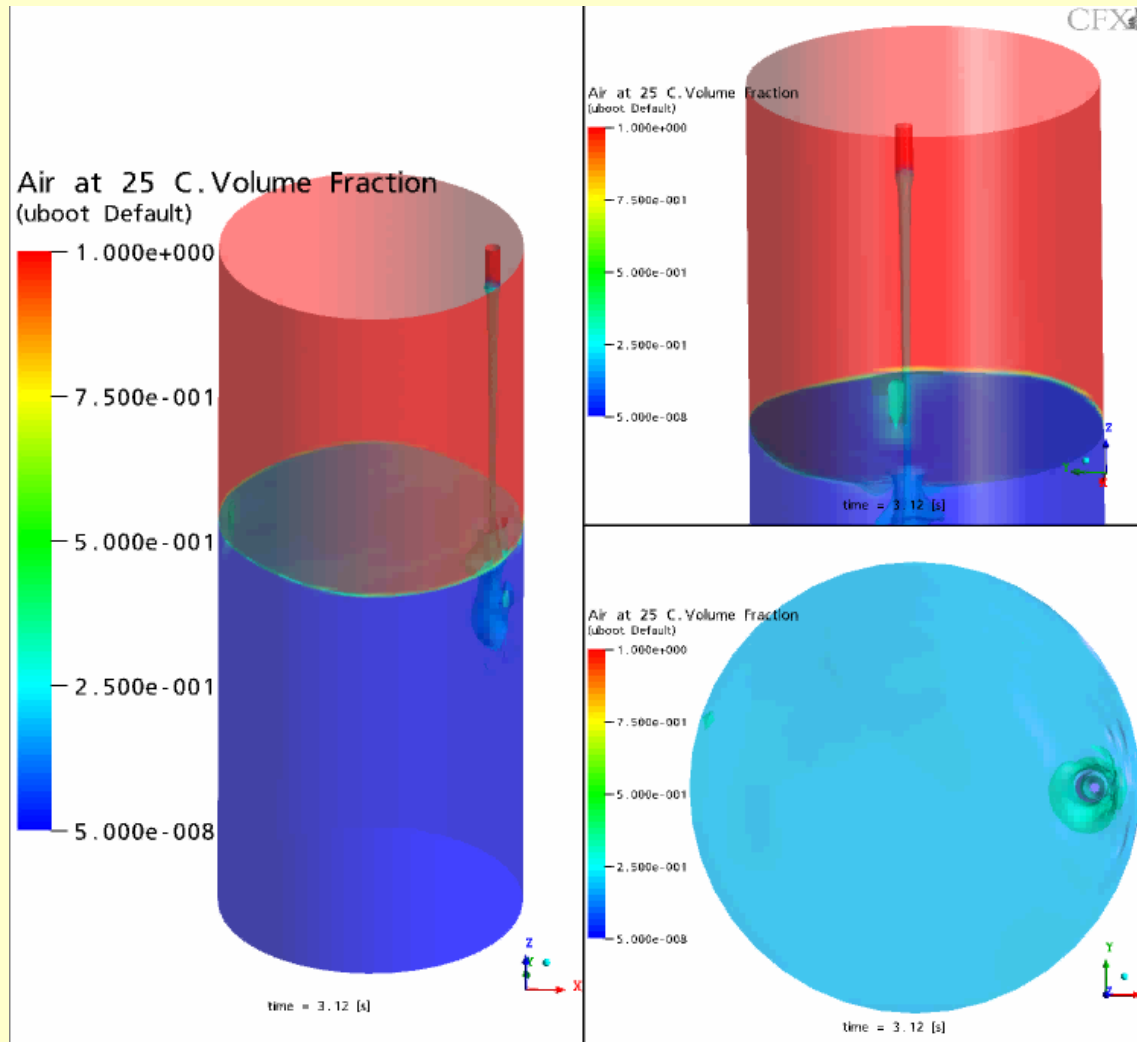


New calculations with ANSYS CFX – Input Deck

- Initial condition:
 - Water level 4.8 m, hydrostatic pressure
 - Temperature = 293 [K]
 - Reference Pressure = 1 [atm]
- Inlet:
 - 3 m/s water 95%, air 5%
 - Temperature = 303 [K]
- Outlet:
 - Opening Pressure: Air vf=1,
Water vf=0



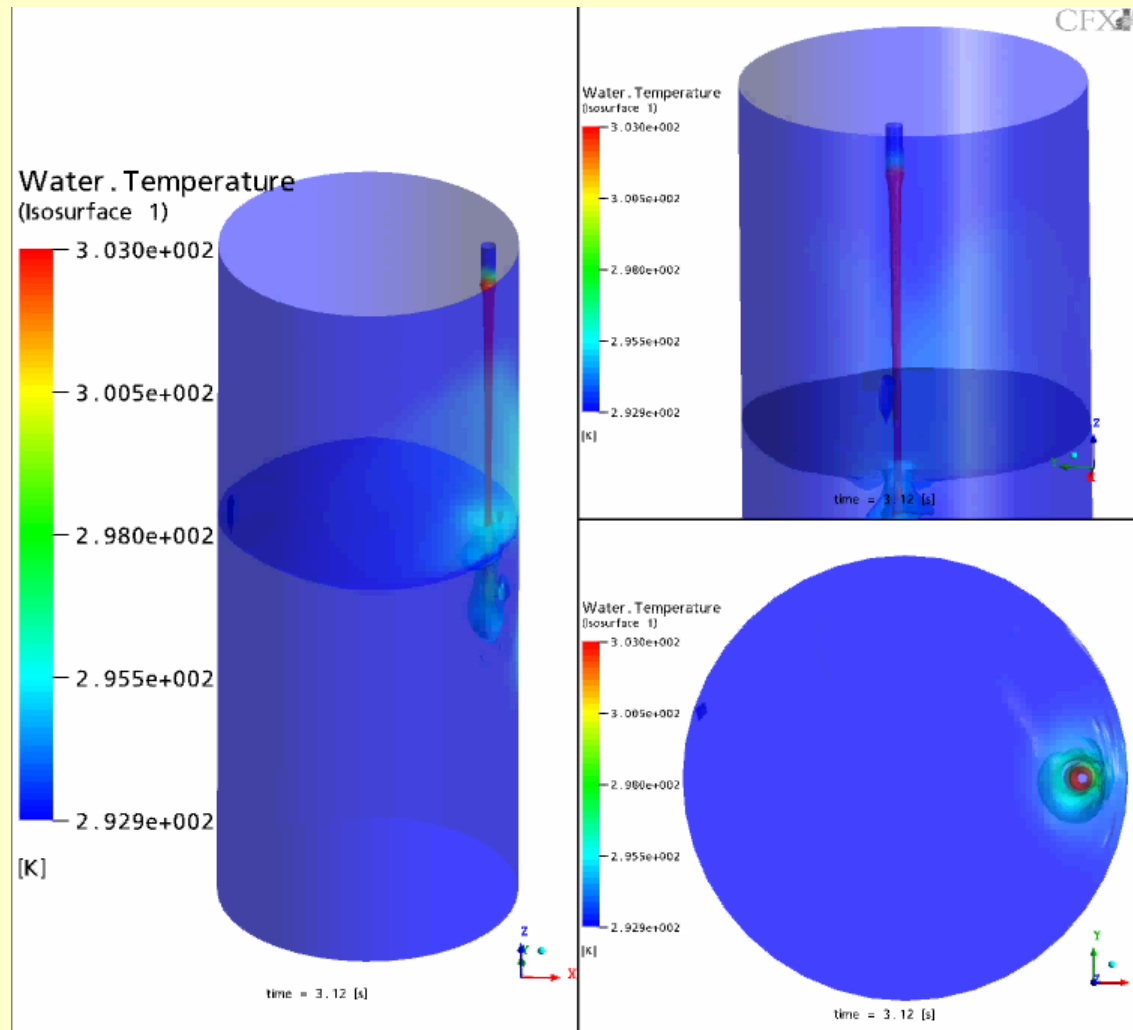
New calculations with ANSYS CFX– Results



Transient Simulation, Air Volume Fraction



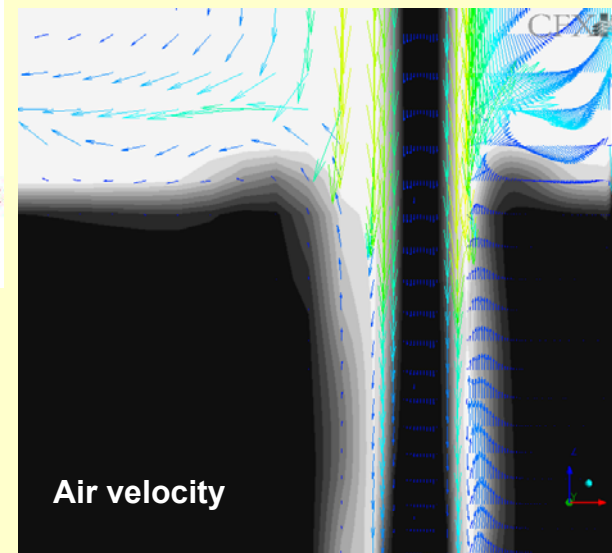
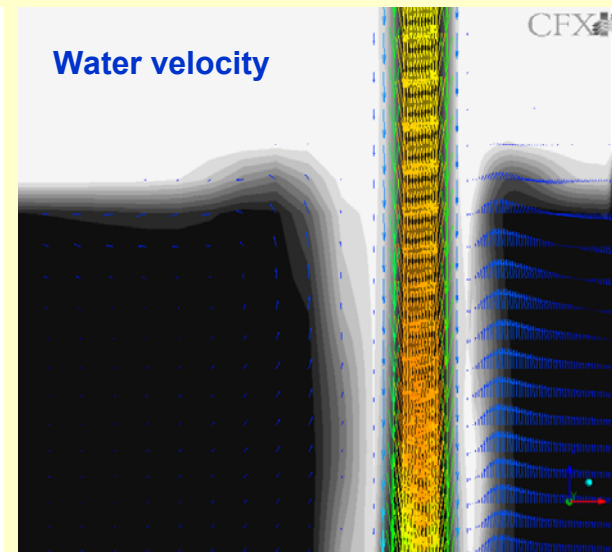
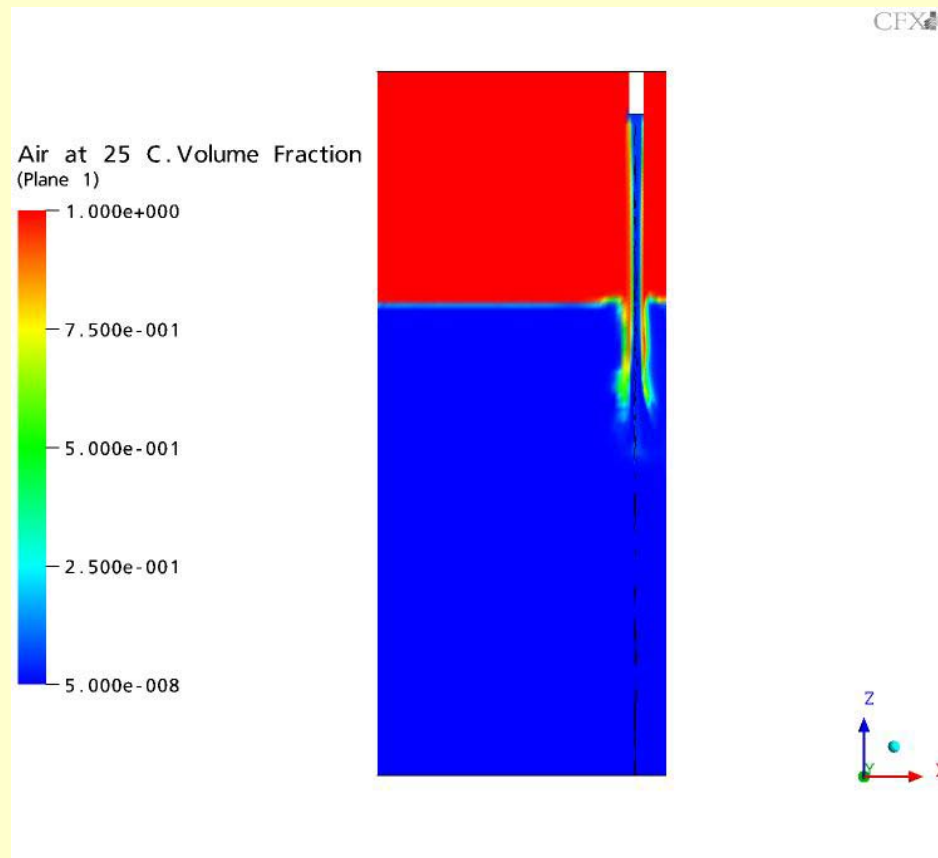
New calculations with ANSYS CFX– Results



Transient Simulation, Temperature



New calculations with ANSYS CFX– Results



Flow structures developing inside the tank with the injected liquid near the free surface

Summary and Next Steps

ROCOM test cases:

Buoyancy driven mixing was investigated under simulated natural circulation conditions at the test facility ROCOM.

Experiments with density differences between the ECC water (higher density) resp. the de-borated slugs (lower density) and the ambient coolant was used to validate the CFD software ANSYS CFX.

The experiment and CFD calculations show in both cases significant mixing effects due to the density differences.

The ANSYS CFX calculations show a good qualitative agreement with the data. At some local positions differences in the predicted and measured concentration fields occur.

The obtained experimental and numerical results can be used for further studies of the core behavior using coupled thermo-hydraulic and neutron-kinetic code systems.

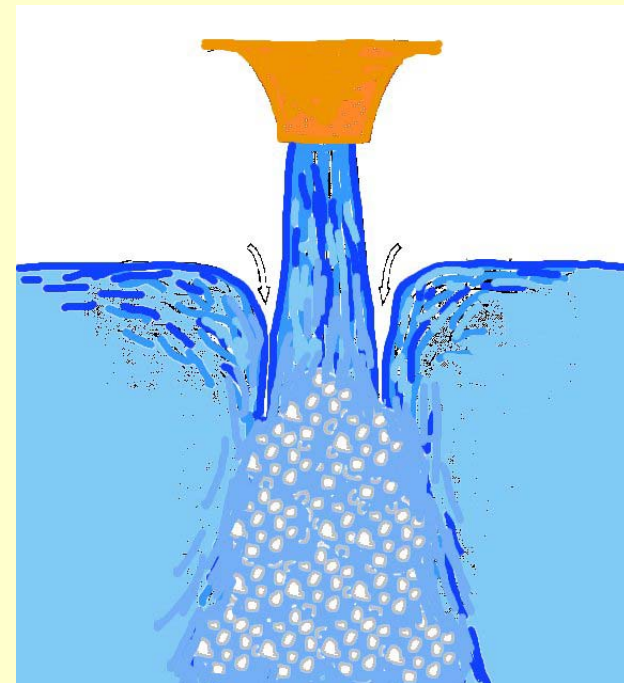
Next Steps: Improvement of turbulence models, calculation with different Reynolds Stress models or DES



Summary and Next Steps

Flooding tank:

- ❑ Due to the density differences the injected deborated water is stratifying on top of the borated water
- ❑ Qualitative similar CFD results compared with experiments: Probe positions on top show fast and heavy decreasing of boron concentration, Probe positions at the tank bottom show almost no boron concentrations changes.
- ❑ Improved physical models and increased CPU capacity make it possible to run now two phase flow calculations
- ❑ Next Steps: Different models necessary for dispersed particles and separated continuous phases (interfacial drag etc.)
- ❑ **Algebraic Interfacial Area Model (Egorov)**



Der deutsche CFD-Verbund: Ziele und Vorhaben

Martina Scheuerer,
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH, Garching

CFD-Forschungsverbund:

„Entwicklung und Anwendung von CFD-Programmen für Strömungs- und Wärmeübergangsphänomene in Leichtwasserreaktoren“

Ziele und Vorhaben

Martina Scheuerer,
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH
85748 Garching

Die Anwendung von Computational Fluid Dynamics (CFD) Programmen findet bei der Analyse von angenommenen Störfällen in Leichtwasserreaktoren zunehmendes Interesse, da für eine verbesserte Quantifizierung von Sicherheitsmargen und für die Analyse von neuen Reaktorkonzepten immer genauere Strömungssimulationen notwendig sind. Um die geforderte höhere Simulationsgenauigkeit zu erreichen, müssen Strömungs- und Wärmeübergangsphänomene in zunehmenden Masse dreidimensional mit CFD-Verfahren berechnet werden. Bei CFD-Berechnungen von mehrphasigen Strömungen in Kernreaktoren besteht jedoch noch ein deutlicher Verbesserungs- und Validierungsbedarf bezüglich der verwendeten Modelle und Numerik. Um CFD-Software bezüglich dieser Anforderungen möglichst schnell und anwendungsnah zur Verfügung zu stellen, wurde der CFD-Forschungsverbund gegründet.

Das Hauptziel ist, dreidimensionale Strömungen im Primärsystem und im Sicherheitsbehälter von Druckwasserreaktoren zu untersuchen und genau zu simulieren. Einzelziele sind:

- Verbesserte Berechnung von Zweiphasenströmungen durch Validierung existierender Modelle und durch Entwicklung neuer Modelle
- Definition und Koordination von experimentellen Untersuchungen, um die Modellentwicklung zu unterstützen
- Implementierung neuer Modelle und verbesserter numerischer Verfahren in ein CFD Modul
- Anwendung und Weiterentwicklung von Best Practice-Richtlinien zur Erhöhung der Qualität und Genauigkeit von CFD-Simulationen
- Kopplung des dreidimensionalen CFD-Moduls mit dem Systemcode ATHLET und mit Neutronenkinetikcodes

Das CFD-Netzwerk wurde im Februar 2003 gegründet. Es besteht aus den Forschungszentren Karlsruhe und Rossendorf, ANSYS Germany, der GRS als Koordinator und akademischen Partnern, die experimentelle Daten zur Verfügung stellen sowie neue Modelle entwickeln. Diese Modelle werden mit Hilfe von ANSYS in die CFX-Software implementiert und dann allen Partnern zum Testen und für industrielle Anwendungen zur Verfügung gestellt. Der schnelle Einsatz der neu entwickelten Modelle und die kontinuierliche Pflege der Software wird durch die Verwendung einer kommerziellen CFD-Software als Basis für die Entwicklung sichergestellt.

Im ersten Projektabschnitt wurden gute Fortschritte in der Modellierung von Blasenströmungen und horizontalen Strömungen mit freien Oberflächen gemacht. Weitere Projekte beinhalten den Transport von Isolationsmaterial, die Simulation von Prallstrahlen und die Analyse von Kondensationsphänomenen an freien Oberflächen. Ein kontinuierlicher Informationsaustausch findet über die CFD-Webseite <http://domino.grs.de/cfd/cfd.nsf> statt.



**CFD-Forschungsverbund:
“Entwicklung und Anwendung von CFD-Programmen für
Leichtwasserreaktoren“**

Ziele und Vorhaben

Martina Scheuerer, GRS-Garching

Martina.Scheuerer@grs.de

**KTG-Fachtagung „Aktuelle Themen der Reaktorsicherheitsforschung in Deutschland“,
Rossendorf, 3.- 4. April 2006**



- **Motivation und Ziele**
- **Struktur des CFD-Verbunds**
- **Partner und Organisation**
- **Ergebnisse:**
 - **Modellentwicklung**
 - **Validierung**
 - **Experimente**
- **Kommunikation**
- **Perspektiven**
- **Zusammenfassung**



- **Anforderungen:**
 - Quantifizierung von Sicherheitsmargen
 - Bewertung von Leistungserhöhungen
- **Weiterentwicklung der Simulationstechnik**
 - Mehrdimensionale Phänomene
 - Zweiphasenströmungen
 - Phasenübergang
 - Validierung
 - Kopplung → Systemcodes & CFD-Software
- **Maximale Entwicklungseffizienz**
 - Verbundvorhaben aus Forschungsinstituten & Software-Entwicklern



Ziele



- **Untersuchung von 3D-Strömungen im Primärkreis und im Sicherheitsbehälter von Druckwasserreaktoren in einer konzertierten Aktion**
- **Entwicklung und Validierung von Zweiphasenmodellen**
- **Koordination der Validierungsexperimente**
- **Validierung und Bereitstellung eines CFD-Moduls**
- **Entwicklung von Best Practice Guidelines und Checklisten**
- **Einbinden des CFD-Moduls in ATHLET**



Entwicklungsbereiche



**Methoden-
Entwicklung**

Software Eng.
Algorithmen

Parallelisie-
rung

**Modell-
Entwicklung**

Turbulenz
Energie-
transport

Mehrphasen

Validierung

Einzeleffekte
Integral-
Effekte

Industrie-
testfälle

CFD-Forschungsverbund Reaktorsicherheit

BPGs
Kurse

Webseite

**Information,
Ausbildung**

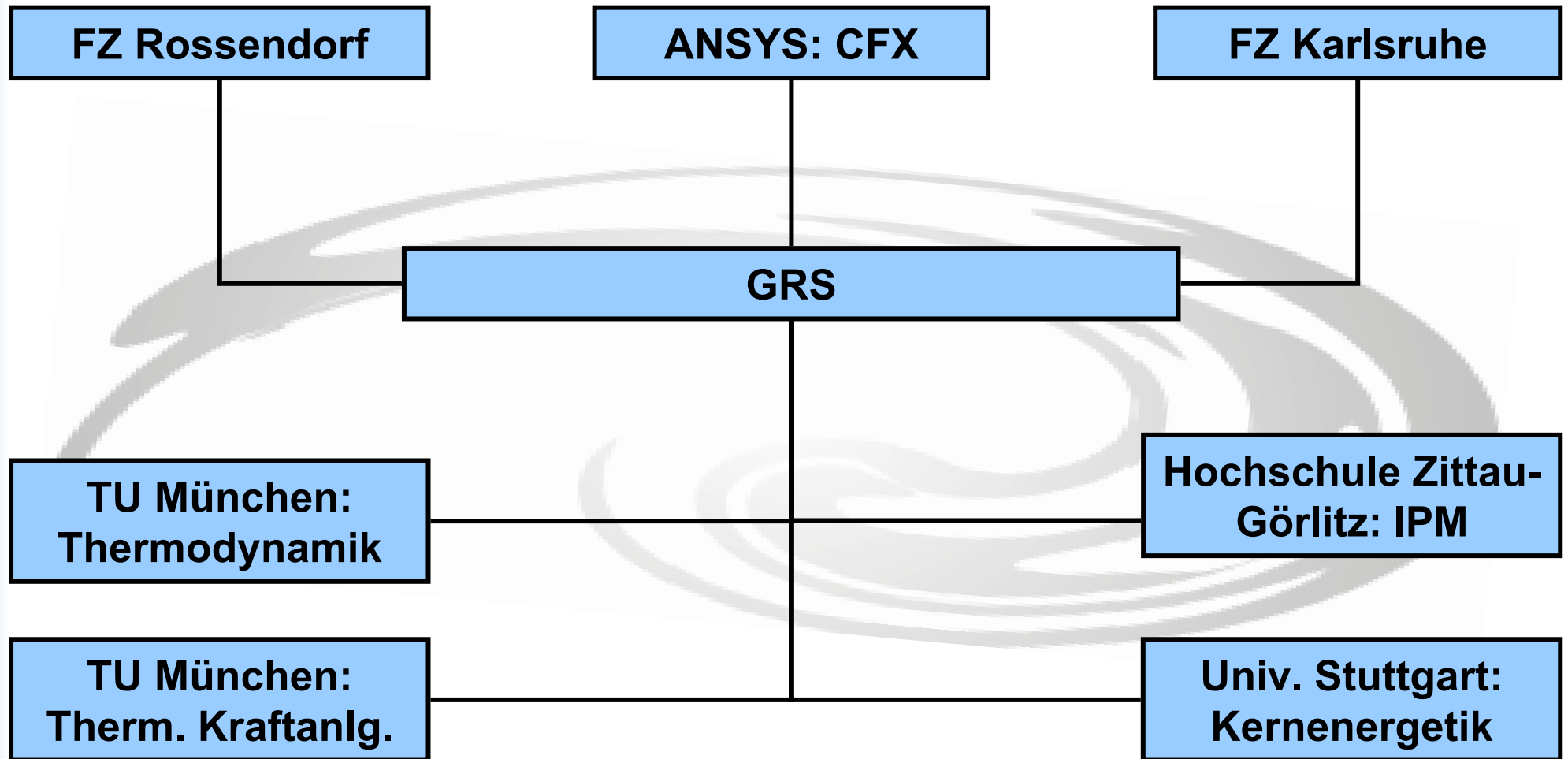
Basis-
experimente
Simulationen

Korrelationen
Integral-
Experimente

**Validierungs-
daten**

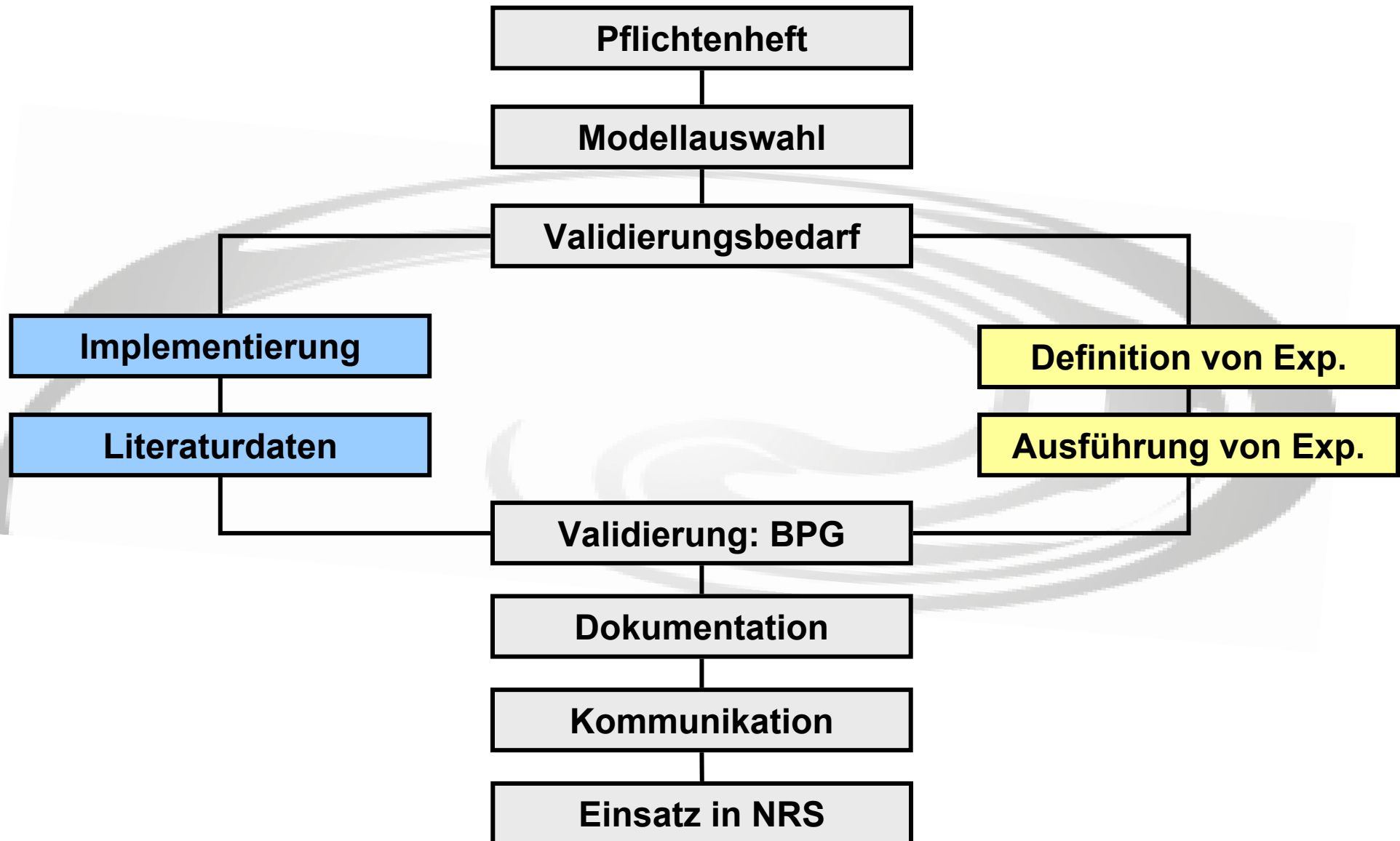


Partner und Organisation





Arbeitsplan





Pflichtenheft - Validierungstestfälle



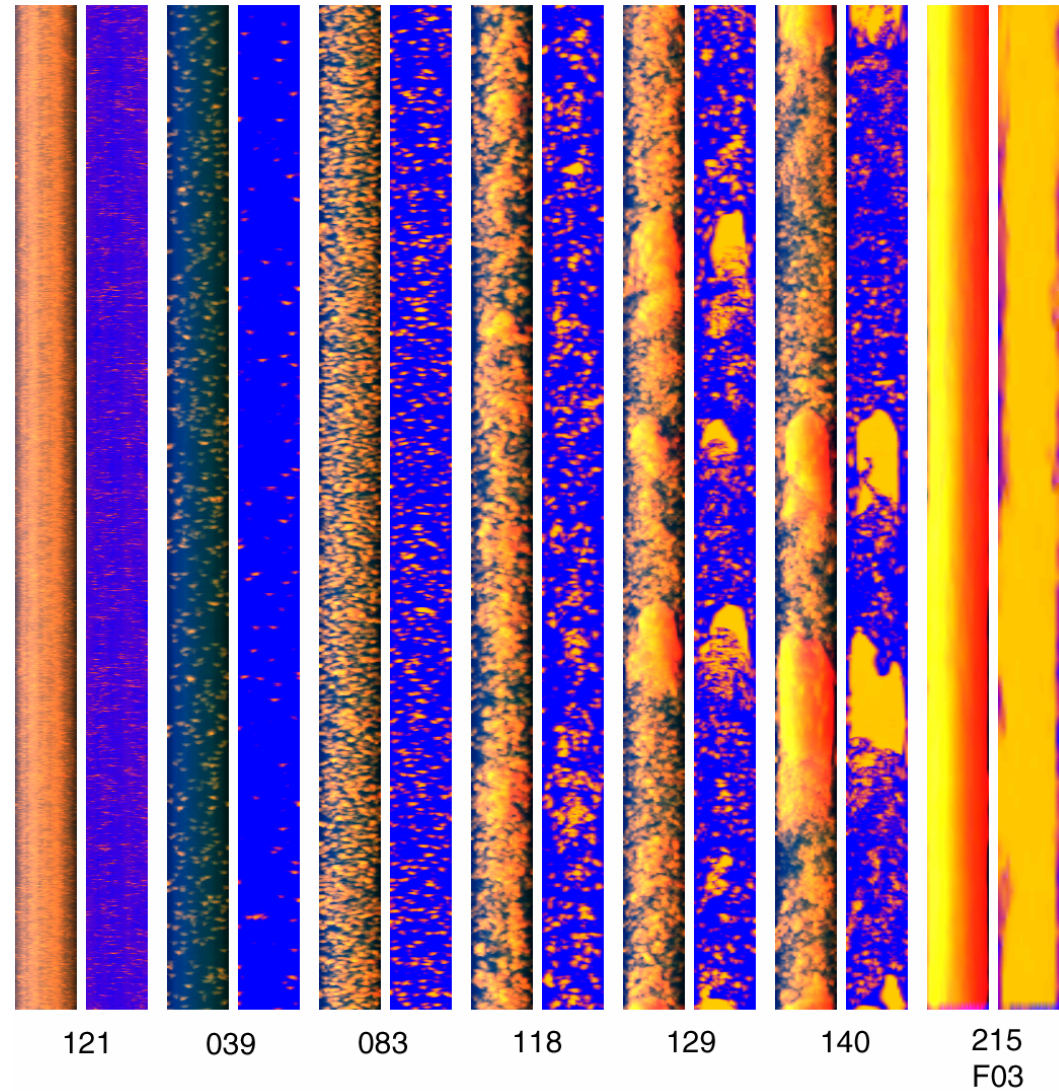
- **Strömungen mit niedrigen Volumenanteilen**
 - Vertikal aufwärts
 - Vertikal abwärts
 - Horizontal gleichgerichtet
 - Horizontal gegengerichtet
- **Strömungen mit hohen Volumenanteilen**
 - Vertikal aufwärts
 - Vertikal abwärts
 - Horizontal gleichgerichtet
 - Horizontal gegengerichtet
- **Strömungen mit freien Oberflächen**
 - Horizontal gleichgerichtet
 - Horizontal gegengerichtet
 - Prallstrahlen (Downcomer)
 - Freistrahlen (ECC)
- **Strömungen mit Phasenübergang**
 - Kondensation
 - Verdampfung
 - Flashing
 - Sieden



Vertikale Rohrströmungen



- Experimente
 - FZR
 - MTLLoop Facility
- Modellierung & Validierung
 - FZR
 - CFX
- Zielgrößen
 - Volumenanteil
 - Gasgeschwindigkeit
 - Wassergeschwindigkeit
 - Blasengrößenverteilung

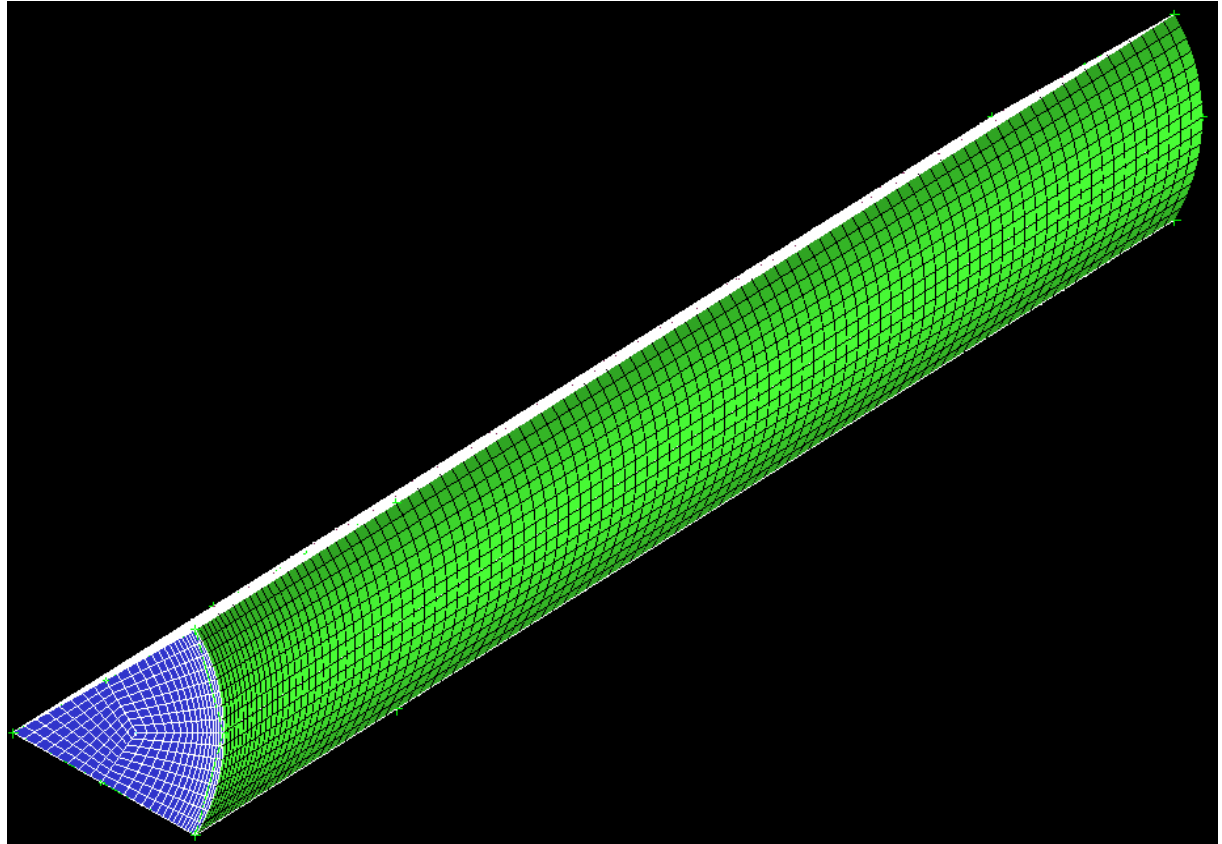




Vertikale Rohrströmungen

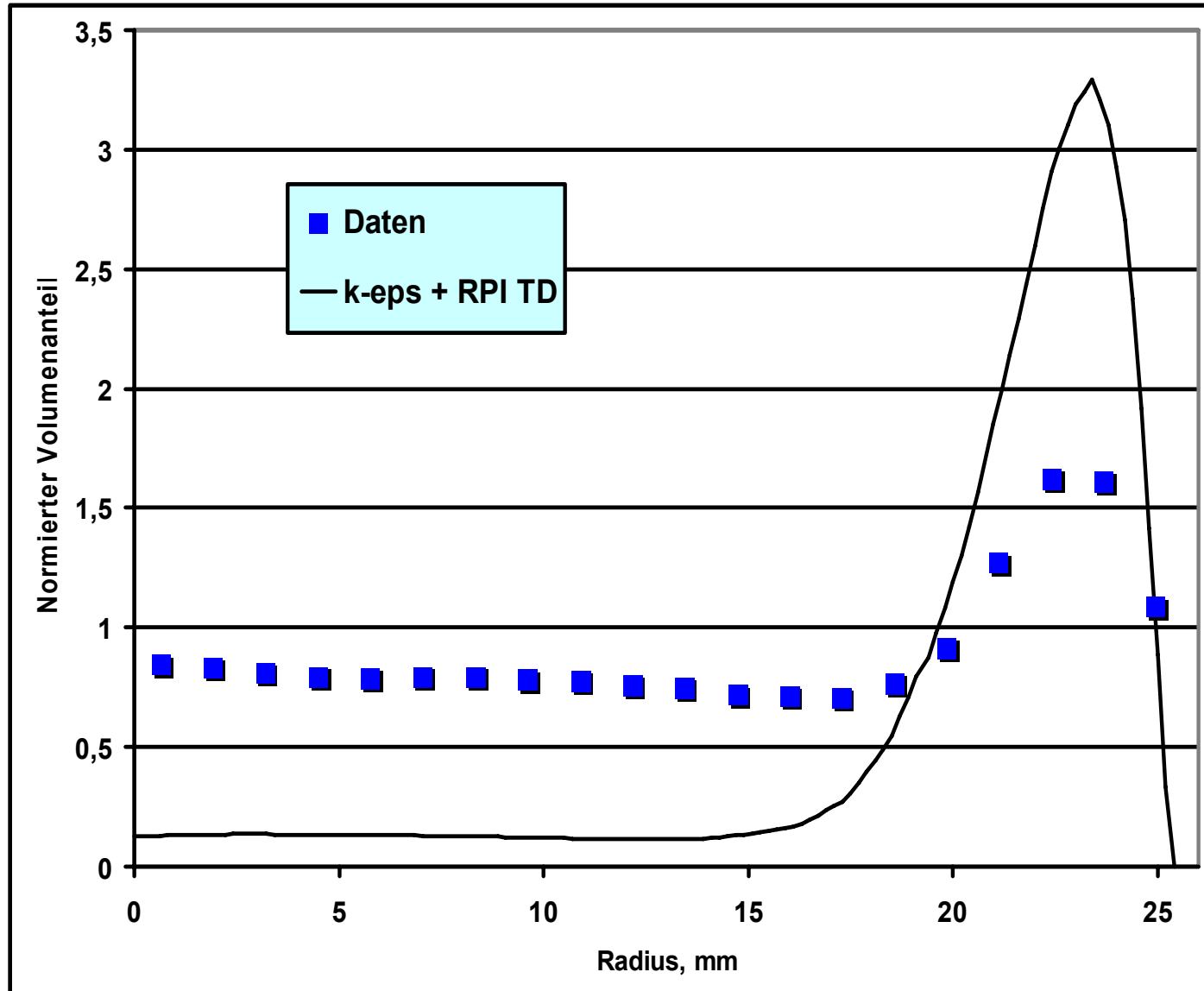


- **FZR-074**
- **Radius: 25.6 mm**
- **Leerrohr-Geschwindigkeiten:**
 - **Luft: 0.0368 m/s**
 - **Wasser: 1.0167 m/s**
- **3D-Netze**
 - **15,000 Elemente**
 - ...
 - **512,000 Elemente**





Standardmodelle



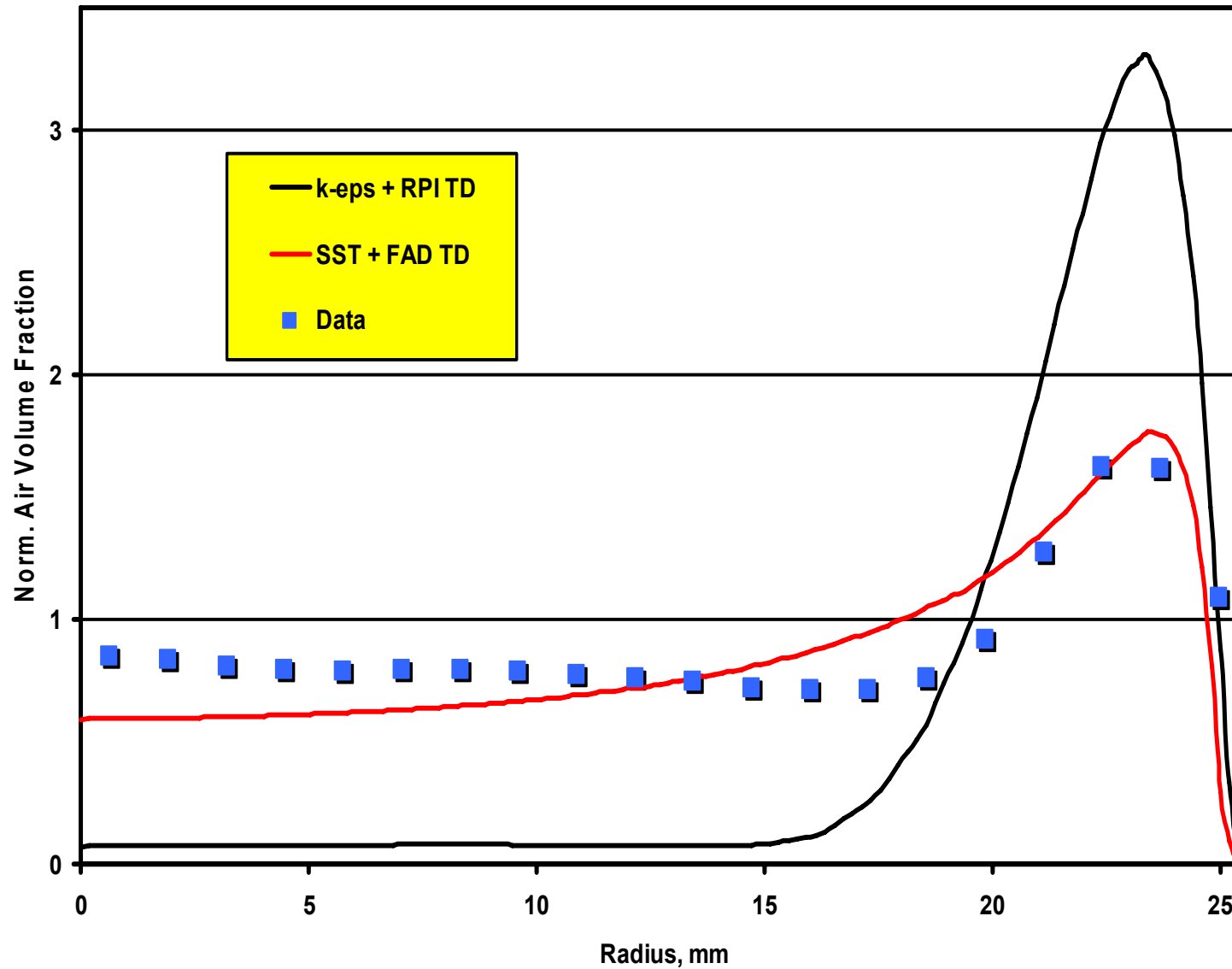


- **Blasenströmungsmodell**
 - Widerstandsgesetz von Grace
- **Turbulente Dispersion**
 - RPI Modell
- **k- ϵ -Turbulenzmodell**
- **Logarithmische Wandfunktion**

- **Auftriebskraft**
- **Wandreibungskraft**
- **Kraft der virtuellen Masse**
- **Turbulente Dispersion**
 - Favre-Averaged-Model (FAD)
- **SST-Turbulenzmodell**
- **Automatische Wandfunktion**



Modellerweiterungen

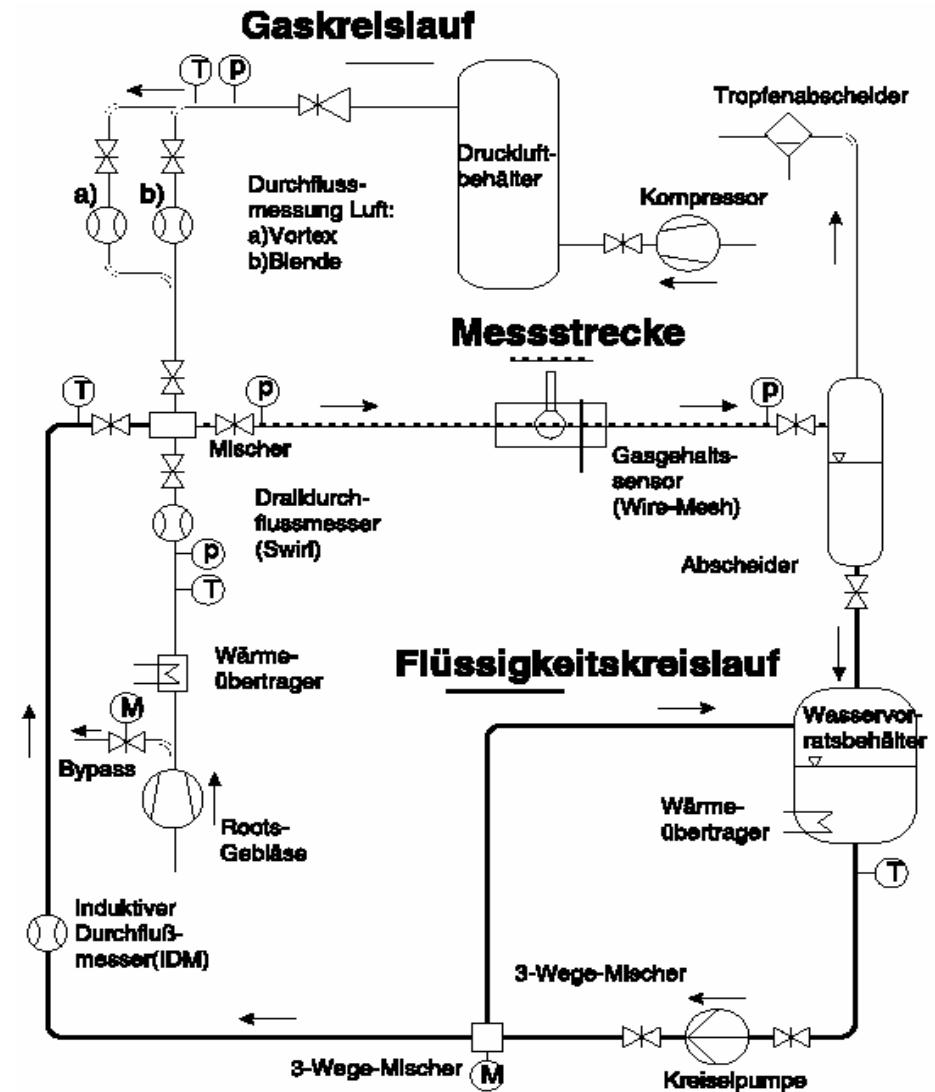




Horizontale Rohrströmungen

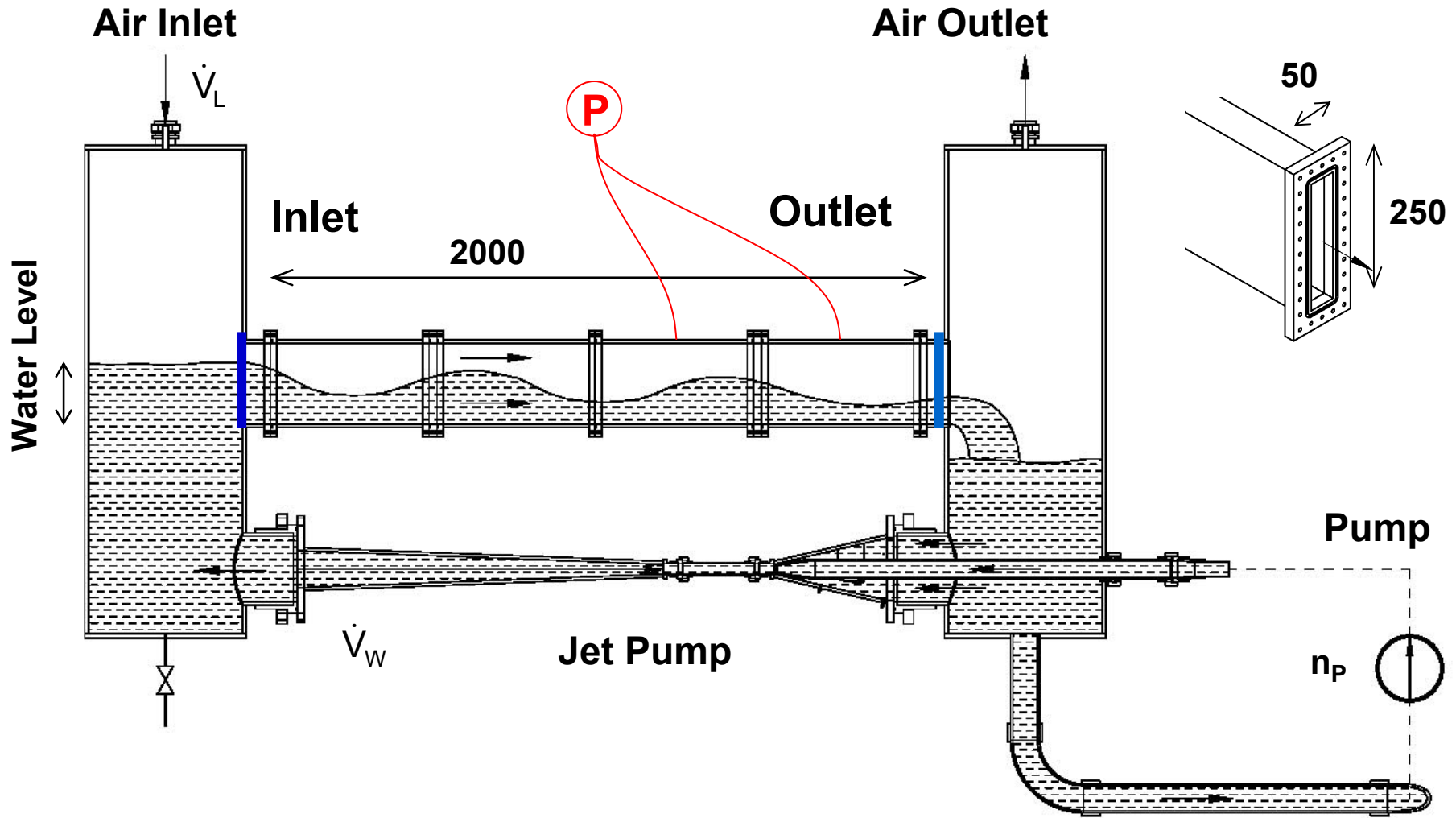


- Experimente
 - TU München (Thermodynamik)
 - FZR
- Modellierung & Validierung
 - TU München (Thermodynamik)
 - FZR
 - CFX
- Zielgrößen
 - Volumenanteil
 - Gasgeschwindigkeit
 - Wassergeschwindigkeit



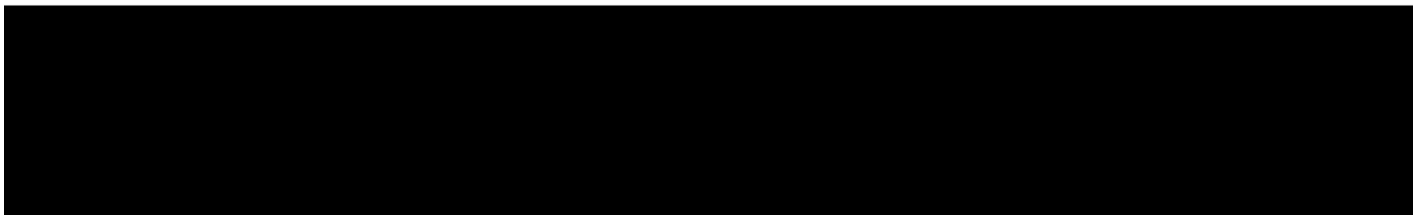
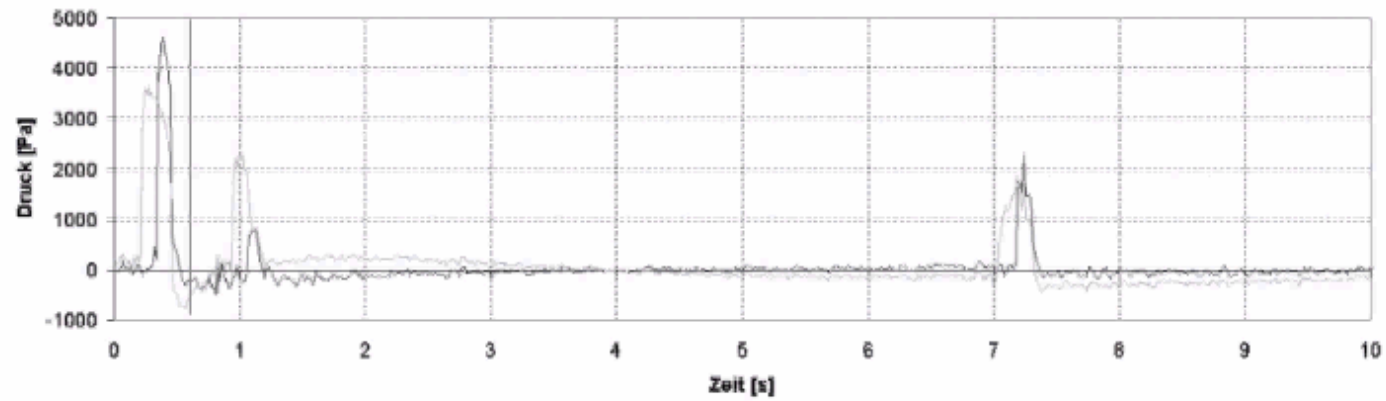


FZ Rossendorf Experiment



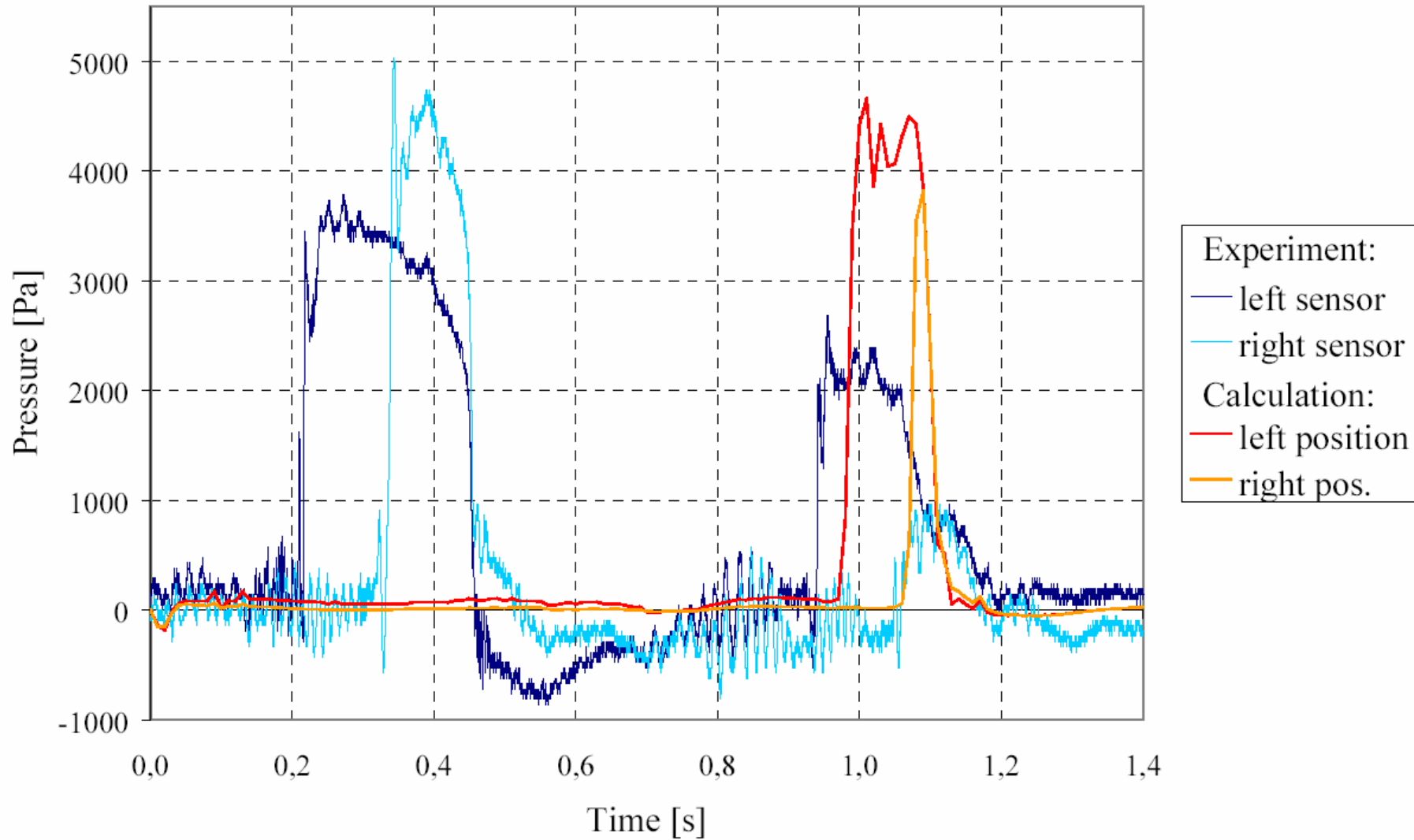


FZ Rossendorf Experiment





Horizontale Kanalströmung

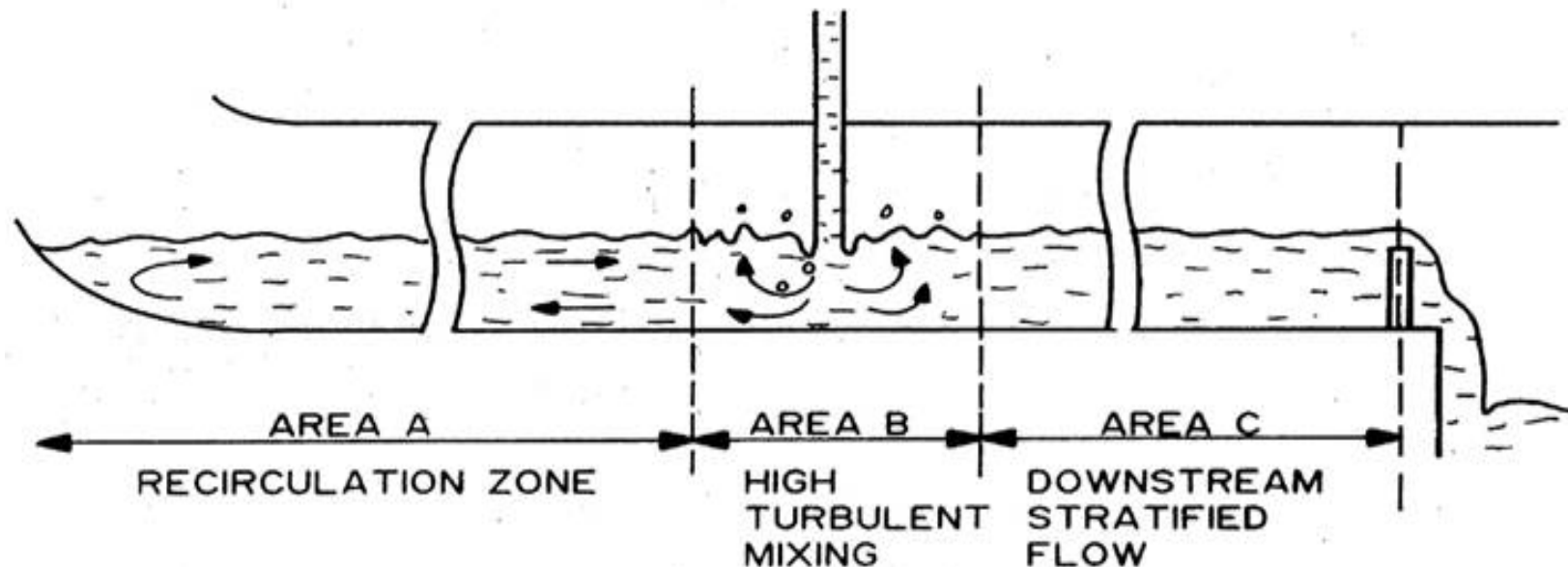




Strömungen mit freien Oberflächen



- **ECC-Einspeisung:**
 - Prallstrahlen
 - Stratifizierte Strömungen
 - Turbulente Vermischung
- **Experimente:**
 - Kvicinsky & Avellan, EPFL
- **Simulationen:**
 - CFX-5
 - SST-Modell
 - Modell für freie Oberflächen

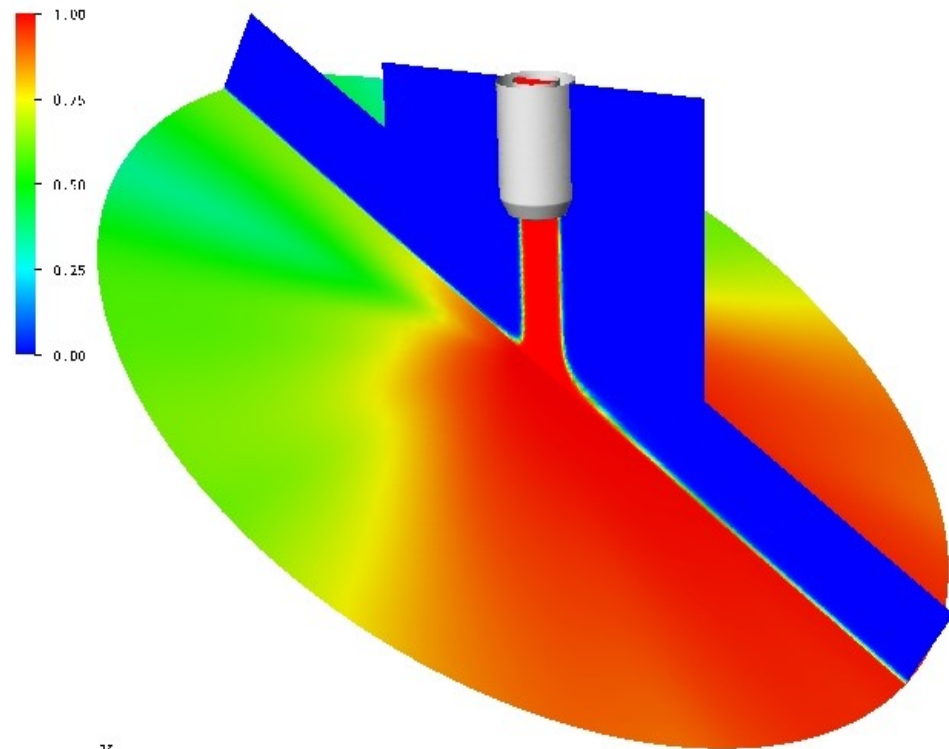




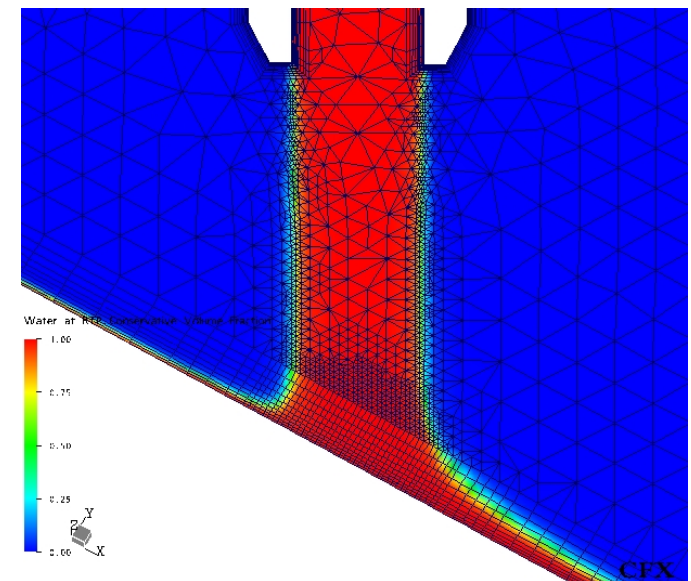
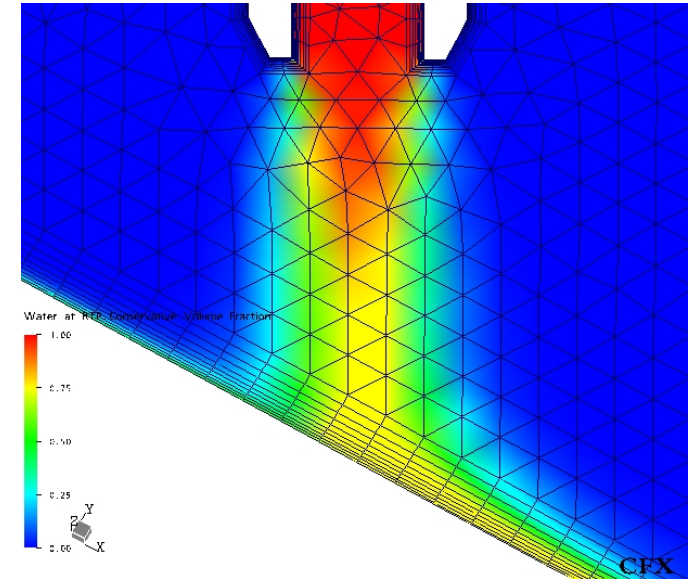
Prallstrahl



Water at RTP. Conservative Volume Fraction

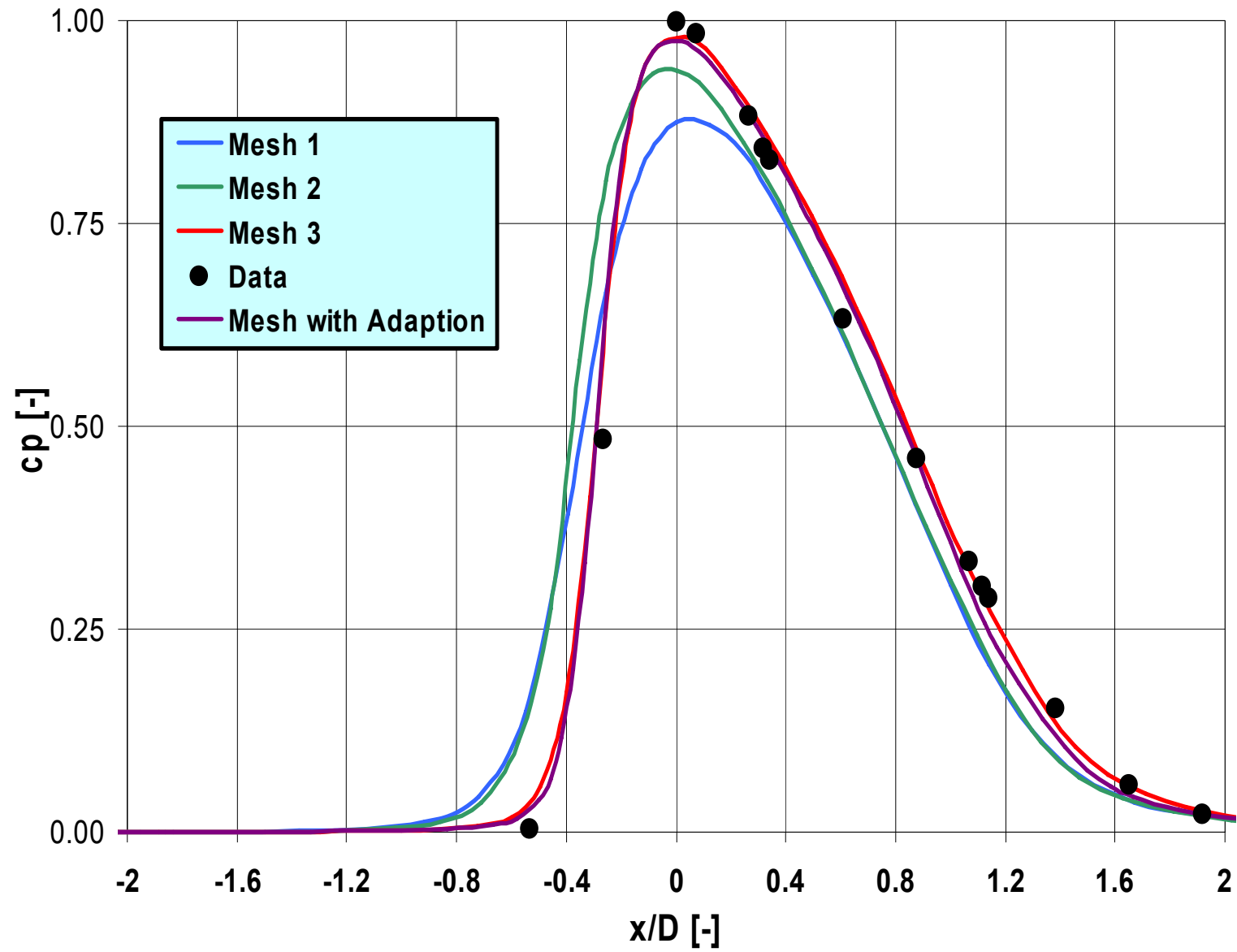


- Volumenanteil von Wasser
- Automatische Netzadaption





Prallstrahl

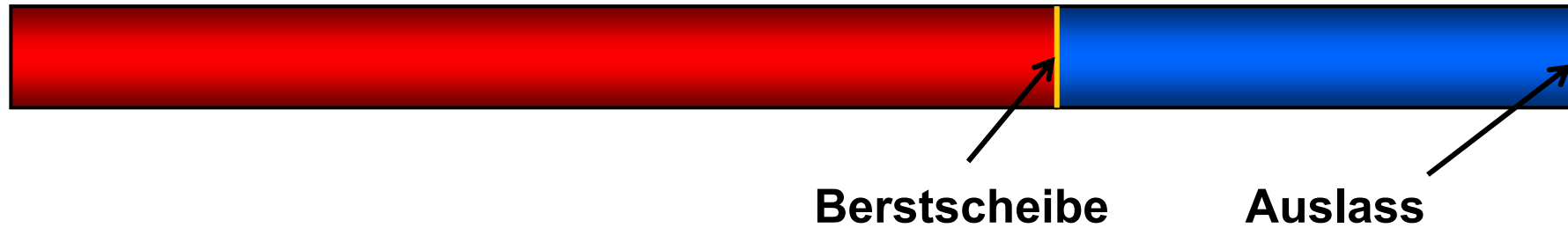




Flashing: Edwards Test



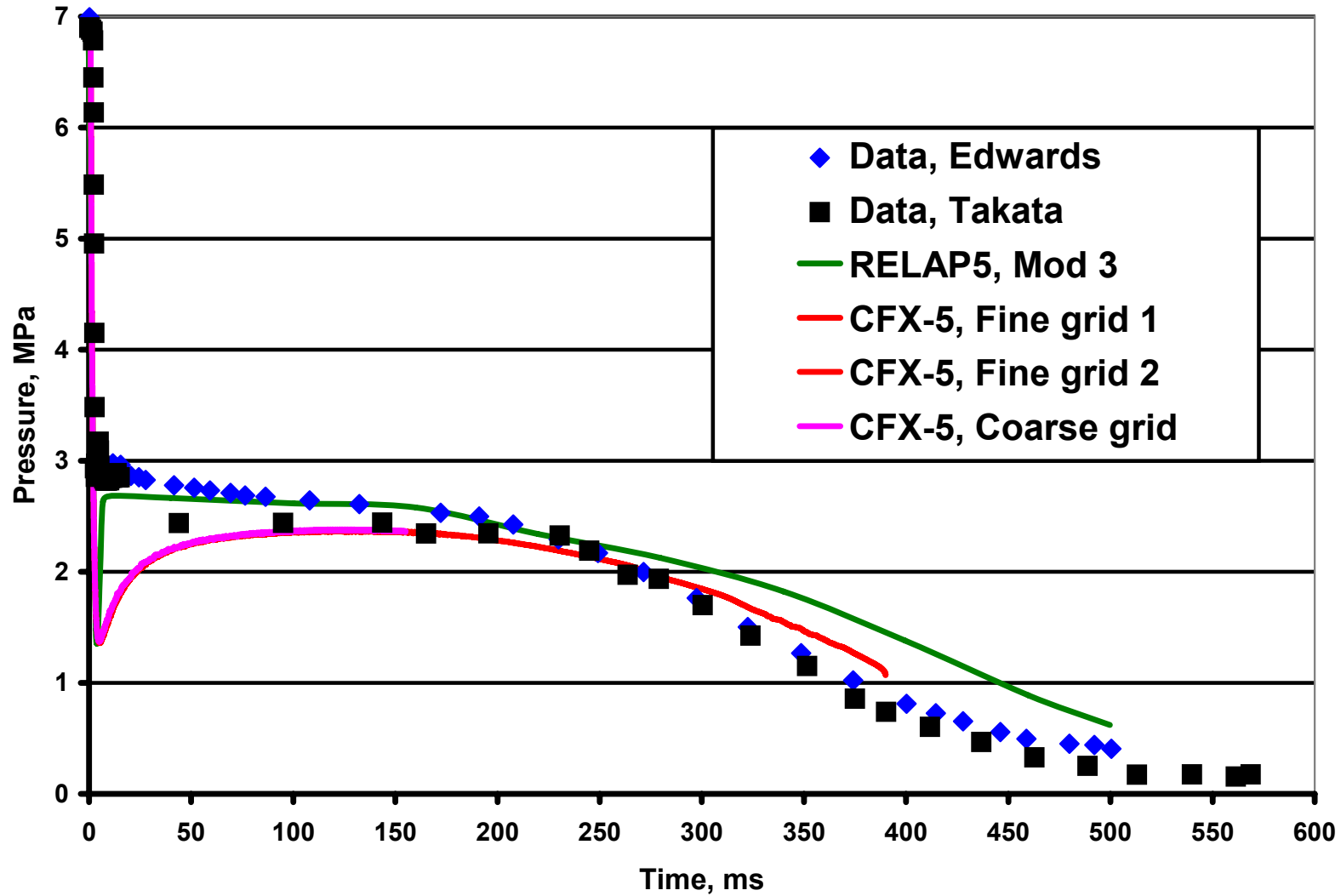
Rohrströmung: 7 MPa, 502 K



- Daten von Edwards & Brien (1970), Takata & Yamaguchi (2003)
- Wasser & Dampf
- Zweifluidmodell
 - Massenaustausch → Flashing
 - Impulsaustausch
 - Energieaustausch

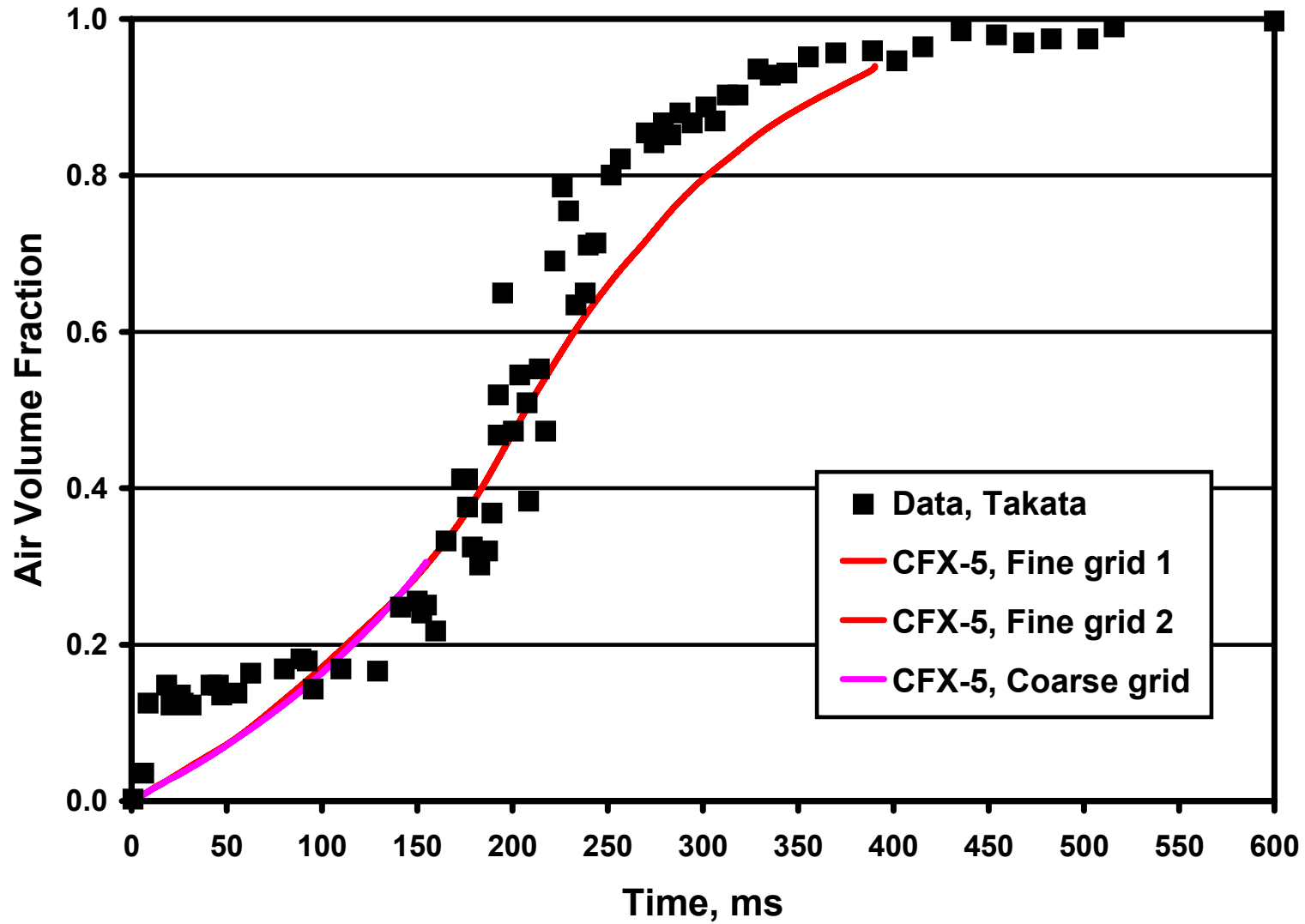


Flashing: Edwards Test





Flashing: Edwards Test





Weitere Projekte



- **GRS**

- Entwicklung von Zweiphasen-Turbulenzmodellen
- Entwicklung von Zweiphasenmodellen
- Kopplung von ATHLET & FLUBOX

- **ANSYS & FZR**

- MUSIG-Modelle
- Kondensationsmodelle
- Verbesserung der Numerik

- **Hochschule Zittau-Görlitz**

- Strömung von Isolationsmaterial
- Experimente & Simulation

- **TU München, Thermische Kraftanlagen**

- Kondensationsvorgänge an Wasserstrahlen

- **Universität Stuttgart, Kernenergetik**

- Schichtenströmungen



- <http://domino.grs.de/cfd/cfd.nsf>
- **Dokumente**
 - **Protokolle**
 - **Pflichtenheft, Literatursammlung**
- **Messdaten**
- **Ergebnisse**
- **Interesse von**
 - **Reaktorsicherheit (OECD, FISA, NURESIM, CEA, EdF, IRSN, NRG, TÜVs)**
 - **Verfahrenstechnik (Linde, BASF, Siemens)**



- **Projektabschnitt 2006 – 2009**
 - Finanzierung der Projektpartner: FZR, GRS
 - Kooperation mit Universitäten

- **Schwerpunktthemen:**
 - Strömungen mit hohem Volumenanteil
 - Strömungen mit Phasenübergang
 - Kopplung von CFD- und Systemcode
 - Kopplung von CFD- und Neutronenkinetikcode
 - Sicherheitsbehälter

- **Vernetzung mit internationalen Partnern:**
 - NORTHNET Initiative
 - Zusammenarbeit mit NRG, IRSN, PSI, ...



- **Motivation und Ziele**
- **Struktur des Forschungsverbunds**
- **Organisation → Pflichtenheft**
- **Ergebnisse**
 - **Vertikale Rohrströmungen**
 - **Horizontale Rohrströmungen**
 - **Strömungen mit freien Oberflächen**
- **Aktive Zusammenarbeit**
- **Nationales und internationales Interesse**

Computational Fluid Dynamics and Computational Multi-Fluid Dynamics for Reactor Safety: Prospects and Examples

George Yadigaroglu

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETH), Schweiz

Computational Fluid Dynamics and Computational Multi-Fluid Dynamics for Reactor Safety: Prospects and Examples

G. Yadigaroglu
Prof. of Nuclear Engineering, em., ETH Zürich
ETH WEN B-13, Weinbergstrasse 94
CH-8006 Zürich, Switzerland
yadi@ethz.ch

New opportunities and challenges

The tremendous increase in computational power that has been achieved the last couple of decades and the maturity of the Computational Fluid Dynamics (CFD) methods (already applied today extensively to single-phase flow problems), as well as the emergence of Computational *Multi-Fluid Dynamics* (CMFD) methods and tools allows us now to approach reactor safety problems in increasingly sophisticated ways and in much greater detail. The challenge facing the safety analysis community is to seize this opportunity and create the new computational tools that will be used for the more sophisticated analysis of the present reactors, and for the design and analysis of new generations of reactors.

The new tools are needed to address certain three-dimensional (3D) flow situations (single-phase as well as two-phase), certain problems at a multiplicity of scales (system, component, local detail) and dimensions (0D to 3D) and with multiple physics (coupling of thermal-hydraulics, neutronics, structural dynamics, chemistry, etc).

System analysis codes have been in use for many years; their development has greatly advanced the state of the art in two-phase flow, numerical methods, etc. The main tendency in the past was a concentration on a few sophisticated system analysis codes that were expected to do everything; the most recent ones were based on the two-fluid model. There is an emerging consensus now that there is *also* room for problem-specific computing platforms/codes working at a multiplicity of scales, when necessary considering multiple physics, and that can be coupled to the classical system-analysis codes. The NURESIM project in the EU 6th Framework Programme addresses these issues.

Multiple scales - the computational “cascade”

System behaviour and the various physical phenomena taking place in the system can be best addressed at a multiplicity of time/space scales. Let us refer to these as the micro-, the meso- and the macro-scale. The system can, for example, be modelled at the macro-scale; a system component may need to be examined at the meso-scale. Local flow in a critical part of a component may need to be addressed at the micro-scale. At each level of the scale hierarchy, the physics of the flow are best amenable to numerical prediction by scale-specific strategies.

Cross-scale interactions (forward and backscatter between the micro-, meso-, macro-scales) require merging of the solutions delivered by scale-specific approaches at each level of the scale hierarchy. Considering the top-down path, the computations at each level provide the

boundary conditions needed at the lower levels. On the inverse path, starting from the bottom up, the computations at each level will deliver the closure laws needed at the higher level. For example, local, detailed CFD computations may deliver the heat transfer coefficient needed to describe the behaviour of a component, and component behaviour will provide the information needed at the system level. Examples of this cascade of computations are given in the presentation. The way to such multi-scale treatment requires of course mastering of the methods needed at each scale.

Single-phase detailed CFD capability

Certain phenomena in the primary system and in the containment need 3D/turbulent flow treatment: examples are boron or cold water dilution in the primary system, mixing of various gases (steam, air, hydrogen) in the containment, stratification of containment pools, etc. There are clear manifestations of the trend towards the introduction of CFD methods for reactor safety problems. Three-dimensional CFD tools exist (they are available from commercial sources) but their application to large, complex geometries challenges the limits of existing computing power and requires good understanding of the physical and numerical methods as well as of the systems to ensure adequate modelling. Examples are given in the presentation. Recent European programmes have addressed the issues of validation of CFD methods and tools and of good practices in programming. There is a need to also produce large-scale experimental data for the verification of the methods and codes. An example is the international SETH/PANDA programme that produces detailed data on containment phenomena (plumes, mixing, etc).

Computational Multi-Fluid Dynamics or CMFD

Although computational two-phase thermal hydraulics has been applied for almost four decades to reactor safety and design, the simulations were mainly one-dimensional, ignoring the exact shape of the interfaces and describing instead the phases as interpenetrating media; turbulence was largely neglected. The one-dimensional “two-fluid model” has been for a long time the “work horse” in this area. Now these limitations are being removed one by one; in particular, the two-fluid model is employed for 3D problems too. Use is made of CFD methods that model the turbulence. Interface tracking (IT) methods permit now to predict the shape of inclusions, to track small clusters of bubbles, or the configuration of the phases. One can say that single-phase CFD methods are already in use for safety analysis, while applications of CMFD methods will appear in the near future.

Two-Fluid versus One-Fluid formulations

The two-fluid model constitutes the state of the art in reactor safety analysis and is quasi-universally used in all system codes, as already stated. In the two-fluid model, the separate phase conservation equations are based on an averaging procedure that allows both phases to co-exist at any point, according to a certain “phase-indicator function” or essentially a probability that leads to the definition of the local instantaneous void fraction: the approach is also referred to as the “interpenetrating media” formulation. With the two-fluid model, also referred to as the six-equation approach, each phase, governed by its own conservation equations, moves and develops independently. The interfacial exchange terms provide the interactions between the phases.

Although the presence of the interfaces *has* been considered during the local averaging process (and led to the definition of the local interfacial area concentration for the inter-phase exchanges), the characteristics of the interfaces (their exact shape and position) are “lost” in the

interpenetrating-media, formulation. The topology of the phases cannot be obtained and consequently the flow regimes cannot be determined, except by correlation with the average flow conditions. This is fine with many problems, but there are situations where the two phases are sharply separated (at a large scale, such as that of the duct) and full understanding of the situation requires knowledge of the position of the interface. This could be, for example, the case of injection of subcooled water in a pipe with stratified two-phase flow; clearly one needs to know the characteristics of the steam-water interfaces to estimate the rate of condensation taking place there.

Interface tracking methods can be either Lagrangian or Eulerian, and differ by the way the interface motion is tracked. The most frequently employed Eulerian IT methods are the Volume-of-Fluid (VOF) method and the alternative Level-Set (LS) approach. In Lagrangian methods, imaginary particles are typically used to track the motion of the interfaces. The so-called “second gradient method,” based on modelling of the physics of the interface, offers alternative capabilities to VOF and LS.

Dealing with turbulence

The classical methods for dealing with turbulence, i.e., the Reynolds averaged Navier-Stokes formulations (RANS), are being complemented now by more advanced formulations such as the Large Eddy Simulation (LES) that are much more appropriate for dealing with certain situations; they seem to be particularly useful in relation to certain classes of two-phase flows such as bubbly flows.

Bubbly flows where turbulence in the transporting phase, partly generated by bubble motion, plays a determining role have been already treated by CMFD. They have so far been tackled mainly by use of the two-fluid, interpenetrating-media model in conjunction with the conventional RANS approach for turbulence. In this case, both turbulence and the interfacial exchanges are modelled. The use of Large-Eddy Simulation (LES) to capture the turbulent interactions between bubbles and the energy containing large eddies in the continuous phase seems a very promising approach.

Finally, at the finest scale of turbulence treatment, the Direct Numerical Simulation of turbulence (DNS of turbulence) relies on very accurate solutions of the Navier-Stokes equations to provide all the details of turbulent flows. The data obtained this way can be analyzed (as if they were experimental measurements), to derive closure laws. The DNS methods are still confined to very simple geometries (boxes) and to low Reynolds numbers. Increases in computational power will allow computations at higher Reynolds numbers.

Conclusions and Outlook

Efforts are underway to create new, advanced computational tools. Several projects conducted in Europe under the 4th and 5th Euratom Framework Programmes (FWP) (e.g., ASTAR, ECORA) have contributed towards this goal, and the 6th FWP NURESIM project will hopefully integrate this effort. In the future, problems are more likely to be addressed increasingly in 3D, at a variety of scales, in a multi-physics framework, and with a panoply of (partly) new tools and methods, including CMFD.

Single-phase CFD techniques are mature; their application to large nuclear systems is only limited by available computing power. The commercial CFD codes are readily usable for many reactor safety cases, but specific models need often to be added to consider particular phenomena such as condensation on containment walls.

CMFD techniques can already tackle certain flow regimes: the treatment of bubbly flows by LES seems to be promising and Interface Tracking methods such as VOF and Level Sets are

capable of dealing with flows where the interfaces are relatively simple, e.g., stratified flows or wavy annular flows. There are much greater difficulties in dealing with flow regimes presenting complex interfaces, such as churn flows. Thus, it is still not possible to claim, for example, that one can describe all regimes of two-phase flow in a rod bundle with CMFD, although bubbly or droplet flows in a bundle are amenable to computation.

Cascades of computations at different scales are needed to address certain problems. A grand challenge would be to arrive at the CMFD of the Critical Heat Flux conditions.

DNS and more specifically the future DNS of two-phase flows is likely to be successfully used to investigate microscopic phenomena that are not amenable to experimental observation in the manner of numerical experiments.

There is a clear need to consider multiphysics problems. The coupling of codes performing different “physics” is today done with straightforward exchange of variables, in the future, it would be conceivable and probably beneficial to integrate all the physics in a single code; this will require, however, extensive rewriting of codes from scratch.

One can conjecture that as the advanced computational methods mature and their application to problems involving reactor components becomes feasible, the licensing authorities will require their use for safety analysis of LWR systems. The new generations of reactor systems under development are certainly good candidates for such applications.

Some relevant general bibliography

FISA-01 (2001) *Proceedings FISA-2001, EU Research in Reactor Safety*, Luxembourg, 12-14 November 2001.

FISA 2003, *EU Research in Reactor Safety*, Luxembourg, 10-13 November 2003, European Commission.

FISA 2006, *EU Research and Training in Reactor Systems*, Pre-Proceedings, Luxembourg, 13-16 March 2006, , European Commission.

OECD/NEA (2002) *Proceedings of an exploratory meeting of experts to define an action plan on best estimate calculations and uncertainty analysis*, Aix en Provence, France, 13-14 May 2002, NEA/CSNI/R(2002)15 9 (in preparation).

OECD (2000) *Proc. OECD-CSNI Workshop on Advanced Thermal-Hydraulic and Neutronic Codes: Current and Future Applications*, Barcelona, Codes 2000, Barcelona, 10-13 April, 2000.

OECD/CSNI (1998) *Proceedings of the OECD/CSNI Specialist Meeting on Advanced Instrumentation and Measurement Techniques*, Santa Barbara, CA, USA, 17-20 March 1997, NUREG/CP-0160 1998.

G. Yadigaroglu, D. Lakehal, B.L. Smith and M. Andreani (2000) “New Trends and Introduction of Multiphase CFD Methods in Nuclear Engineering”, *The International Conference on Multiphase Systems, ICMS'2000*, Ufa, Russia, June 15-17, 2000.

G. Yadigaroglu, M. Andreani, J. Dreier, and P. Coddington, P (2003) "Trends and Needs in Experimentation and Numerical Simulation for LWR Safety," *Nuclear Engineering and Design*, **221** 205-223.

G. Yadigaroglu (2003) "Application of Cascades of CFD Methods to Two-Phase Flow Problems," *Trans. Inst. of Fluid-Flow Machinery* (Poland), **112**, pp. 47-55.

G. Yadigaroglu (2003) “Computational Fluid Dynamics for Nuclear Applications: from CFD to Multi-Scale CMFD”, Plenary introductory lecture, Pre-Proceedings *FISA 2003, EU Research in Reactor Safety*, Luxembourg, 10-13 November 2003, European Commission.

G. Yadigaroglu and D. Lakehal (2003) “New Challenges in Computational Thermal Hydraulics,” invited plenary lecture, The 10th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-10) Seoul, Korea, October 5-9, 2003.

Selected key references on CMFD methods

C.W. Hirt and B.D. Nichols (1981) Volume of Fluid Method (VOF) for the Dynamics of Free Boundaries, *J. Comput. Physics*, **39**, pp. 201-225.

D. Jamet, O. Lebaigue, N. Coutris, and J.M. Delhay (2001) The Second Gradient Method for the Direct Numerical Simulation of Liquid-Vapor Flows with Phase Change, *J. Comput. Physics*, **169**, pp. 624-651.

R.T. Lahey and D.A. Drew (1988) The Three-Dimensional Time and Volume Averaged Conservation Equations of Two-Phase Flow, *Adv. Nucl. Science and Technology*, **20**, pp. 1-69.

M. Lance, J.L. Marié and J. Bataille (1999) Turbulence in Bubbly Flows: from Experiments to Numerical Modelling, *Two-Phase Flow Modelling and Experimentation 1999*, G.P. Gelata, P. Di Marco and R.K. Shah (Eds.), Edizioni ETS, Pisa, pp. 17-27.

M. Lopez de Bertodano, R.T. Lahey, Jr. and O.C. Jones (1994) Development of a k- ϵ Model for Bubbly Two-Phase Flow, *ASME J. Heat Transfer*, **116**, pp. 128-134.

M. Sussman, P. Smereka and S. Osher (1994) A Level Set Approach for Computing Solutions to Incompressible Two-Phase Flow, *J. Comput. Physics*, **114**, pp. 146-159.

G. Tryggvason, B. Bunner, A. Esmaeeli, D. Juric, N. Al-Rawahi, W. Tauber, J. Han, S. Nas, and Y.-J. Jan (2001) A Front Tracking Method for the Computations of Multiphase Flow. *J. Comput. Physics*, **169**, pp. 708-759.

S.O. Unverdi, G. Tryggvason (1992) A Front Tracking Method for Viscous Incompressible Flows, *J. Comput Phys*, **100**, pp. 25-37.

G. Yadigaroglu (2003), Letter to the Editor, CMFD (a Brand Name) and Other Acronyms,” *Int. J. Multiphase Flow*, **29**, pp. 719–720.

CFD and CMFD for Reactor Safety: Prospects and Examples

*Prof. em. G. Yadigaroglu
Eidg. Technische Hochschule Zürich, ETHZ
(Swiss Federal Institute of Technology)
and
ASCOMP GmbH
yadi@ethz.ch*

Contents

- **Trends:** advanced computational tools
 - needs, opportunities, challenges
 - 3D computations, multi-phase, multi-physics, coupled
- **Single-phase CFD**
 - test cases: ISP PANDA, SETH, ...
- **Multiphase CFD:** *C/M*FD techniques and cascades of computations
 - Two-fluid vs Single-fluid + Interface Tracking approach
- **Bubble plumes:** experiments, computations
- Tackling nuclear problems with **commercial codes**

Summary: The opportunities - the challenges

The opportunities:

- the tremendous increase in **computing power**
- the maturity of state-of-the-art **CFD** methods (applied today mainly to single-phase flow problems)
- the emergence of Computational *Multi-Fluid Dynamics* (**CMFD**) methods

The challenges:

- Create the **new computational tools** that will be used for
 - the more sophisticated analysis of the **present reactors**, and
 - the design and analysis of **new generations** of reactors
- We will likely be addressing in the future new simulation needs with **increasingly sophisticated numerical methods and modelling approaches** and in much greater **detail**:
⇒ **Multi-dimensional, multi-scale, multi-physics** approaches
- we must produce correspondingly sophisticated **experiments and data** (detailed, more basic, often 3D)

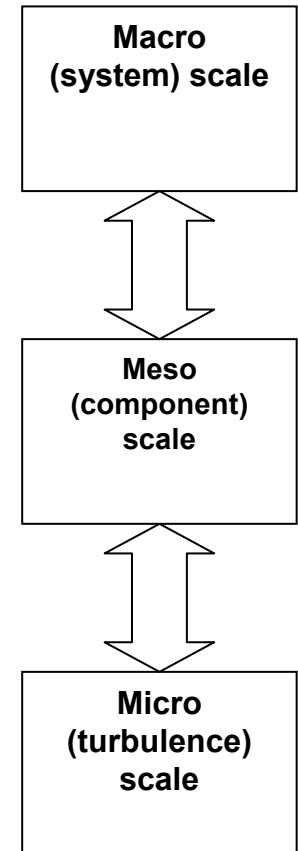
➔ **New very interesting challenges to the t/h community**

“New” ways of doing things

- The **main effort in the past**: the development of a few sophisticated **system analysis codes** (expected to do everything) - based on **two-fluid model**
- There is also room for **problem-specific computing platforms/codes**:
 - working at a **multiplicity of scales**
 - when necessary considering **multiple physics**
 - **coupled** to the classical system analysis codes
- The NURESIM project (EU 6th FWP) addresses these issues

Multiple scales - the computational “cascade”

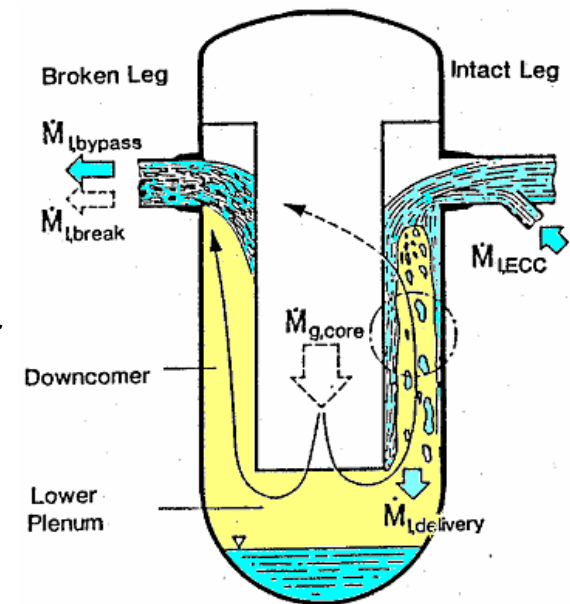
- Various phenomena can be best addressed at a **multiplicity of time/space scales**:
 micro-, meso-, macro-... scale
- At each level of the **scale hierarchy**, the physics of the flow may be amenable to numerical prediction by **scale-specific strategies**
- **Cross-scale interactions** (forward and backscatter between micro-, meso-, macro-scales) require **merging** of the solutions delivered by scale-specific approaches at each level of the scale hierarchy



Single-phase CFD applications

Single-phase detailed CFD capability

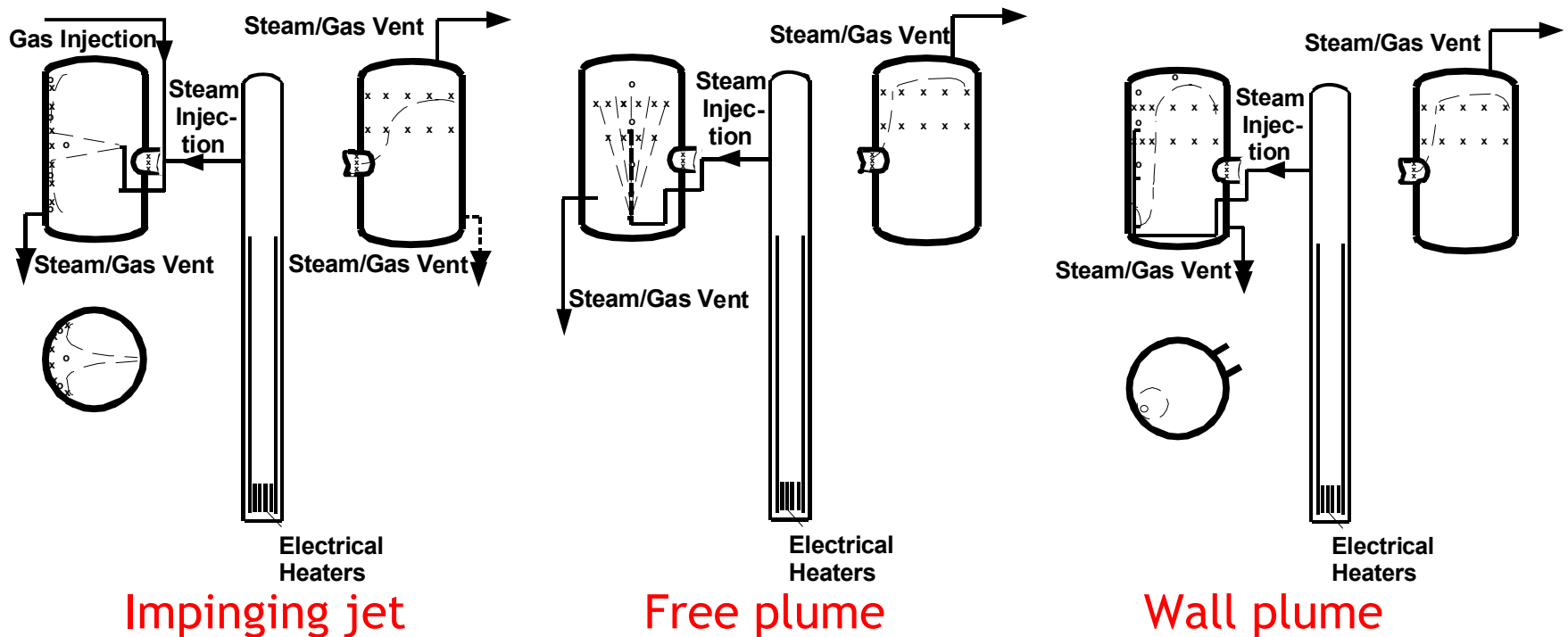
- **Certain phenomena** in the primary system and the containment **need 3D/turbulent flow** treatment:
 - boron dilution in the primary system
 - mixing of various gases (steam, air, hydrogen) in the containment
 - stratification of containment pools
 - etc
- **3D CFD tools exist** but their application to complex 3D geometries challenges the limits of existing **computing power** and requires **computing skills**
- Manifestations of trend towards CFD are clear
Examples: ISP-42, ISP-47, SETH/PANDA



Need for detailed data: The OECD/NEA SETH Project in PANDA

- “...model validation based on *large scale tests* [is] important...” [SESAR-CAF, Capabilities and Facilities, 1997]: SETH/PANDA tests
- Objectives: study mixing and distribution of **steam/air/He** in multidimensional, multi-compartment, “clean” geometries. **Very extensive instrumentation.**

Good opportunity for testing CFD and 3D containment tools



The ECORA Project

(M. Scheuerer et al. NED, 2005)

Objectives:

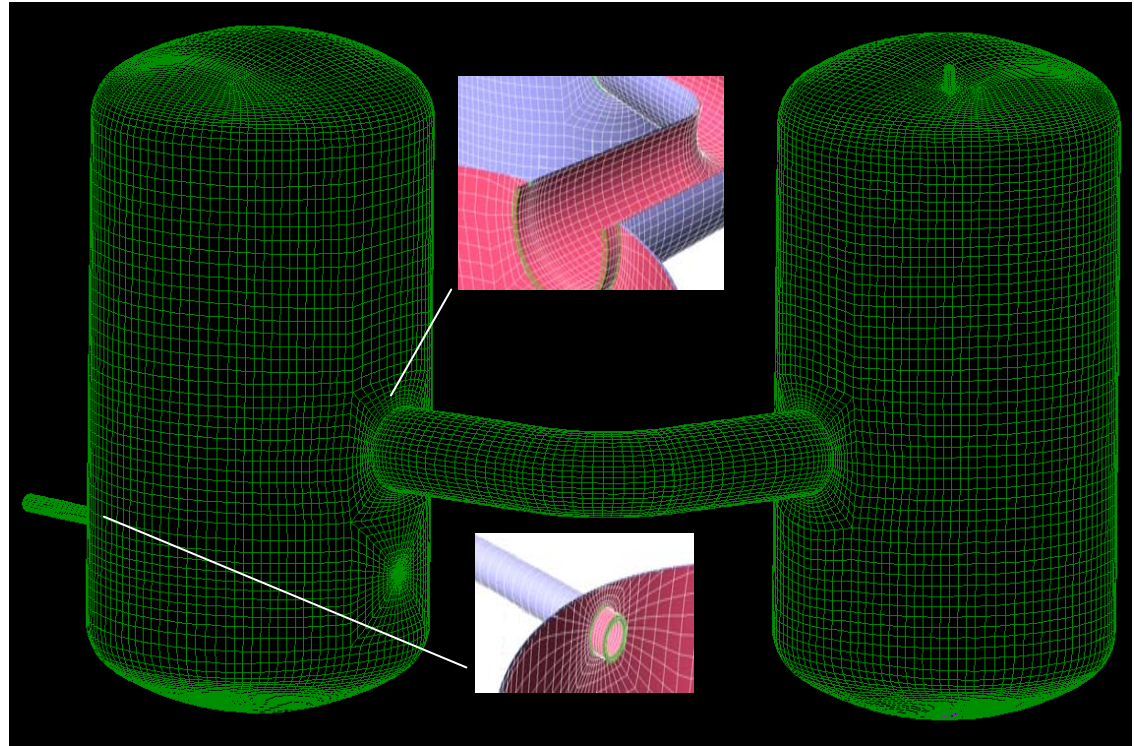
the evaluation of computational fluid dynamics (CFD) software for reactor safety applications

- establishment of **Best Practice Guidelines** for use of CFD codes, for judgment of CFD calculations and for assessment of experimental data
- **assessment of CFD simulations** for three-dimensional flows in LWR primary systems and containments
- quality-controlled CFD simulations for **selected UPTF and SETH PANDA** test cases; and
- demonstration of CFD code customization for **PTS analysis** by implementation and validation of improved turbulence and two-phase flow models.

ECORA Project, simulations with CFX-4 at PSI

Andreani et al., *Ann. Mtg on Nucl. Techn.* 2005, Nuremberg

- Three meshes (300'000, 700'000, 1'100'000 cells), two time steps, two turbulence models - for early transients only
- Strict application of BPG not possible (computing limits).

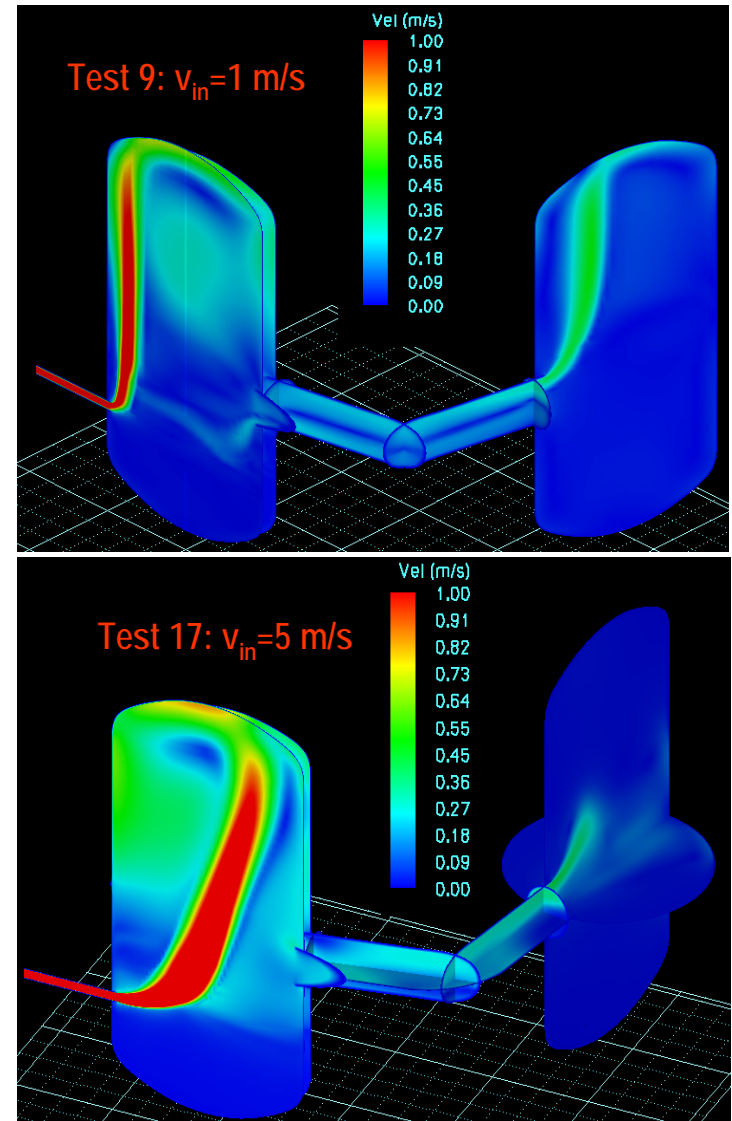


- Large computation times (without a parallel cluster) prevented the analysis of the entire transient.
- Mesh insensitivity not achieved in early transient.

Results of simulations with CFX-4, CFX-5 and GOTHIC

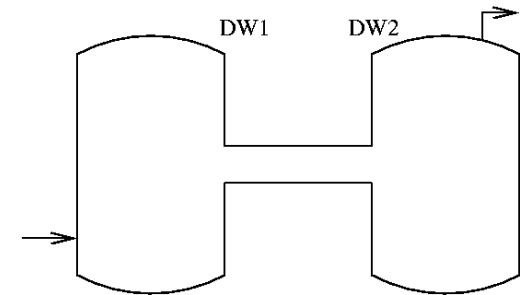
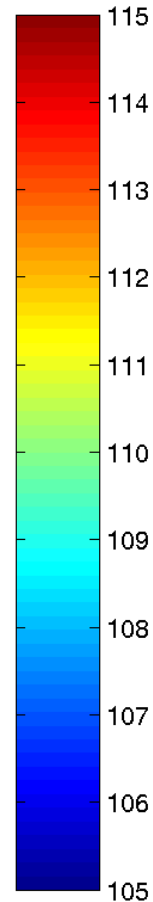
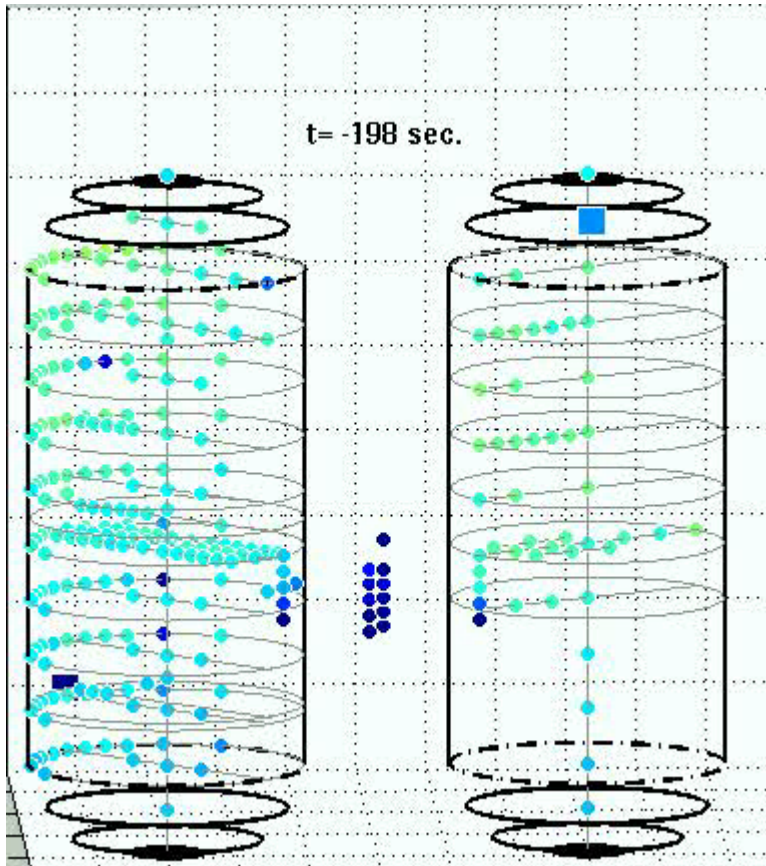
- Calculations performed with CFX-4, but also with CFX-5 (only one mesh, the intermediate mesh, 700'000) and GOTHIC (20'000 cells, very coarse), all with k- ϵ model.
- Test 9 (low momentum steam injection in an air-filled vessel): a plume close to the wall develops
- Test 17 (higher momentum injection): a bent jet is predicted

Andreani et al., *Annual Meeting on Nuclear Technology 2005*, Nuremberg



SETH/PANDA Test 17

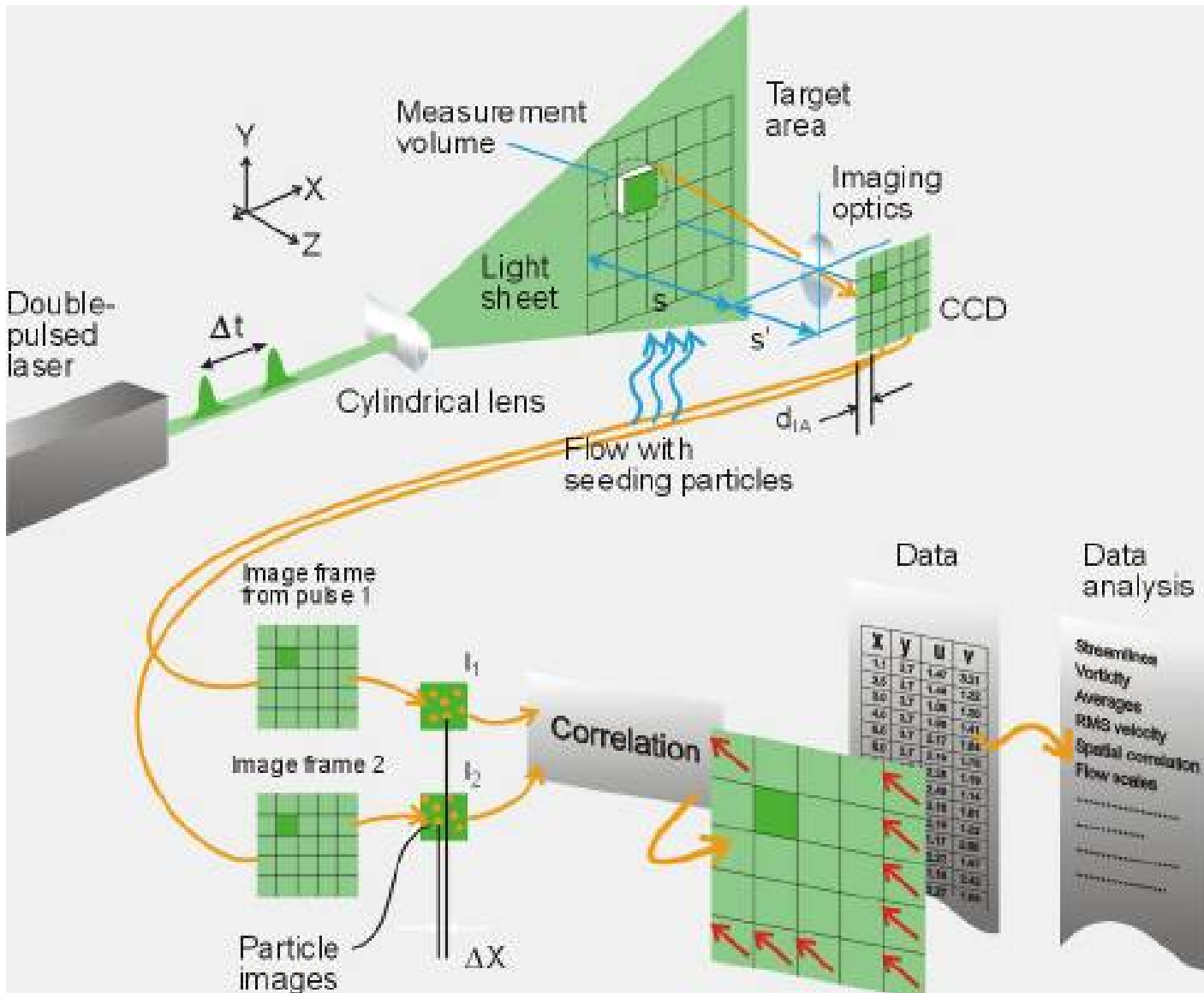
Conventional instrumentation (TC's)



- Grid of 269 K-type thermocouples in the DW volume
- The plume signature is visible in DW1
- As expected, much lower DT in DW2

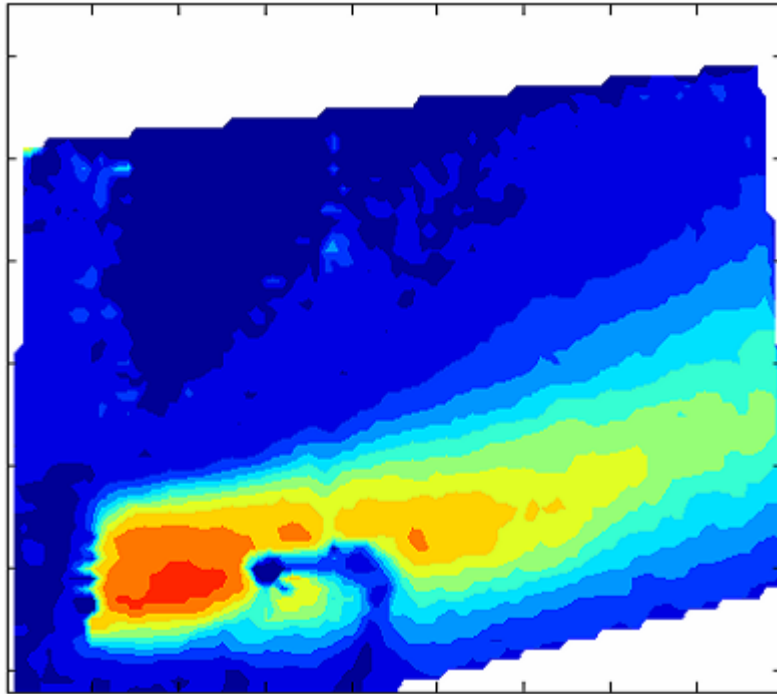
Work performed at PSI:
O. Auban, F. de Cachard,
M. Huggenberger, D. Paladino and
R. Zboray

Advanced instrumentation: PIV Technique

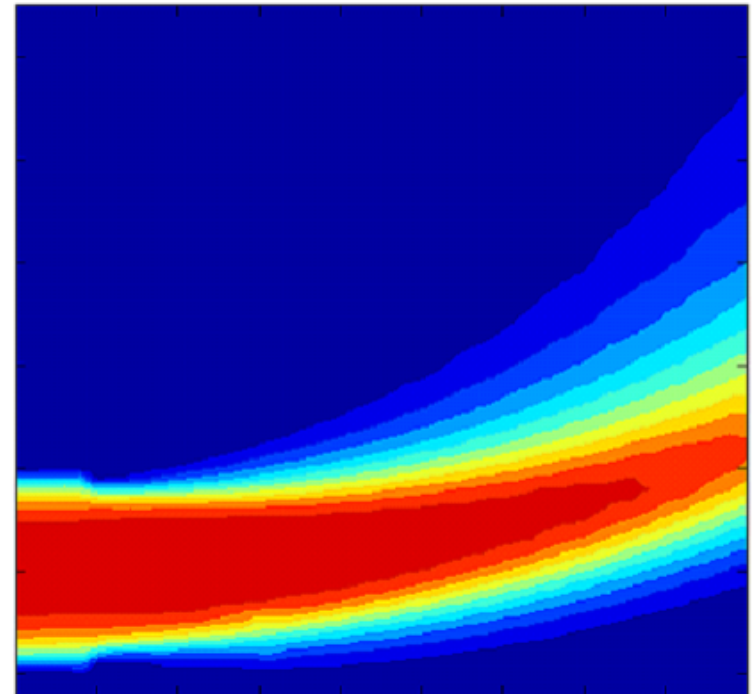


Comparison of PIV measurement with CFX-5 prediction for Test17_4

PIV measurement result



CFX-5 prediction



- Qualitatively similar shapes of the jet
- 5-10% larger velocities are predicted by CFX (only raw comparison, should be further examined!)
- PSI work 2005 by O. Auban, P. Candreia, F. de Cachard, M. Fehlmann, M. Huggenberger, D. Paladino, H. Strassberger, R. Zboray

Some early conclusions from simulations of PANDA tests (Andreani et al., PSI)

- The first results simulation obtained for the simulation of Tests 9, 16 and 17 indicate:
 - In general, some coarse mesh models (like GOTHIC, EPRI, used as 3D coarse-mesh code and using the k-epsilon model for turbulence) seem to be **capable of simulating the most important aspects of the flows investigated** (flow structure in fluid receiving vessel, inter-compartment transport, stratification). In particular the **effect of the injection velocity on the jet trajectory** in the injection vessel is well predicted.
 - Lumped-parameter codes (with a few hundred nodes) showed limited success (they were, however, tuned/adjusted for the phenomena to be simulated)
- “The use of [fine-mesh] CFD codes seems to lead to only little gain in accuracy, [compared to ad-hoc coarse-mesh codes] at the cost of much larger computation times.”

Two-phase CMFD applications downward facing vent, bubble plumes

Safety issues that may benefit from the use of CMFD

	Safety issue	Maturity of CFD tools
1	DNB, dry out and CHF investigations	M
2	Subcooled boiling	M
3	Two-phase pressurized thermal shock	M
4	Direct contact condensation: steam discharge in a pool	M
5	Pool heat exchangers: thermal stratification and mixing problems	H
6	Corrosion Erosion deposition	L
7	Containment thermal-hydraulics	H
8	Two-phase flow in valves, safety valves	L
9	ECC bypass and downcomer penetration during refill	L
10	Two phase flow features in BWR cores	M
11	Atmospheric transport of aerosols outside containment	M
12	DBA reflooding	M
13	Reflooding of a debris bed	L
14	Steam generator tube vibration	L
15	Upper plenum injection	L
16	Local 3-D effects in singular geometries	L
17	Phase distribution in inlet and outlet headers of steam generators	L
18	Condensation induced waterhammer	L
19	Components with complex geometry	L
20	Pipe Flow with Cavitation	M
21	External reactor pressure vessel cooling	M
22	Behaviour of gas-liquid interfaces	M
23	Two-phase pump behaviour	L
24	Pipe Break-In vessel mechanical load	M
25	Specific features in Passive reactors	M

Field still at its
“infancy”

OECD-CSNI GAMA
Report of WG3

“Extension of CFD
to Two-phase Flow
Safety problems”
2005

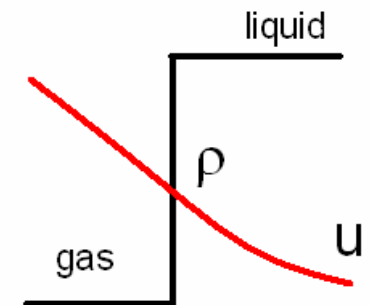
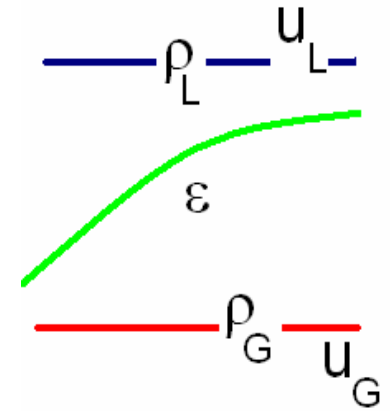
NEA/SEN/SIN/AMA(2006)2

Introduction of new, multi-phase C_MF_D techniques

- Two- (or multi-) fluid (**interpenetrating-media**) model

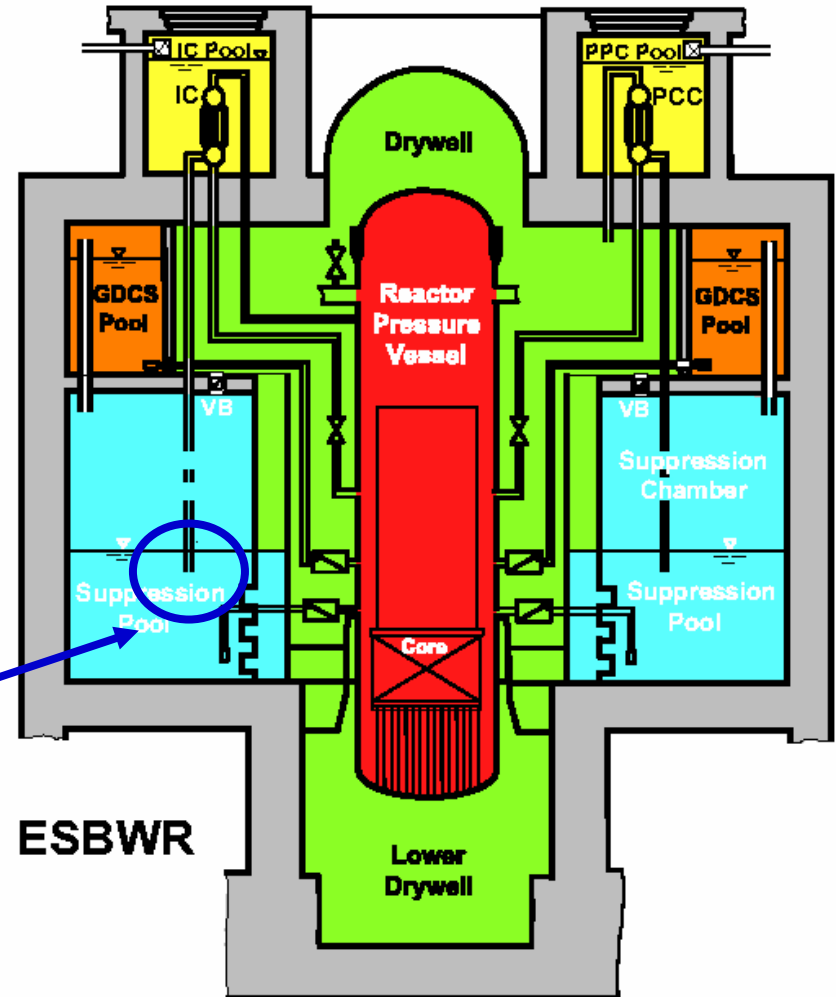
vs

- interface tracking in combination with one-fluid model:**
 - tracking of the interfaces separating the phases
 - Lagrangian markers
 - Volume of Fluid methods - VOF
 - Level Set methods - LS
 - The Second-Gradient method
 - Embedded Interface methods
 - and solving a single fluid-dynamics problem with different properties in each phase
→ the **one-fluid approach**



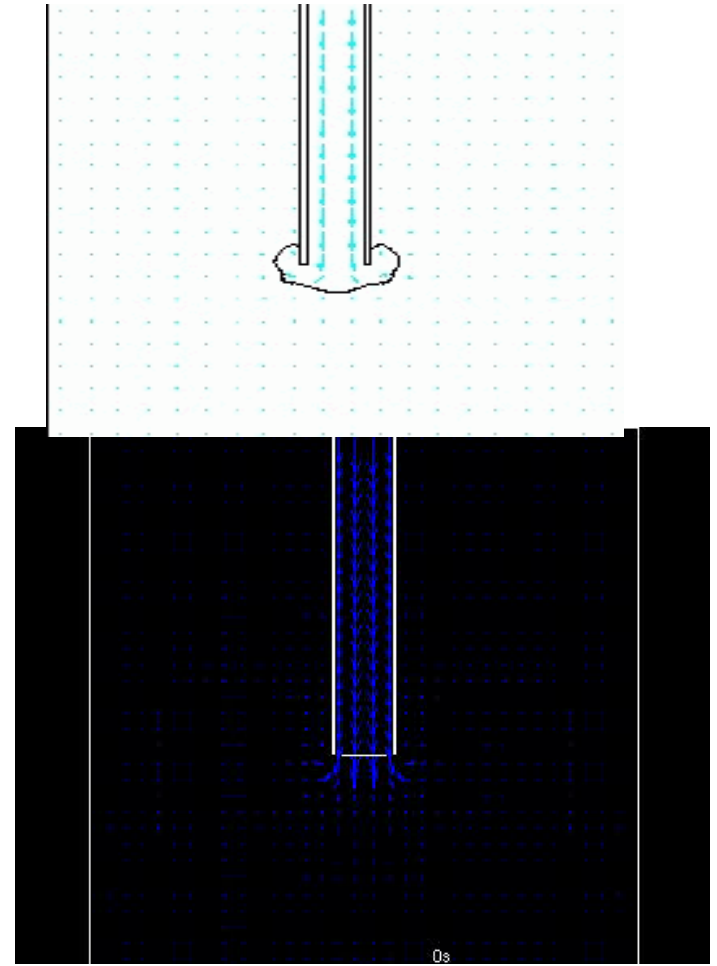
Example: *cascade* of computational analysis steps

- In the ESBWR (a “passive” BWR) a mixture of steam and non-condensable gases is injected in a pool of water
- The behavior of the large bubble created at the vent is important
- 1st level: system analysis with system code

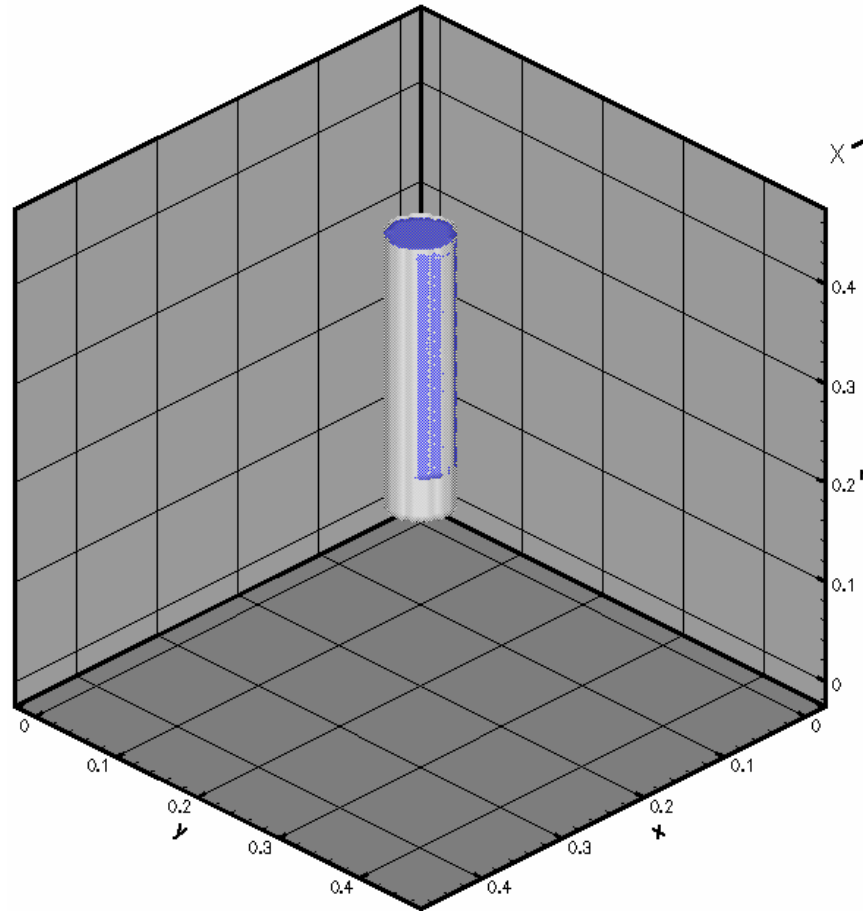


2nd level: Interface tracking with Volume of Fluid (VOF)

- Use the interface tracking (VOF) method to **compute the shape of the interface**.
- Results for axisymmetric computations without heat and mass transfer (Meier et al., 2000)



3D results (Liovic, 2003) 16 I/s



3rd level: interfacial heat/mass transfer

- **Difficulty:**

Boundary layers controlling heat and mass transfer on both sides of the interface are very thin:

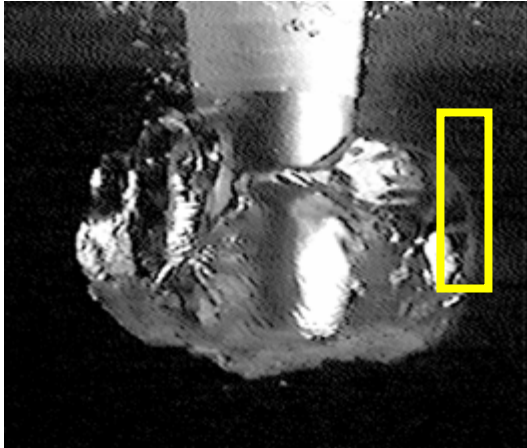
- liquid side: fraction of a mm
- gas side: of the order of mm or less
 - IT methods cannot resolve these sublayers
- Heat and mass transfer coefficients “cannot be measured”
- **compute interface heat and mass transfer with DNS *of the turbulence* near the interface...**

Direct Numerical Simulation *of turbulence*, DNS

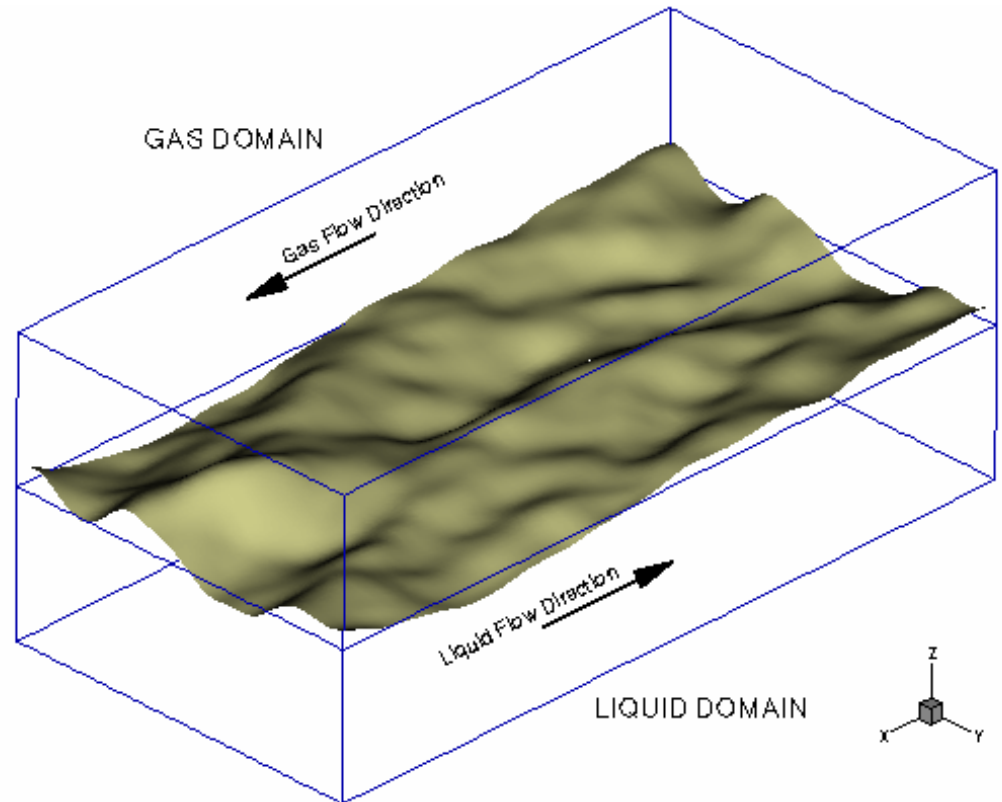
- Use only the Navier-Stokes equations
- Resolve all scales of turbulence using a very fine grid; no models of turbulence used
- Need to use a very accurate numerical method
- Produce a datafile with all the flow details: analyze to understand the physics and “measure” quantities of interest (e.g. friction factor, htc)

- Limited in practice only by the computational resources
- The methods used can be typically applied only to “boxes” - limited for the time being to basic problems

DNS for interface heat and mass transfer

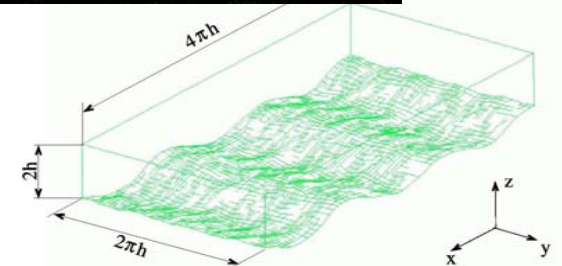
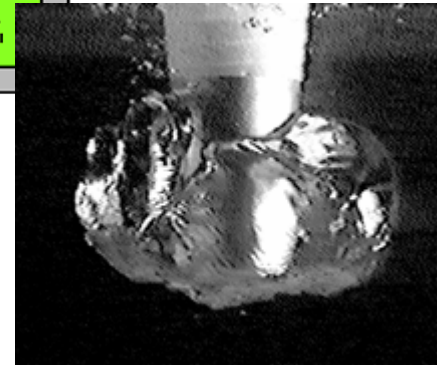
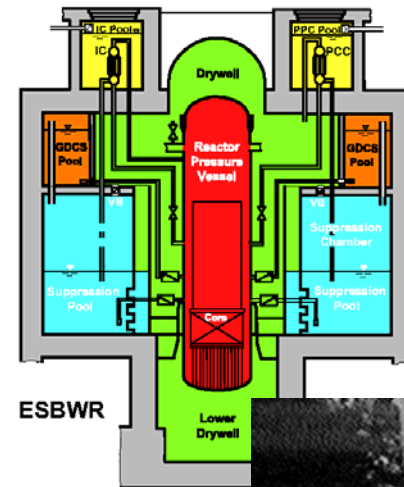


- DNS of the flow in the two domains and coupling at the interface via jump conditions
- The interface is free to deform and it is tracked



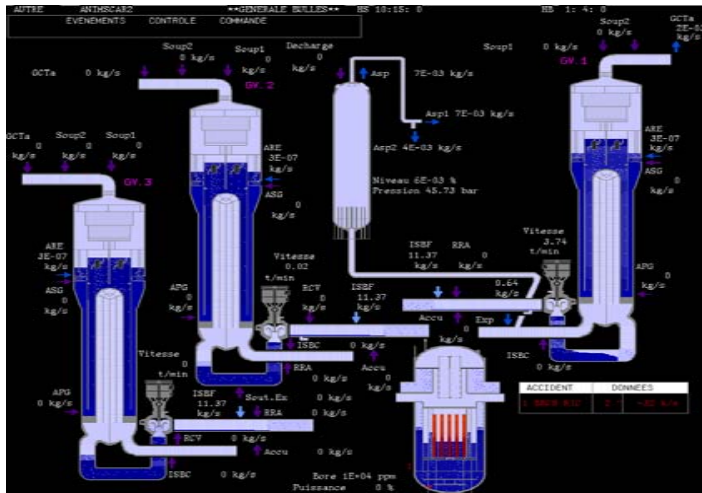
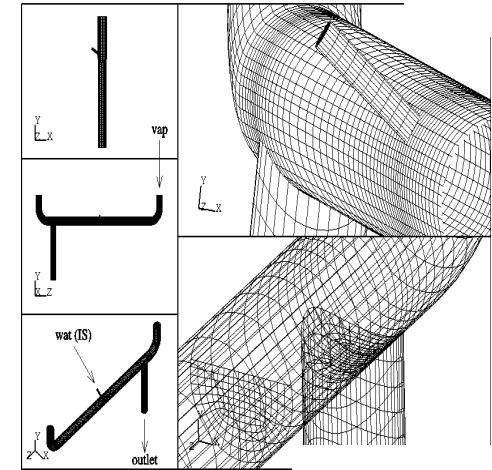
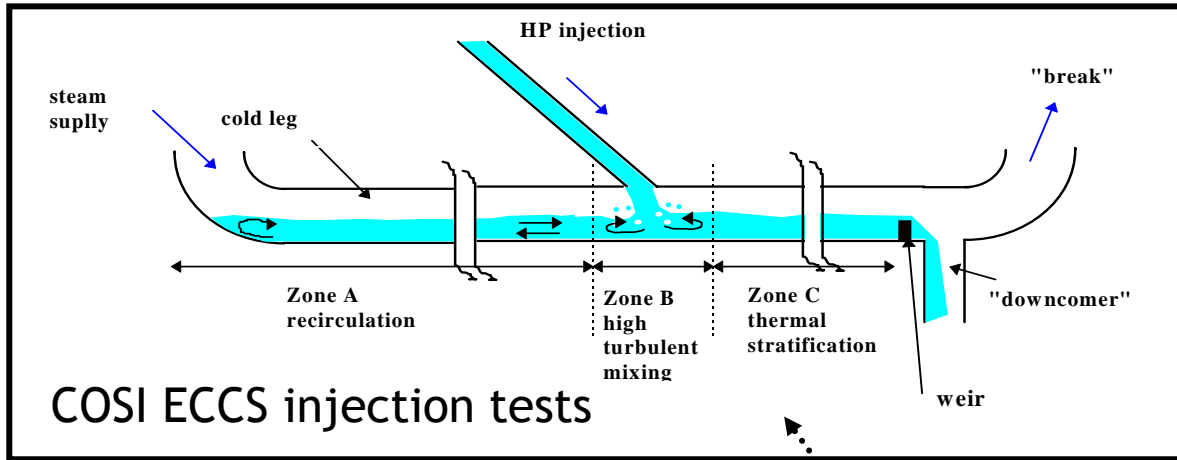
A cascade of methods to approach the problem

- **System** analysis to define overall system behavior
- **VOF** to obtain the **shape of the interface** and the dynamic behavior of the bubble: rise, fragmentation, etc
- **DNS** of the turbulence at the interface to get **heat and mass transfer laws**



A second cascade

Modelling PTS with CMFD (Bestion, Zurich 2006)

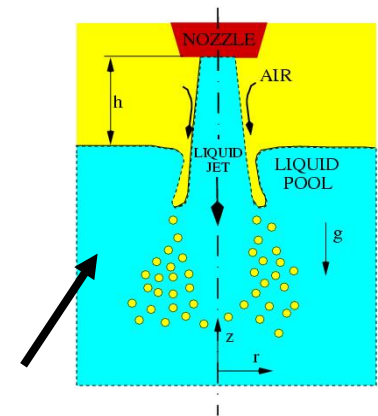


Important phenomena
have to be simulated

← At system scale

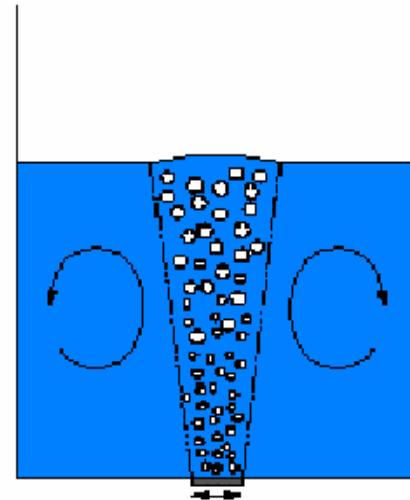
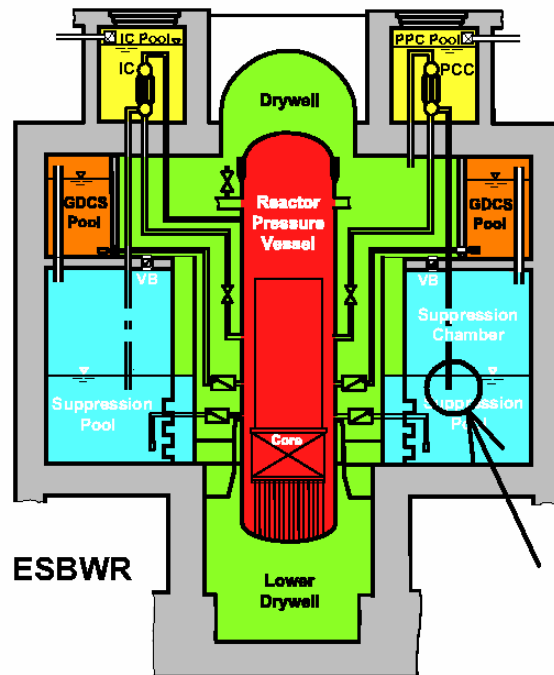
At local scale (RANS)

Up to microscopic
scale? (IT ?)



Bubble Plumes in pools

- Motivation: understanding the behavior of plumes vented into suppression pools in BWRs
- Experimental work and two-phase, turbulent liquid, **interpenetrating-media**, LES:
- LES seems to be particularly well suited for bubbly flows



Large Eddy Simulation (LES) of Bubble Plumes

- LES: resolve the large scales + model the small (sub-grid) scales:
can work with larger meshes: less computational effort
- An LES should be able to **resolve** the **large-scale structures (large, energetic eddies) driving the bubbles**
subgrid-scales may not be important in driving the motion of the bubbles

but:

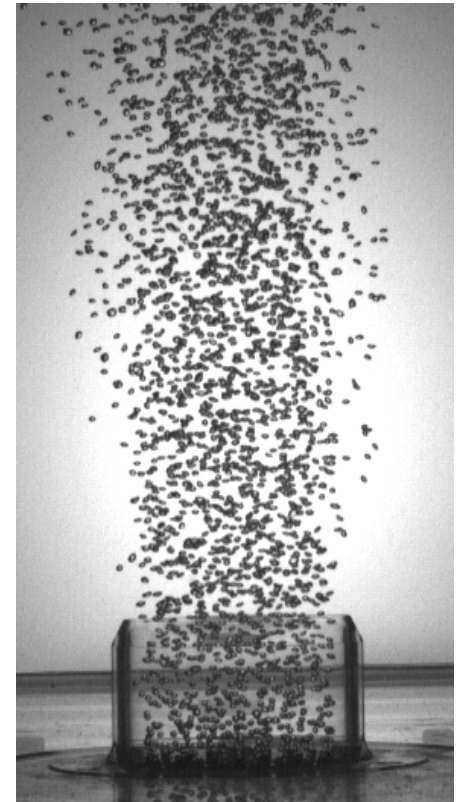
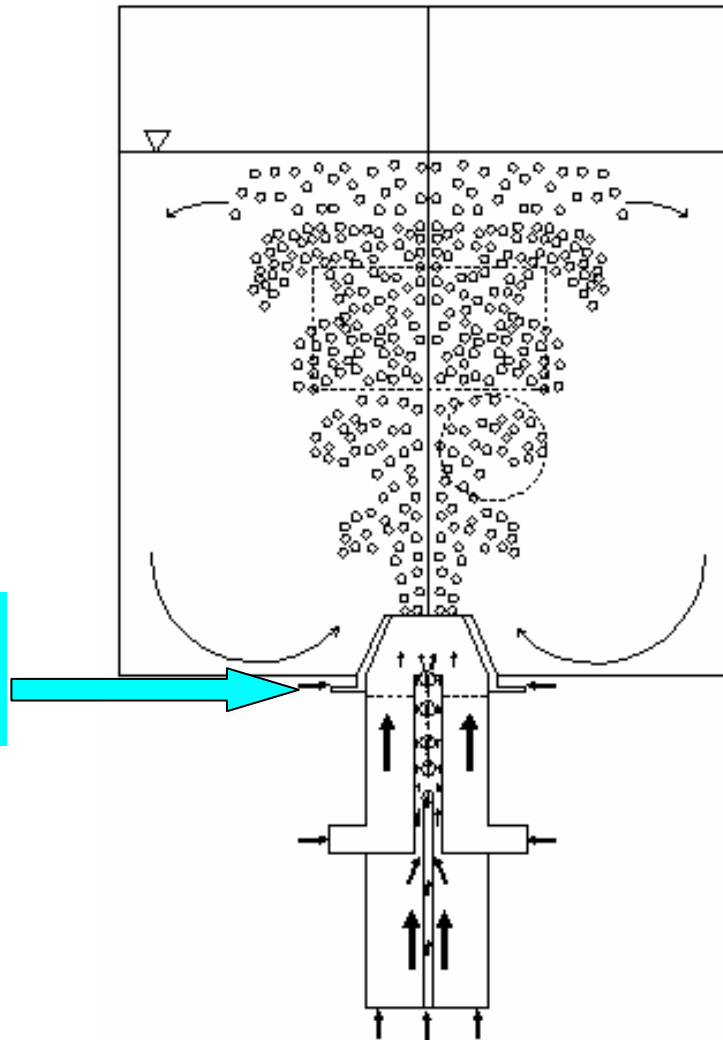
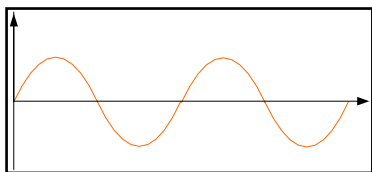
- **Fundamental difficulty in defining the mesh size** (subgrid-scale cutoff):
two scales:
 - scale of turbulence in the liquid, and
 - scale of the size of the bubbles
- Conducted a systematic evaluation of the effects of the relative grid size / bubble size on the results (Milelli et al., 2001)

Two very recent experimental investigations of bubbly flows particularly well suited for CMFD (LES) validations.
Ensemble average data collected

A triggered-jet experiment (Milenkovic, 2005)

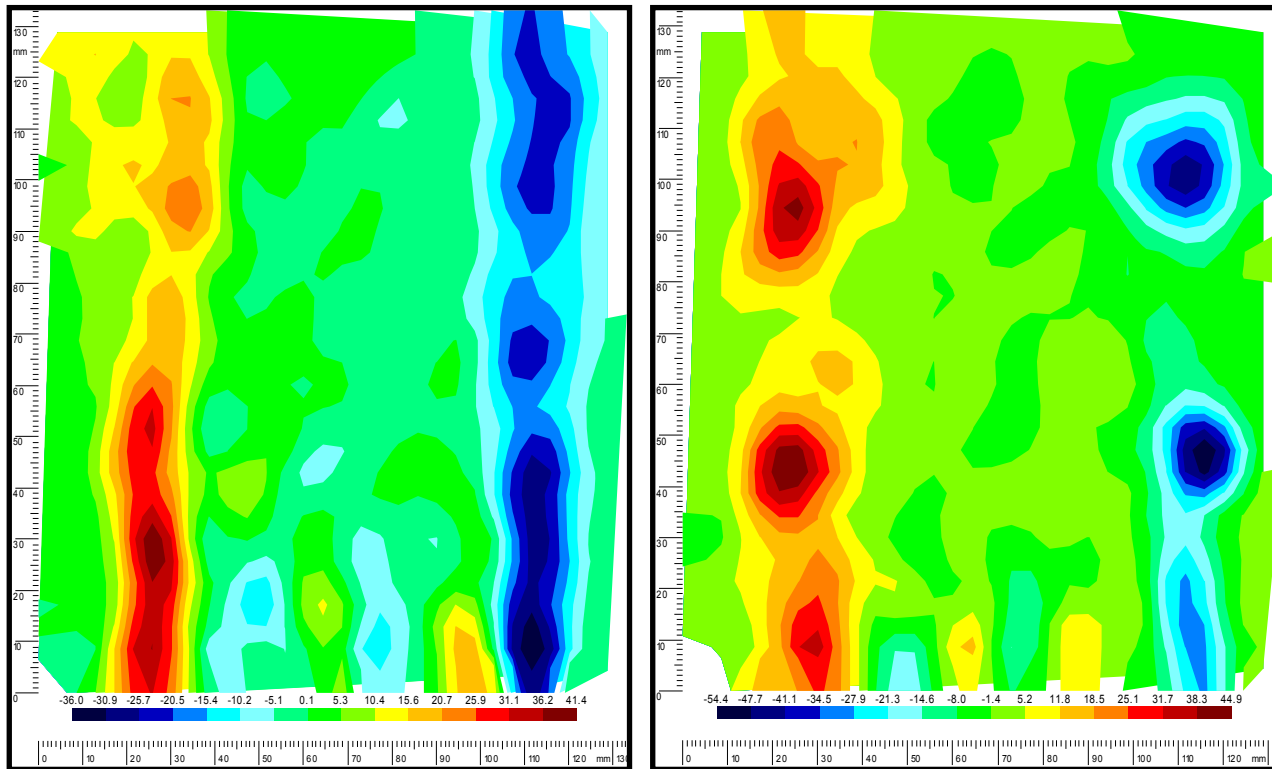
Bubbly jet created with uniform but variable bubble sizes

Jet periodically excited with an oscillatory annular, concentric flow



Natural jet instabilities, enhanced by the periodic triggering create large structures (eddies) in the flow.

Phase (ensemble) averaged PIV data: vorticity



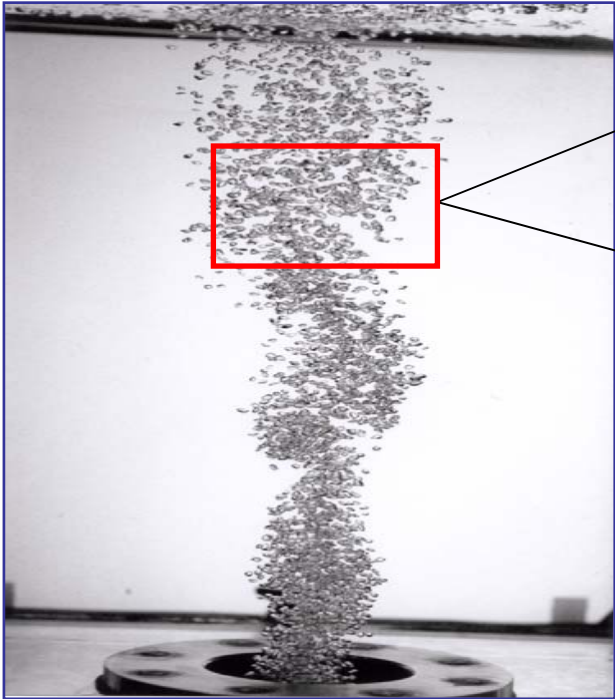
Azimuthal Vorticity component of the liquid velocity for naturally-developing (left) and periodically-triggered jets (right) obtained by PIV.

Excitation of the jet leads to concentration of the shear-layer vorticity in coherent ring structures and to trapping of bubbles in these rings.

Source: Milenkovic, 2005

Two-phase PIV of an unstable bubble plume

Simultaneous L and G velocity field capture



Bubble plume in a small facility used to test and set up the PIV system

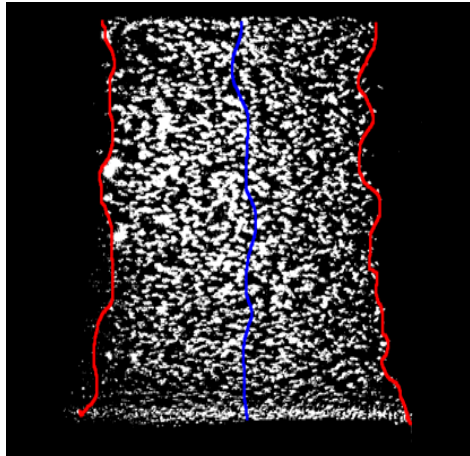
Source: Simiano, 2005

With a green filter, the CCD camera catches the light reflected at 90° by the interfaces of the bubbles

With an orange filter, the CCD camera catches the light emitted by fluorescent seeding particles in the liquid

- The plume is naturally unstable. Meandering and instabilities create a spreading of the plume on the *average*.
- **Important to get instantaneous data.**

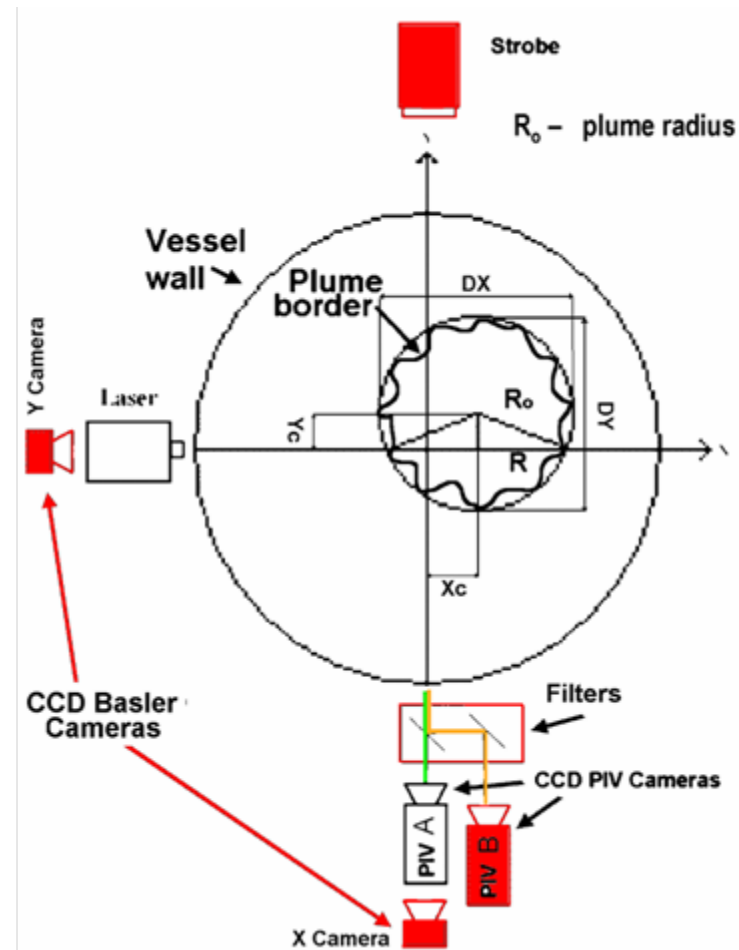
Observing the shape of the oscillating plume



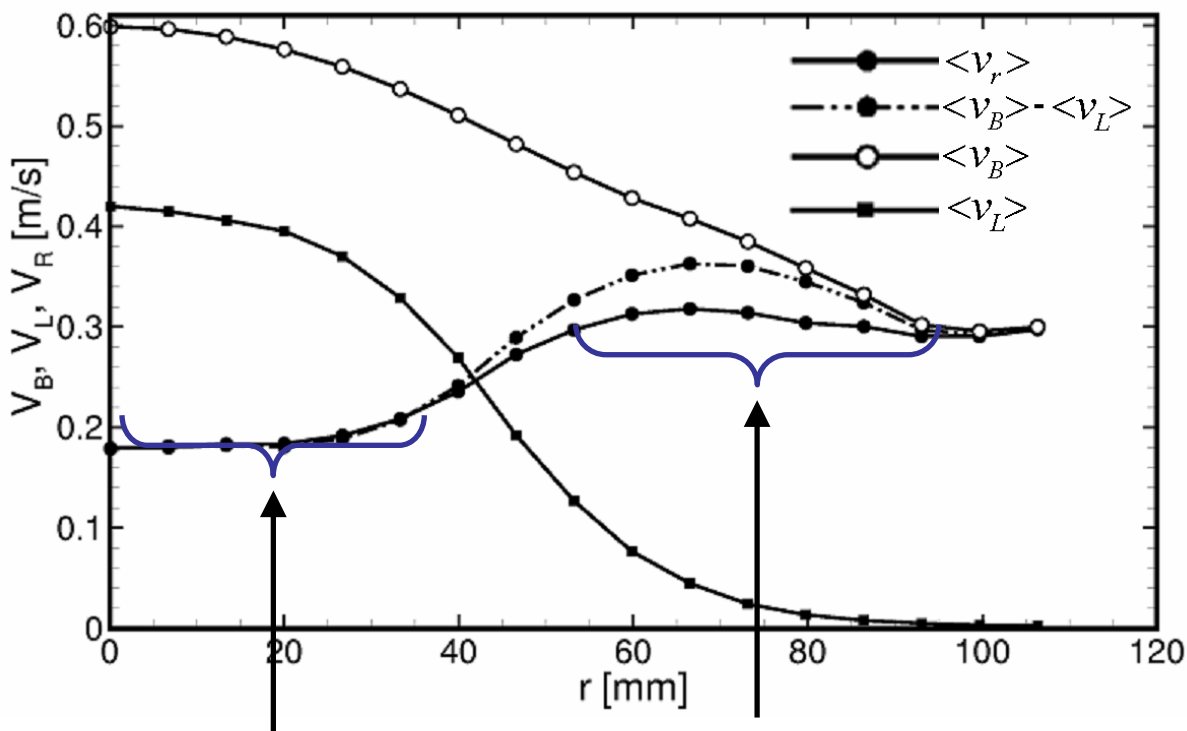
Plume contours are obtained
by image processing



- Two PIV cameras: obtain liquid and bubble velocities simultaneously and
- at the same time, take two pictures at 90° of the plume, to record its exact position/state
- Produce ensemble-average data according to plume position and state
- Source: Simiano, 2005



Instantaneous Bubble, Liquid and Relative Velocity Fields (Simiano, 2005)



$$\langle v_r \rangle = \langle v_B - v_L \rangle$$

$$\langle v_r \rangle \neq \langle v_B \rangle - \langle v_L \rangle$$

Perfect overlap near the plume centre

Discrepancies in the plume edge

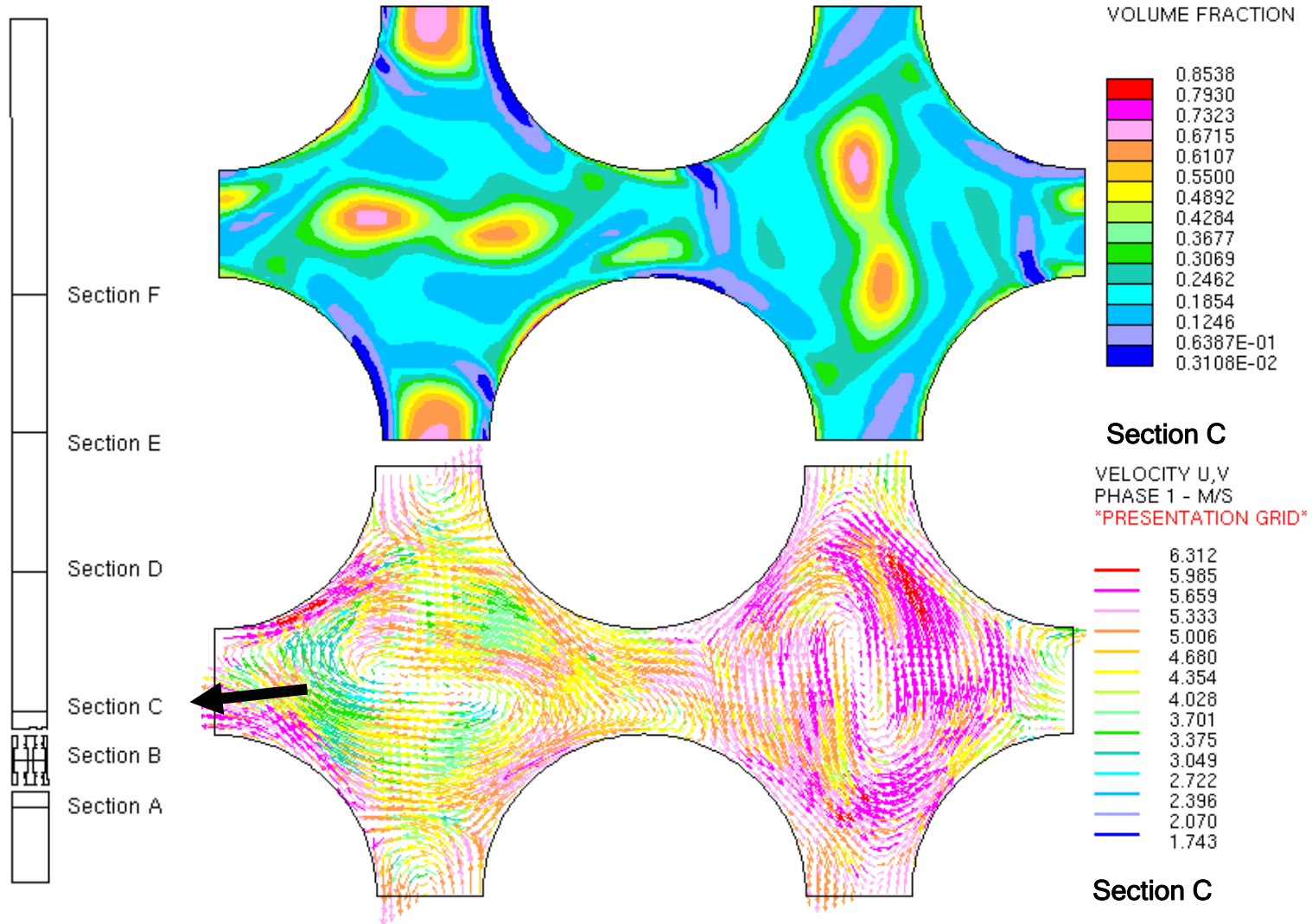
Results with commercial codes

Subchannel analysis

Coupled, thermal-hydraulic (CFD) - neutronic calculations

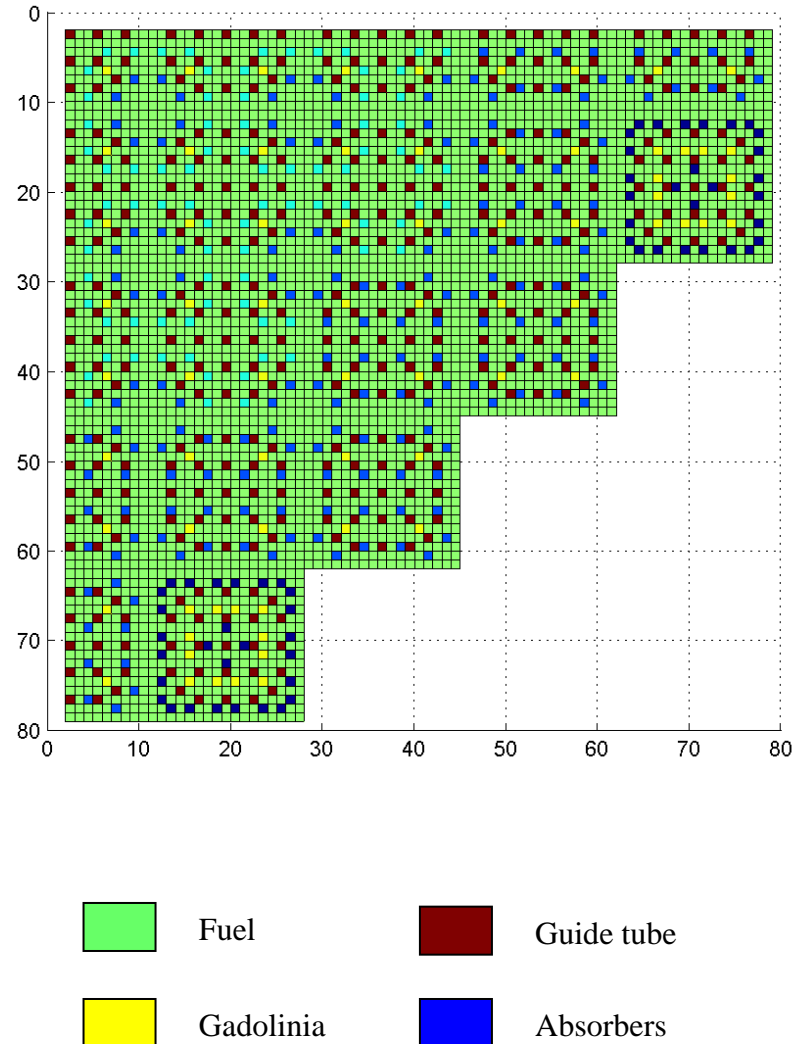
Swirling flow and phase separation after spacer grid

S. Lo with STAR-CD (Zurich, 2006)



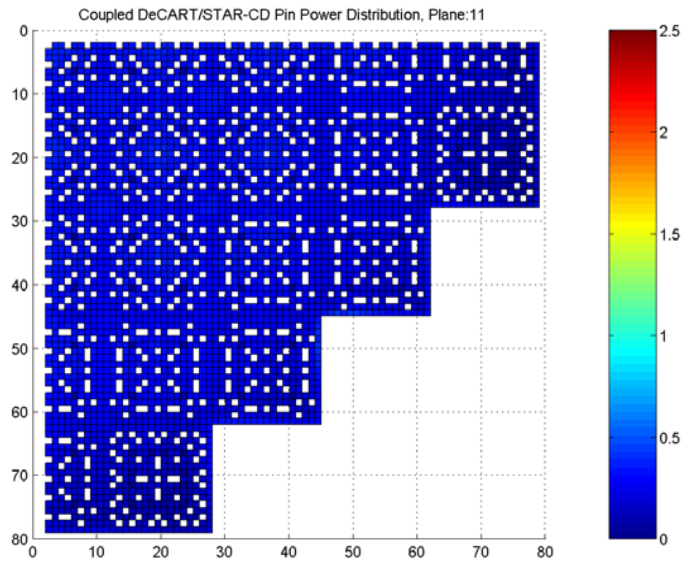
Small PWR Core (S. Lo, Zurich 2006)

- 3½ million flat flux regions in DeCART (1/4 core)
- 64 million cells in STAR-CD (1/8 core)
- ANL Beowulf cluster *jazz*:
 - 12 processors for DeCART
 - 57 processors for STAR-CD
 - 1 processor for the external interface
- Steady-state calculations required ~11 hours (not optimized)
- Work conducted cooperatively by CD-adapco, SNU, ANL, Purdue U., KAERI

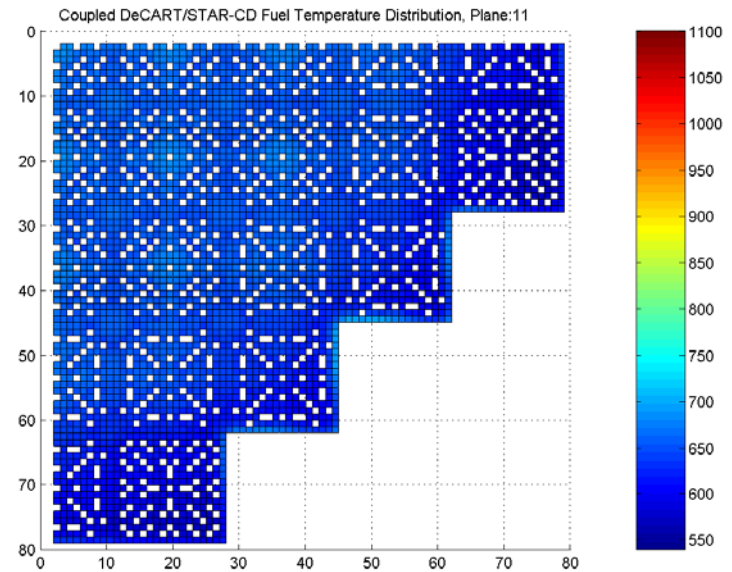


Coupled Results: Temperature & Pin Power

Pin Power



Avg. Fuel Temperature



Conclusions

- Efforts underway to create new, advanced computational tools; a challenge to the community and lots of work needed
- Several projects conducted in Europe under the 4th, 5th (ASTAR, ECORA, ...) and 6th FWP (NURESIM)
- In the future, problems are more likely to be addressed increasingly in 3D, at a variety of scales, in a multi-physics framework, and with a panoply of (partly) new tools and methods (including C/MFD)
- Additional challenges for the future:
 - Tackle really difficult problems like critical heat flux
 - Merge the physics instead of simply coupling the codes

Acknowledgments

The author is indebted to all his doctoral students, ETH, PSI and ASCOMP associates who contributed directly or indirectly to this presentation.

In particular thanks to:

M. Andreani, F. de Cachard, H.M. Friess, M. Fulgosi,
D. Lakehal, P. Liovic,
M. Meier, M. Milelli, R. Milenkovic, M. Simiano,
B. Smith, R. Zboray

Vorsorge- und Nachrüstmaßnahmen in deutschen Kernkraftwerken: Auswirkungen auf den Anlagen- betrieb und die Störfallbeherrschung

Volker Noack, RWE Power AG, Essen

Hermann Ohlmeyer, Vattenfall Europe Nuclear Energy GmbH, Hamburg

KTG-Fachtagung 3.-4. April 2006

Barsebäck-Thematik

Vorsorge- und Nachrüstmaßnahmen in deutschen Kernkraftwerken: Auswirkungen auf den Anlagenbetrieb und die Störfallbeherrschung (DWR)

Barsebäck-Ereignis, Übertragbarkeit und sicherheitstechnische Relevanz

Am 28.7.1992 kam es beim Wiederaufstart der Anlage Barsebäck-2 zum Fehlöfnen und Offenbleiben eines Sicherheitsventils an einer Frischdampfleitung innerhalb des Sicherheitsbehälters.

Beim Abblasevorgang in den Sicherheitsbehälter wurde vom ausströmenden Dampf Isoliermaterial von in der Nähe befindlichen Rohrleitungen abgetragen. Das Isoliermaterial wurde mit dem abgeblasenen Dampf, dem Kondensat und durch das Wasser des automatisch angeregten Gebäudesprühsystems über die Kondensationsrohre in die Kondensationskammer gespült, aus der die Notkühlsysteme ansaugen. Dabei wurde der weitaus größte Teil des Isoliermaterials durch das Gebäudesprühsystem in die Kondensationskammer gespült.

Im Verlauf des Vorkommnisses wurden die Notkühlsysteme angefordert und es kam zum Verstopfen der vor den Ansaugöffnungen angeordneten Saugsiebe für die Notkühlsysteme in Folge des im Wasser befindlichen Isoliermaterials. Als eine der Notkühlpumpen Anzeichen von Kavitation zeigte, wurden vom Bedienungspersonal erfolgreich Rückspülmaßnahmen der Ansaugsiebe eingeleitet.

Während des gesamten Ablaufs war ein ausreichender Füllstand im Reaktordruckbehälter vorhanden und die Kernkühlung gewährleistet.

Das Ereignis ist nicht unmittelbar auf deutsche SWR übertragbar. Es existieren keine Sicherheitsventile, die innerhalb des Sicherheitsbehälters in Räume mit Isoliermaterial abblasen, es sind keine Gebäudesprühsysteme vorhanden, Sumpf und Kondensationskammer sind getrennt.

Voraussetzung für die Übertragbarkeit des Barsebäck-Szenarios ist die Annahme eines großen Lecks in einer hochenergetischen Rohrleitung innerhalb des Sicherheitsbehälters.

Aber wie realistisch ist die Annahme großer Freisetzungen von Isoliermaterial in Folge eines Leckstörfalls?

Das Versagen einer Rohrleitung bzw. das Entstehen eines Lecks geschieht in Phasen. Grundvoraussetzung ist, dass bei der Herstellung der Rohrleitungen trotz umfangreicher Prüfungen ein Herstellungsfehler unentdeckt bliebe. Liegt ein solcher Fehler vor, würde es Jahre bis Jahrzehnte dauern, bis der Riss die Rohrlitungswand durchdringen würde. Voraussetzung wäre, dass dieser nicht durch unsere umfangreichen zerstörungsfreien Prüfungen entdeckt würde. Ein solches Leck wäre stabil, die Zunahme des Querschnitts auf ca. 150 cm² würde Monate dauern. Während dieser Zeit würde das Leck durch Leckageüberwachungssysteme erkannt. Außerdem müsste das Leck in der Nähe größerer Mengen Isoliermaterial auftreten, das Medium müsste in einer ungünstigen Richtung austreten.

Eine probabilistische Bewertung ergibt folgerichtig, dass dieses Ereignis äußerst unwahrscheinlich ist und keinen relevanten Beitrag zur Gefährdungshäufigkeit unserer Kernkraftwerke liefert.

Ungeachtet dessen wurden bereits frühzeitig große Anstrengungen von den Betreibern unternommen, um die Beherrschung eines 0,1 F-Lecks (ca. 500 cm²) mit Freisetzung von Isoliermaterial nachzuweisen. Untersuchungen der Phänomene bei Freisetzung, Transport und Ablagerung von Isoliermaterial bildeten einen Schwerpunkt der betreiberfinanzierten

Sicherheitsforschung der letzten Jahre. Darüber hinaus wurden verschiedene Maßnahmen in SWR- und DWR-Anlagen umgesetzt.

Im Rahmen der Untersuchungen wurden abdeckende Faktoren zu Freisetzung, Transport und der Anlagerung von Isoliermaterial experimentell ermittelt. Durch die Überlagerung dieser Faktoren wurden insgesamt äußerst konservative Nachweise geführt.

Außerdem wurde die Nachweisführung durch Maßnahmen in den Kernkraftwerken erleichtert. Genannt seien hier:

- Modifikation der vorhandenen Ansaugsiebe
 - Minimierung Kerneintrag → Verringerung der Maschenweite
 - Differenzdruckbeherrschung → Vergrößerung der Siebflächen

- Nachrüstung von Sumpfsieben in SWR der Baulinie 69

- Optimierungen des Isolierkonzepts
 - Mikroporöser Dämmstoffe → Weitestgehende Entfernung aus leckrelevanten Bereichen
 - Mineralwollmischungen → Wechsel auf einheitliches Isoliermaterial mit günstigen Eigenschaften
 - Qualifizierung von Isoliermaterial mit günstigerem Druckverlustverhalten
 - Umstellung von konventioneller Isolierung auf Kassettenisolierung

- Sauberkeit der Anlagen
 - Fremdstoffe → Entfernung aus Anlagenräumen und Kontrollen durch Begehungen
 - Staub, Verunreinigungen → Erhöhte Anforderungen an Reinigung nach Revision

Darüber hinaus werden derzeit Maßnahmen zur Verbesserung der Erkennbarkeit des Differenzdrucks über die Sumpfansaugsiebe geplant.

Zusammenfassung:

Das Barsebäck-Ereignis ist nicht unmittelbar auf deutsche Kernkraftwerke übertragbar. Die Wahrscheinlichkeit eines Leckstörfalls mit vergleichbaren Folgen ist äußerst gering, das Szenario hat lediglich eine geringe Auswirkung auf das Sicherheitsniveau unserer Anlagen.

Die Bedeutung des Ereignisses liegt in den nach deutschem Regelwerk im Rahmen von Genehmigungsverfahren anzusetzenden Leckpostulaten. Die Betreiber haben mit umfangreichen Aktivitäten auf das Ereignis reagiert. Nachweisführungen erfolgten unter Annahme vieler sich überlagernder Konservativitäten, in den Kraftwerken wurden optimierende Maßnahmen umgesetzt.

Die Störfallbeherrschung wurde auch für diesen unwahrscheinlichen Störfall unter Annahme abdeckender Randbedingungen nachgewiesen.

Barsebäck-Thematik

Vorsorge- und Nachrüstmaßnahmen in deutschen Kernkraftwerken: Auswirkungen auf den Anlagenbetrieb und die Störfallbeherrschung (DWR)

V. Noack, RWE Power AG



Barsebäck-Ereignis, übertragbar auf deutsche SWR?

Ereignis Barsebäck, Block 2 am 28. Juli 1992

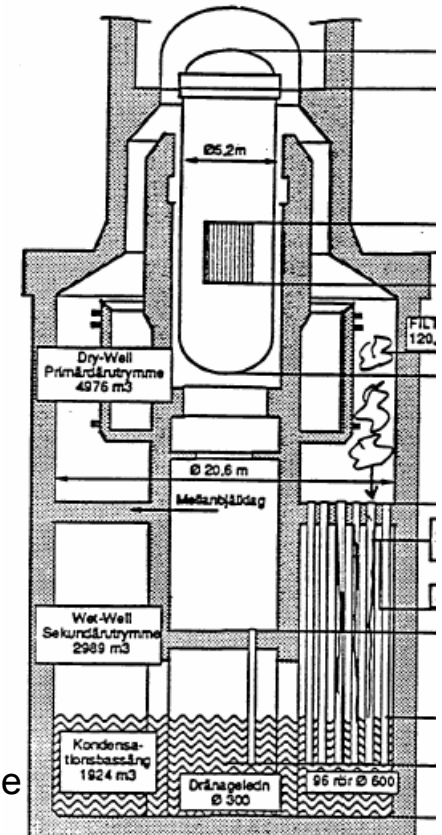
- Ursache: Fehlöffnen eines Frischdampf-Sicherheitsventils
- ➔ **So auf deutsche SWR nicht übertragbar; Ersatzannahme: großes Leck in Rohrleitungen**
- Isoliermaterial von den umgebenden Rohrleitungen abgerissen. Vom aktivierten Containmentsprühsystem wurde ein Teil dieses Isoliermaterials in die Kondensationskammer gespült, die gleichzeitig den Gebäudesumpf darstellt.
- ➔ **Situation in deutschen SWR: kein Containment-Sprühsystem, Sumpf und Kondensationskammer sind getrennt**
- Ereignisablauf wurde bereits erläutert

Erkenntnisse aus dem Ereignisablauf

- Transport von Isoliermaterial in die Kondensationskammer und Verstopfung von Absaugsieben (Gebäudesumpf), prinzipiell möglich

Fokus der ersten GRS-WLN 14/92

- Anlagenspezifische Prüfungen bei SWR-Anlagen hinsichtlich Rückhaltebarrieren für Isoliermaterial und Dimensionierung der Ansaugsiebe
- Bei DWR-Anlagen wird wegen der günstigeren Siebanordnung sowie der größeren Siebflächen eine Beeinträchtigung der Notkühlfunktion als gering eingeschätzt



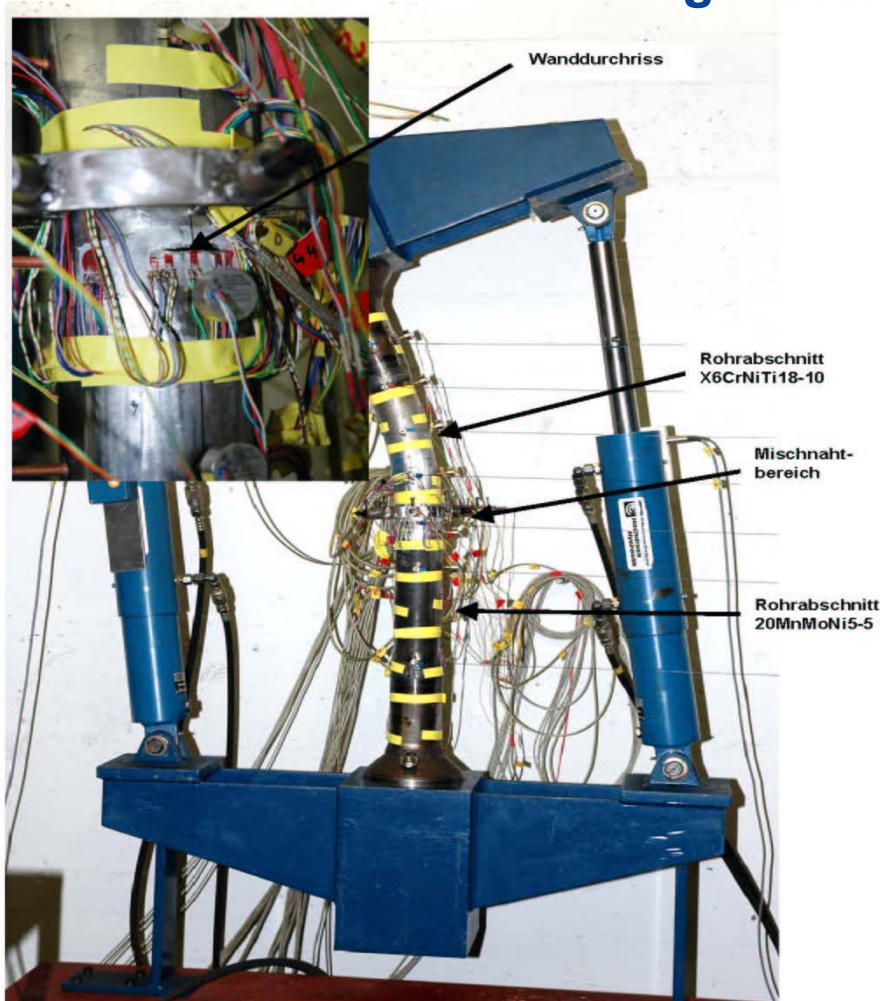
War die erste Reaktion auf das Ereignis angemessen?

Versagen geschieht **in Phasen**:

- Voraussetzung: Ausgangsfehler aus Herstellung
 - ➔ wird durch umfangreiche Prüfungen verhindert
- Phase 1: Begrenztes betriebliches Risswachstum
 - ➔ beschrieben mit ASME XI da/dN -Grenzkurven, seit 80er Jahren, aktueller Stand 2004, mehrfach bestätigt
 - ➔ Ergebnis: während Betriebsdauer eines Kernkraftwerks entsteht kein Leck
- Phase 2: konservative Annahme: weiteres Risswachstum wird unterstellt, Ausgangspunkt: mit regulärer ZfP sicher auffindbarer Riss (nicht wanddurchdringend)
 - ➔ Dauer bis zur Bildung eines Lecks: Jahre bis Jahrzehnte
 - ➔ Leck wäre stabil, z.B. max. 15 cm² bei HKL, sicher erkennbar
- Phase 3: Unterstelltes zusätzliches Risswachstum bei vorhandenem Leck
 - ➔ Leck wächst langsam, bis zum Erreichen der kritischen Rissgröße (z.B. 150 cm² bei der HKL) würden Wochen bis Jahre vergehen

➔ **Das 0,1 F-Leck = 500 cm² (HKL) ist ein abdeckendes Postulat**

Untersuchungen zum realen Bauteilverhalten an der MPA Stuttgart



Realer Bauteilversuch (Mischnaht, DN 80)

Ausgangsfehler: Teildurchriss von 75 %
der Wanddicke

Bauteilversuch: Innendruck plus langsam
steigendes äußeres
Biegemoment

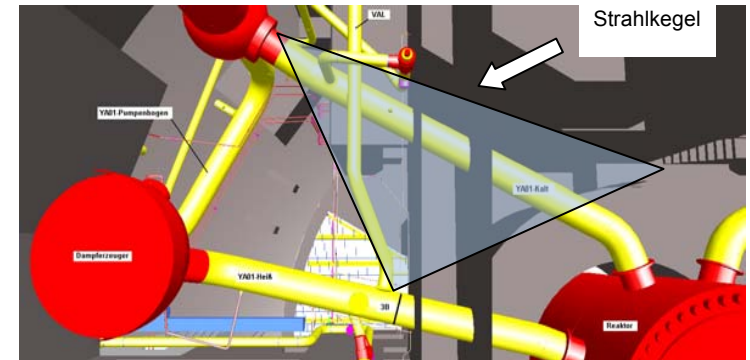
**Ergebnis: Auch bei Lasten weit oberhalb der max. Störfalllast kommt
es nur zu einer kleinen Leckage**

■ Probabilistische Bewertung des Leckstörfalls

- Bei Anlagen mit Bruchausschluss ist in den Nachweisen das Leckpostulat **0,1 F der HKL** zu verwenden.
- 0,1 F HKL $\hat{=}$ 500 cm² Leck
 $\hat{=}$ Bruch DN 250 Anschlussleitung
- **Leckhäufigkeit* < 1xE-7 1/a**

Für die Freisetzung an relevanten Leckstellen ist dieser Wert noch um mindestens eine Größenordnung kleiner!

Bei **realistischen Leckannahmen** z.B. 0,003 F der HKL ist davon auszugehen, dass die geringe Freisetzungsrage an Isoliermaterial nicht zu einer geschlossenen Belegung der Ansaugsiebe führt.



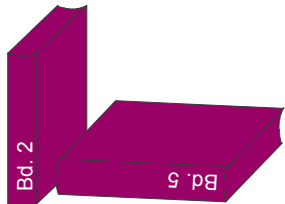
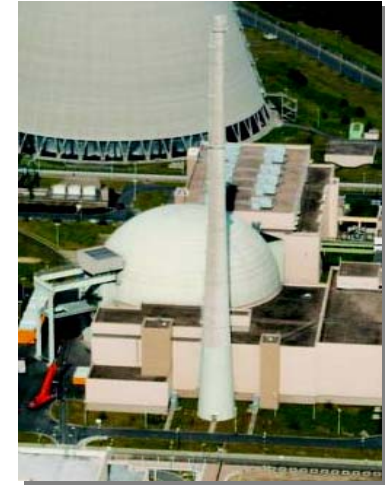
Reale sicherheitstechnische Relevanz ist eher untergeordnet.

*GRS-Abschlussbericht „Bereitstellung von Methoden zur Ermittlung von Leck- und Bruchhäufigkeiten für Rohrleitungen...“
Rev. 1, Okt. 2003, VGB-Projekt SA „AT“ 14/01

Angemessene Reaktion auf das Ereignis?

Vorteile deutscher Anlagen im internationalen Vergleich:

- Isoliermaterial überwiegend in Metallkassetten
- Es ist vorrangig Mineralwolle eingesetzt
- Kein Containment-Sprühsystem
- Hoher Nachweisstand bezüglich der Qualität der relevanten Rohrleitungen – Bruchausschluss
- Generell vorteilhaftes Anlagenkonzept

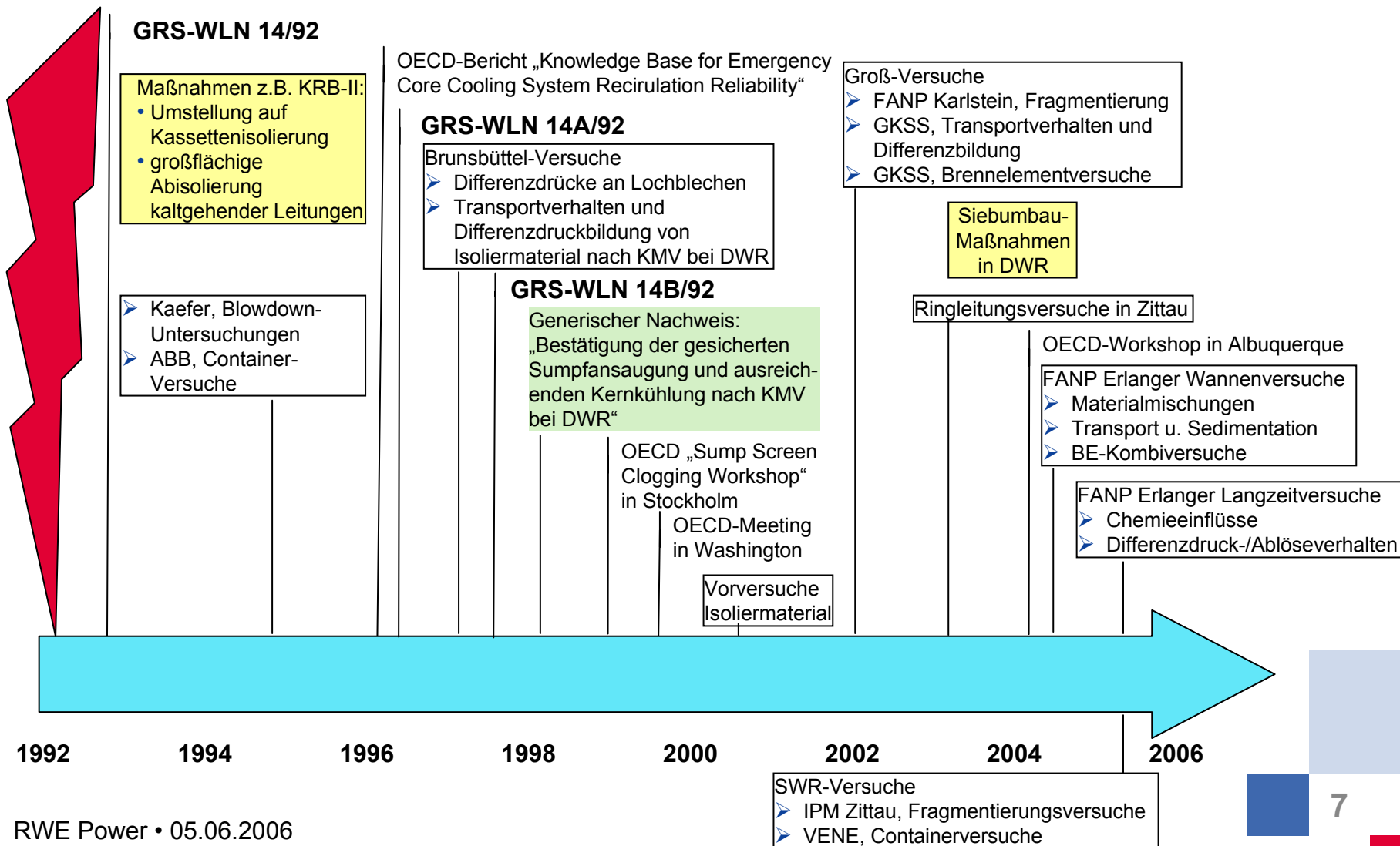


Deutsches Regelwerk fordert **im Rahmen von Genehmigungsverfahren** Nachweis der Beherrschung von **postulierten Leckstörfällen**

Betreiberreaktion: Nachweisführung **unabhängig von Genehmigungsverfahren**, umfangreichen experimentellen Programmen, abdeckenden Annahmen, Nachrüstmaßnahmen

... vielfältige Aktivitäten der Betreiber

Barsebäck-Ereignis



Konservativitäten der Nachweisführung (1)

■ Freisetzung

- Abdeckende Annahmen zur Freisetzungsmenge von Isoliermaterial



Zusammengedrückte aber geschlossene Kasette nach Versuch



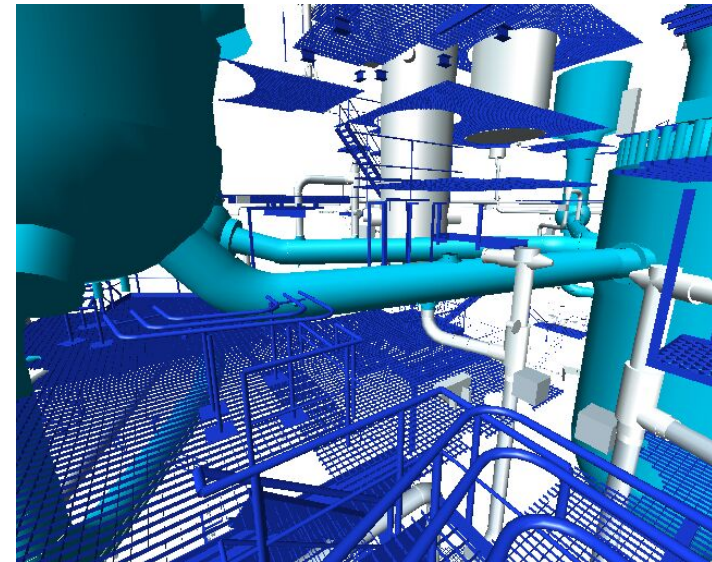
Deformierte aber geschlossene Kasette nach Versuch



Kasette nach Versuch mit Restinventar an Mineralwolle

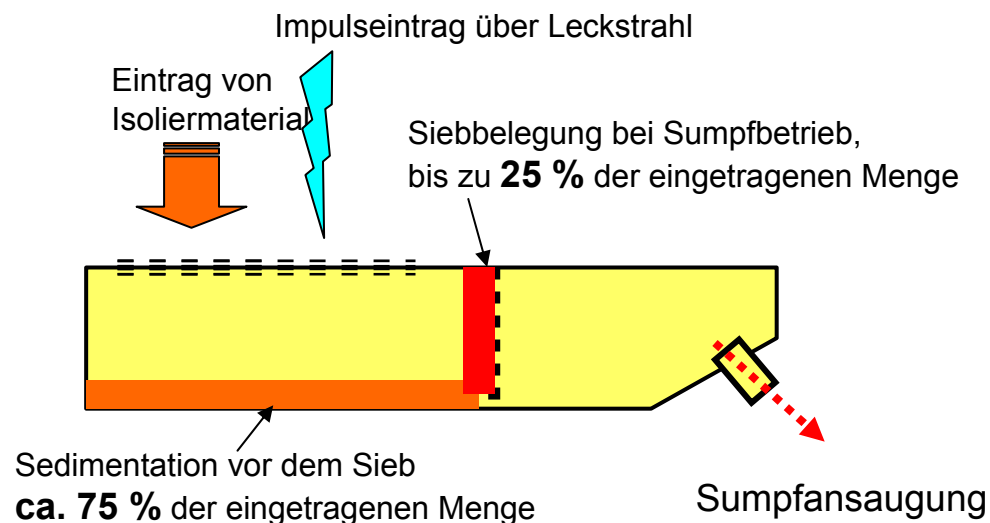
■ Transport innerhalb des Sicherheitsbehälters in die Sumpfvorkammer

- Postulierter Transportfaktor übersteigt den in Barsebäck bei Einwirkung des Gebäudesprühsystems beobachteten Wert.
- Die Rückhaltewirkung von Gebäudestrukturen, Toträumen, Überlaufkanten und Gitterrostbühnen etc. wird nur unzureichend bis gar nicht berücksichtigt.



■ Transport ans Ansaugsieb

- Annahme von 50 % in der Nachweisführung versus beobachteten 25 % in Experimenten



- Abdeckende Annahmen zum Differenzdruck über das Ansaugsieb
- Abdeckende Annahmen zum Kerneintrag (inzwischen bei Einbau von 3mm x 3mm Sieben nicht mehr relevant)

Erkenntnisse aus FuE und Umsetzung in den Anlagen (Überblick)

■ Modifikation der Ansaugsiebe

- Kerneintragsdiskussion → Verringerung der Maschenweite
- Differenzdruckbeherrschung → Vergrößerung der Siebflächen

■ Änderung des Isolierkonzepts

- Mikroporöser Dämmstoffe → Weitestgehende Entfernung aus leckrelevanten Bereichen
- Mineralwollmischungen → Wechsel auf einheitliches Isoliermaterial mit günstigen Eigenschaften
- Qualifizierung von Isoliermaterial mit günstigerem Druckverlustverhalten
- Umstellung von konventioneller Isolierung auf Kassettenisolierung

■ Sauberkeit der Anlagen

- Fremdstoffe → Entfernung aus Anlagenräumen und Kontrollen durch Begehungen
- Staub, Verunreinigungen → Erhöhte Anforderungen an Reinigung nach Revision

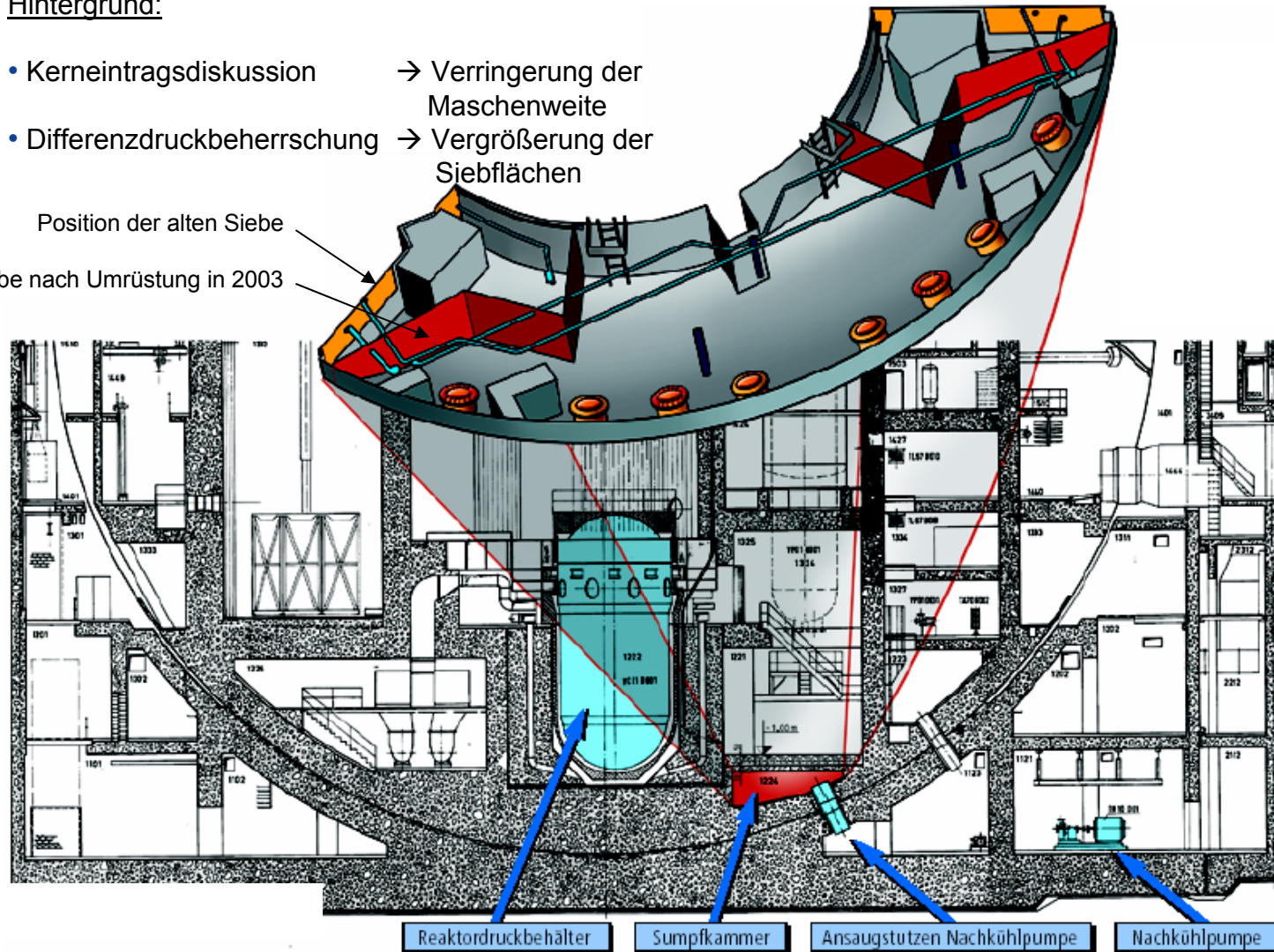
■ Modifikation der Ansaugsiebe am Beispiel Biblis, Block A

Hintergrund:

- Kerneintragsdiskussion → Verringerung der Maschenweite
- Differenzdruckbeherrschung → Vergrößerung der Siebflächen

Position der alten Siebe

Siebe nach Umrüstung in 2003

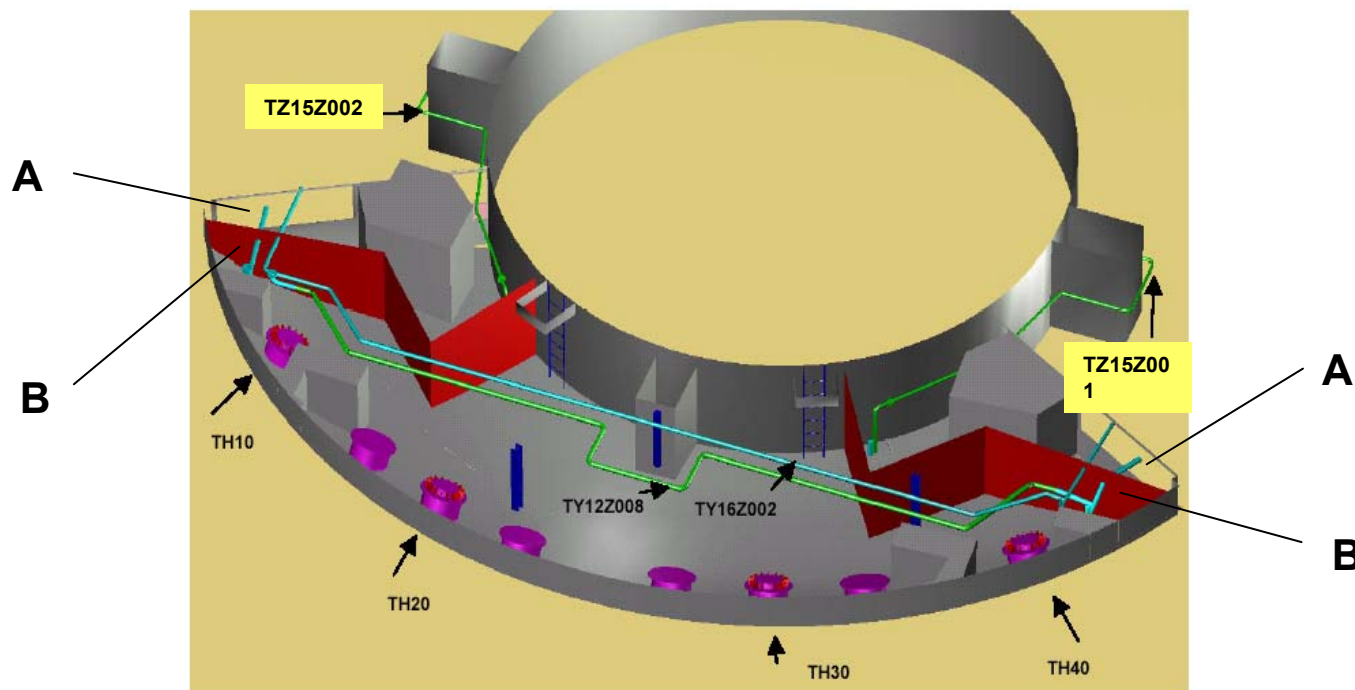


Umrüstung von Sumpfansaugsieben (2)

■ Modifikation der Ansaugsiebe am Beispiel Biblis, Block A

Ziel:

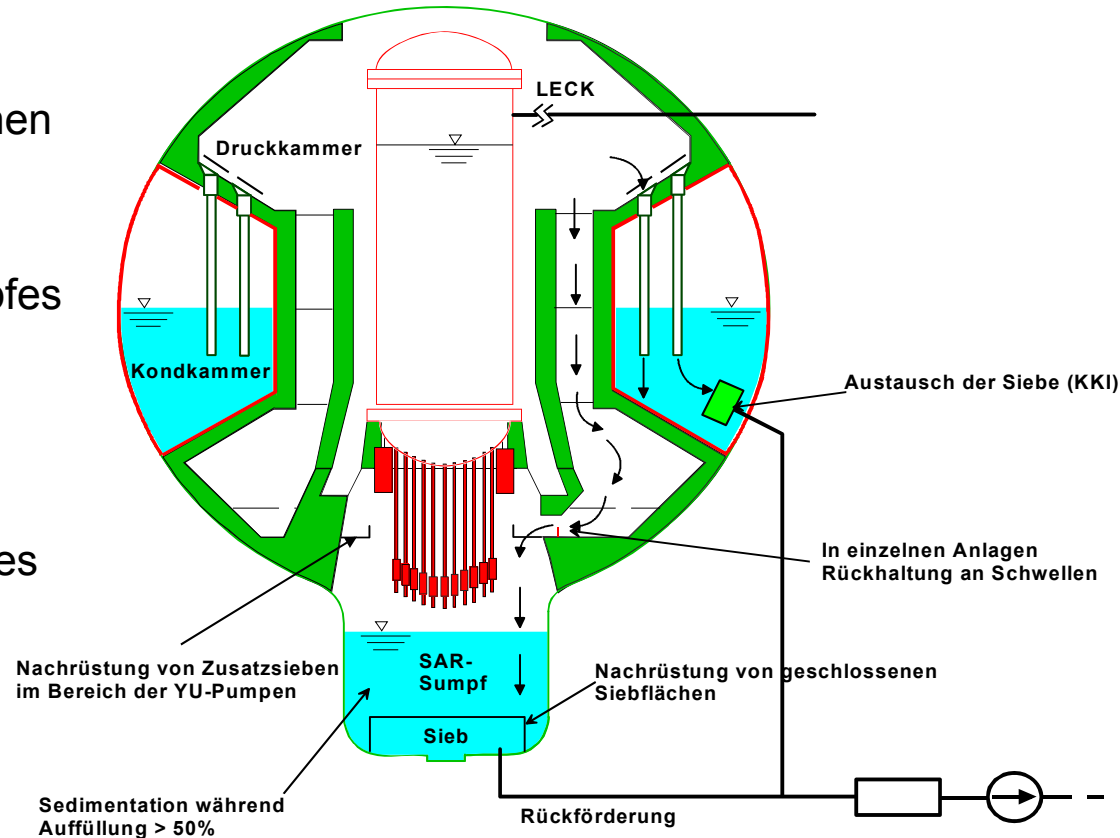
- Vermeidung weiterer Kerneintragsdiskussionen → Verringerung der Maschenweite
- Sicherheitsmagen zur Differenzdruckbeherrschung → Vergrößerung der Siebflächen



A Bereich der alten Siebflächen, ca. 7 m²

B neue Siebe 3x3 mm mit ca. 20 m² wirksamer Fläche

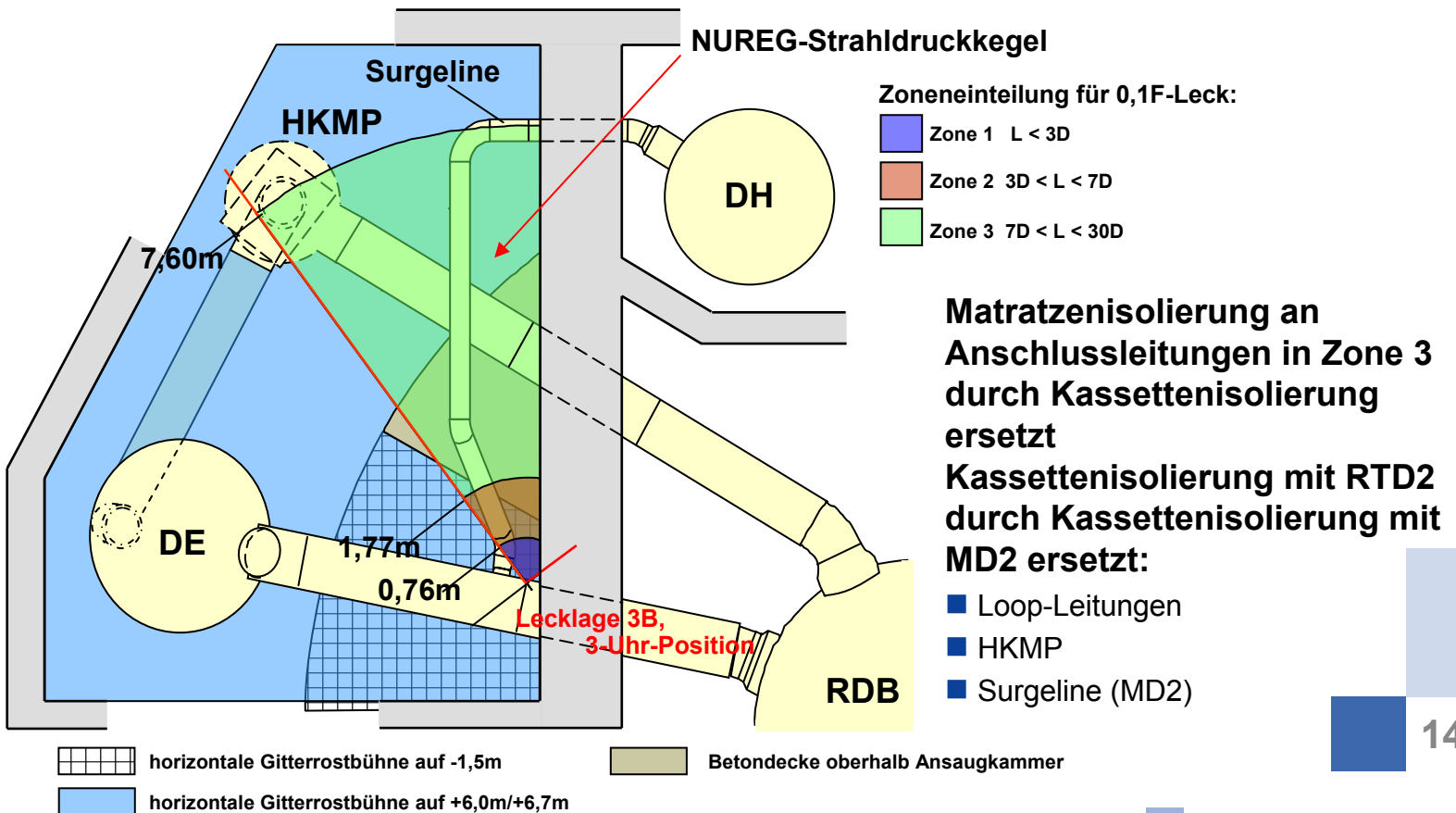
- Nachrüstung eines geschlossenen Saugsiebes im Sumpf
- Nachrüstung von zusätzlichen Siebflächen oberhalb des Sumpfes
- Entfernung kleiner Siebe in der Koka
- Qualifizierung der vorhandenen Pumpensaugsiebe außerhalb des SHB für große Belademengen



Fazit: Frühzeitige Reaktion auf das Ereignis!

■ Änderung des Isolierkonzepts

- Mikroporöser Dämmstoffe → Weitestgehende Entfernung aus leckrelevanten Bereichen
- Mineralwollmischungen → Wechsel auf einheitliches Isoliermaterial mit günstigen Eigenschaften
→ Qualifizierung von Isoliermaterial mit günstigerem Druckverlustverhalten
- Umstellung von konventioneller Isolierung auf Kassettenisolierung (Freisetzungsvermeidung in Zone 3)



Erhöhte Anstrengungen zur Sauberkeit in den Anlagen

- Fremdstoffe → Entfernung aus Anlagenräumen und Kontrollen durch Begehungen
- Staub, Verunreinigungen → Reinigung nach Revision

RWE Power Kraftwerk Biblis	Prüfhandbuch Block B
	PHB B3.9011
Prüfanweisung : Gebäudetechnik	Blatt: 1 +
Prüfgegenstand : Kontrolle der Sumpfsiebe	Index: -
System/Komp. : 20TH00 N002 bis 20TH00 N007	Stand: 14.04.2004
Prüfliste : Kap. 14.7	

1.3 Prüfziel

Sicherstellung der einwandfreien Sumpfansaugung (keine Fremdkörper) durch eine Vor-Ort-Kontrolle. Hierzu soll im Rahmen einer Sichtprüfung

- der einwandfreie spezifizierte Zustand der Sumpfsiebe, Trenngitter, schwenkbaren Sumpfsiebteilsegmenten (Maschenweite 3 x 3 mm) hinsichtlich Beschädigungen, Löcher, freie Siebdurchströmungsflächen, feste Segmentverschraubung) kontrolliert werden.
- der Zustand der Beschichtung hinsichtlich evtl. Abplatzungen und Ablösungen kontrolliert werden.
- eine allgemeine Sauberkeitskontrolle (keine Fremdkörper bzw. temporären Einrichtungen innerhalb der Sumpfkammern und im Bereich der Sumpfvorkammern bzw. der -0,60m Ebene) durchgeführt werden.

3. Herstellung des Endzustandes

- Eventuell festgestellte Verschmutzungen der begangenen Raumbereiche bzw. der Siebgitter 20TH00N002-007 sind umgehend durch die OE DS zu beseitigen.
- Eventuell festgestellte Abplatzungen und Ablösungen von Beschichtungen sind umgehend zu bewerten und vor dem Anfahren der Anlage zu beheben.
- Eventuell festgestellte Beschädigungen der Sumpfsiebe 20TH00N002-005 oder der Trenngitter 20TH00N006-007 sind umgehend zu bewerten und sind vor dem Anfahren der Anlage zu beheben.

Nach Durchführung sämtlicher Kontrollen evtl. Tätigkeiten ist die einwandfreie spezifizierte Sumpfansaugung vor dem Anfahren der Anlage sichergestellt.

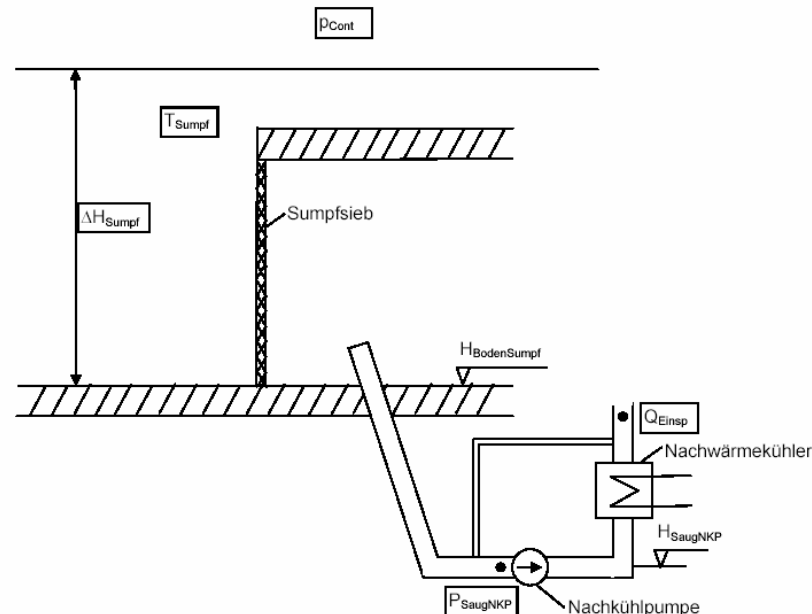
Beispiel für die Umsetzung in den administrativen Regelungen (Betriebsunterlagen)

RWE Power Kraftwerk Biblis Block B	4. Prüfnachweis	PHB B3.9011
Prüfgegenstand: Kontrolle der Sumpfsiebe		Kap. Nr.: 14.7 Intervall: 1-BEW
Prüfart : Sichtprüfung		Index: - Stand: 14.04.2004
Die Prüfung wurde durchgeführt am (vom/bis): _____		Freigabedatum: _____
Die Prüfung wurde nicht durchgeführt, Grund: _____		➔ mit SV ➔
Ergebnis der Prüfung:		
Die Prüfung ist abgeschlossen: Es wurden Mängel festgestellt:		<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
Die Mängel Nr. _____ Beseitigung wurde eingeleitet mit IH-Aufr.-Nr. _____		
Die Mängel Nr. _____ wurden sofort beseitigt mit IH-Aufr.-Nr. _____		
Mängel, erforderliche Maßnahmen und Termine:		
Durchführung der Prüfung		Bewertung des Prüfergebnisses OE AB
RWE	Bestätigung der Durchführung _____ Pl./OE Name Unterschrift	Die Prüfung ist zu wiederholen bis _____ Mängelbeseit. vor nächster Prüfung erforderl. <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
	Bestätigung der Aufsicht bei Auftragnehmern _____ OE Name Unterschrift	Änderung der Prüfanweisung erforderlich <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein Art der Änderung: nicht wesentlich <input type="checkbox"/> wesentlich <input type="checkbox"/>
SV	Bestätigung der Teilnahme _____ Name Unterschrift	OE, Datum, Name, Unterschrift _____ Datum, Name, Unterschrift

Überwachung des Differenzdrucks über die Sumpfsiebe

- Experimentelles Ergebnis des letzten Jahres: Bei Vorhandensein einer vollständigen Siebbelegung kann es mehrere Stunden nach Störfallende zu einer Erhöhung des Differenzdrucks über die Ansaugsiebe kommen
- Abschalten von Nachkühlpumpen bei moderaten Differenzdrücken entfernt Filterkuchen dauerhaft
- Geplante Maßnahme: **Verbesserung der Erkennbarkeit des Differenzdrucks über die Ansaugsiebe**

Nebenstehende Abbildung zeigt beispielhaft Messwerte zur Bestimmung des Differenzdrucks über die Sumpfsiebe.



Phänomen der Verstopfung der Sumpfansaugsiebe aus Sicht eines Betreibers

- Das Ereignis in Barsebäck ist so auf deutsche Kernkraftwerke nicht übertragbar.
- Die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses mit nennenswerter Freisetzung von Isoliermaterial ist äußerst gering.
- Bei Ansatz realistischer Randbedingungen kann davon ausgegangen werden, dass sich kein geschlossener Filterkuchen auf den Ansaugsieben bildet.
- Die Bedeutung des Ereignisses liegt in den nach deutschem Regelwerk anzusetzenden Leckpostulaten.
- Die Betreiber haben mit umfangreichen Aktivitäten auf das Phänomen reagiert.
- Im Nachweisverfahren wurden viele sich überlagernde Konservativitäten angenommen.
- Störfallbeherrschung wird auch unter abdeckenden Annahmen nachgewiesen.

Untersuchungen zu SWR-Anlagen
bezüglich Fragmentierung des Isolationsmaterials,
Transport in Druck- und Kondensationskammer,
Siebbelegung und Langzeiteffekten

H. Ohlmeyer, VENE
Dr. W. Kästner, IPM

Präsentation zur
KTG-Fachtagung am 3.-4. April 2006

Danksagung

Die nachfolgend dargestellten neuen Untersuchungsergebnisse wurden im Auftrage der SWR-Betreiber von den Firmen „Becker-Technologies, FANP, GKSS, IPM und Prien durchgeführt. Den einzelnen Mitarbeitern sei an dieser Stelle hierfür nochmals gedankt. Die Analyseergebnisse sind in zahlreichen technischen Berichten dokumentiert, sodass nachfolgend nur ein kurzer Überblick über das Untersuchungsprogramm gegeben werden kann.

RSK-Stellungnahmen

Im Jahr 1998 wurde von der Reaktorsicherheitskommission (RSK) eine Stellungnahme zum Thema „Übertragbarkeit des Störfalles im schwedischen Kernkraftwerk Barsebaeck auf deutsche Kernkraftwerke veröffentlicht. Im August 2004 wurde diese Stellungnahme aktualisiert. Aufgrund dieser Stellungnahme wurde auch seitens der SWR-Betreiber die Weiterentwicklung des Kenntnisstandes hinsichtlich dieser Problematik verfolgt und einzelne Fragestellungen wurden nochmals überprüft. Ausdrücklich hinzuweisen ist darauf, dass die Untersuchungen noch nicht abgeschlossen sind und nachfolgend somit nur vorläufige Ergebnisse dargestellt werden können.

Bruch/Leckpostulat

In allen deutschen SWR-Anlagen ist heute für die druckführende Umschließung der „Bruchausschluss“ genehmigt, sodass für die Folgewirkungen aus Strahlkraftbelastungen bei Störfällen max. ein 0,1F-Leck in einer Rohrleitung anzunehmen ist. Für die SWR-Anlagen wurde jedoch größtenteils ein 2F-Bruch als Auslegungsbasis angenommen. Gemäß RSK-Stellungnahme aus dem Jahr 2004 ist diese konservative Annahme nach heutigem Kenntnisstand nicht mehr gerechtfertigt. Hieraus resultieren entsprechende Auslegungsreserven, da die berechneten Freisetzungsmengen erheblich überschätzt wurden.

Freisetzungsmodell

Für die Berechnung der Freisetzungsmengen wurde bei den SWR-Anlagen das so genannte „NUREC-Doppelkegelmodell“ verwendet, was für DWR-Anlagen mit einem Betriebsdruck von 155 bar entwickelt wurde. In diesem Modell wird eine Strahlaufweitung von 90° unterstellt. Für die Berechnung der Freisetzung von Isolationsmaterial bei Dampfstrahlen liefert dieses Modell unrealistisch hohe Mengen, da durch Experimente bekannt ist, dass Dampfstrahlen sich im Mittel mit einem Winkel von 26° aufweiten. Je nach Abstand der beaufschlagten Rohrleitung zum Leck- oder Bruchort kann die Überschätzung zwischen 10 und 15 liegen. Hinzu kommt, dass bei SWR-Anlagen in den Frischdampfleitungen Flowlimiter vorhanden sind, die den Druck an der Bruchstelle bereits wenige ms nach Störfalleintritt auf 27-35 bar begrenzen, wodurch der Fragmentierungsgrad des beaufschlagten Materials verringert wird. Die momentan laufenden Untersuchungen zu dieser Thematik hinsichtlich einer realistischeren Verwendung des Freisetzungsmodelles sind noch nicht abgeschlossen.

Fragmentierung

Nach dem Störfall im Kernkraftwerk Barsebaeck wurden in Schweden im Auftrag der deutschen SWR-Betreiber Fragmentierungsversuche in einer Container-Versuchsanlage durchgeführt. Aufgrund der Beaufschlagung mit einem realistischen Dampfdruck wurde nur ein geringer Anteil an feinem Isolationsmaterial festgestellt. Bei diesen Versuchen wurde auch die Verteilung des Isolationsmaterials im Sicherheitsbehälter experimentell untersucht. Hierbei wurde ein geringer Übertrag von der Druckkammer in die Kondensationskammer festgestellt, was auf die spezielle Geometrie der Abdeckungen für die Kondensationsrohre zurückzuführen ist. Bei diesen und bei allen anderen Versuchen zur Fragmentierung wurde festgestellt, dass die Ablösung und der Transport des Isolationsmaterials durch den wirkenden Impuls verursacht wird. Es folgt unmittelbar nach dem Bruch kein gasgetragener Transport des abgelösten Materials, sodass der Transportvorgang experimentell zu ermitteln ist. Vorhandene Rechenprogramme vermögen diese komplexen Vorgänge momentan nicht zu beschreiben. In 2001 wurden in einer Großversuchsanlage in Karlstein Fragmentierungsversuche mit Original-Isolierkassetten durchgeführt. Bei der Beaufschlagung der Kassetten mit einem Dampfstrahl ergab sich ein gegenüber den DWR-Verhältnissen geringerer Zerstörungsgrad und eine verringerte Freisetzungsmenge aus den beschädigten Kassetten. Zur Zeit werden Untersuchungen zur Fragmentierung an einer Versuchsanlage des IPM in Zittau durchgeführt. Die Ergebnisse zum Übertrag zwischen Druckkammer und Kondkammer bestätigen die bisherigen Annahmen für die SWR-Anlagen.

Sedimentation

Für die Sedimentation in der Kondensationskammer und im Steuerstabantriebsraum von SWR-Anlagen wurden bisher konservative Annahmen getroffen. In 1993 mit grobem Material durchgeführte Versuche zeigten, aufgrund der geringen Strömungsgeschwindigkeiten nach dem Blowdown, einen Sedimentationsgrad von ca. 90 % erreicht wird. Da nach heutigem Kenntnisstand davon ausgegangen wird, dass bei einer Beaufschlagung des Isolationsmaterials mit einem Dampfstrahl ein höherer Anteil an fein fragmentiertem Material entsteht, wurden zusätzliche Sedimentationsversuche in einer Großanlage durchgeführt und die Versuchsergebnisse mit dem Rechenprogramm TISA nachgerechnet. Auf dieser Basis wurde mit einem 3D-Modell der Kondensationskammer der Transport des Isolationsmaterials, unter Berücksichtigung der Sedimentation berechnet. Die Ergebnisse zeigen, dass ein Anteil von >80 % sedimentiert, da nur in unmittelbarer Nähe der Ansaugstutzen bzw. der Ansaugsiebe höhere Strömungsgeschwindigkeiten auftreten.

Siebbelegung

Die sich in den Ansaugsieben aufgrund der Beladung mit Isolationsmaterial einstellenden Differenzdrücke wurden mit grobem Material experimentell bereits 1993 an nachgebauten Sieben im Maßstab 1:1 ermittelt. Da nach heutigem Kenntnisstand in der Kondensationskammer von wesentlich feinerem Material auszugehen ist, wurden die Versuche ebenfalls im Maßstab 1:1 wiederholt. Die neuen Ergebnisse bestätigten weitgehend die bisherigen Werte. Festgestellt wurde jedoch eine höhere Penetration als bisher angenommen, sodass von einem höheren Kerneintrag auszugehen ist.

Kernverhalten

Für das Verhalten des Reaktorkernes bei Eintrag von Isolationsmaterial wurden bereits 1997/8 thermohydraulische Analysen durchgeführt, wobei aufgrund fehlender experimenteller Daten konservative Randbedingungen hinsichtlich Materialverteilung und Widerstandsbeiwerte angenommen werden mussten. In 2001 wurden experimentelle Untersuchungen an einem verkürzten SWR-Brennelement durchgeführt. Hierbei wurden eine günstigere Verteilung des Materiales und günstigere Differenzdrücke gemessen. Auf der Basis dieser Experimente wurde die Bewertung des Kernverhaltens aktualisiert. Die Ergebnisse zeigen, dass mindestens das 4-fache der bisher angenommenen Menge an Isolationsmaterial eingetragen werden kann, ohne dass es zu einer unzulässigen Behinderung der Kernkühlung kommt.

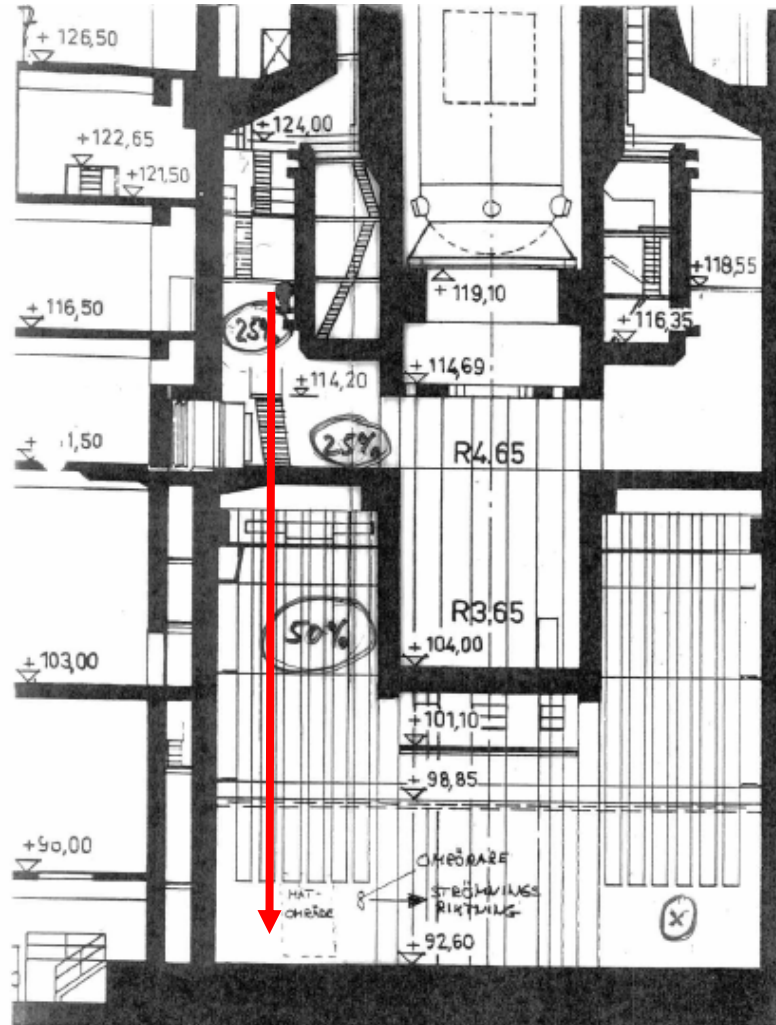
Langzeitverhalten

Das Langzeitverhalten betrifft ausschließlich die sich an einzelnen Siebflächen einstellenden Differenzdrücke, die sich aufgrund von Korrosionsvorgängen oder anderen chemischen Reaktionen einstellen können. Diese Phänomene sind nicht der eigentlichen Störfallbeherrschung zuzuordnen, sondern der langfristigen Wärmeabfuhr. Bei SWR-Anlagen ist der störfallbedingte Überdruck nach ca. 5 Stunden soweit zurückgegangen, dass betriebliche Fahrweisen möglich sind. Aufgrund der zurückgehenden Nachzerfallsleistung sind Strangabschaltungen, Durchsatzreduktionen sowie Spül- und Reinigungsmaßnahmen möglich, sodass im Vorwege nicht mit ausreichender Genauigkeit quantifizierbare Langzeiteffekte hierdurch ausgeglichen werden können. Die momentan international stattfindenden Diskussionen hinsichtlich der durch das Bor verursachten Korrosionseffekte sind auf SWR-Anlagen nicht zu übertragen, da nur Deionat verwendet wird und die Sicherheitsbehälter größtenteils inertisiert sind und der Sauerstoffgehalt damit entsprechend reduziert ist.

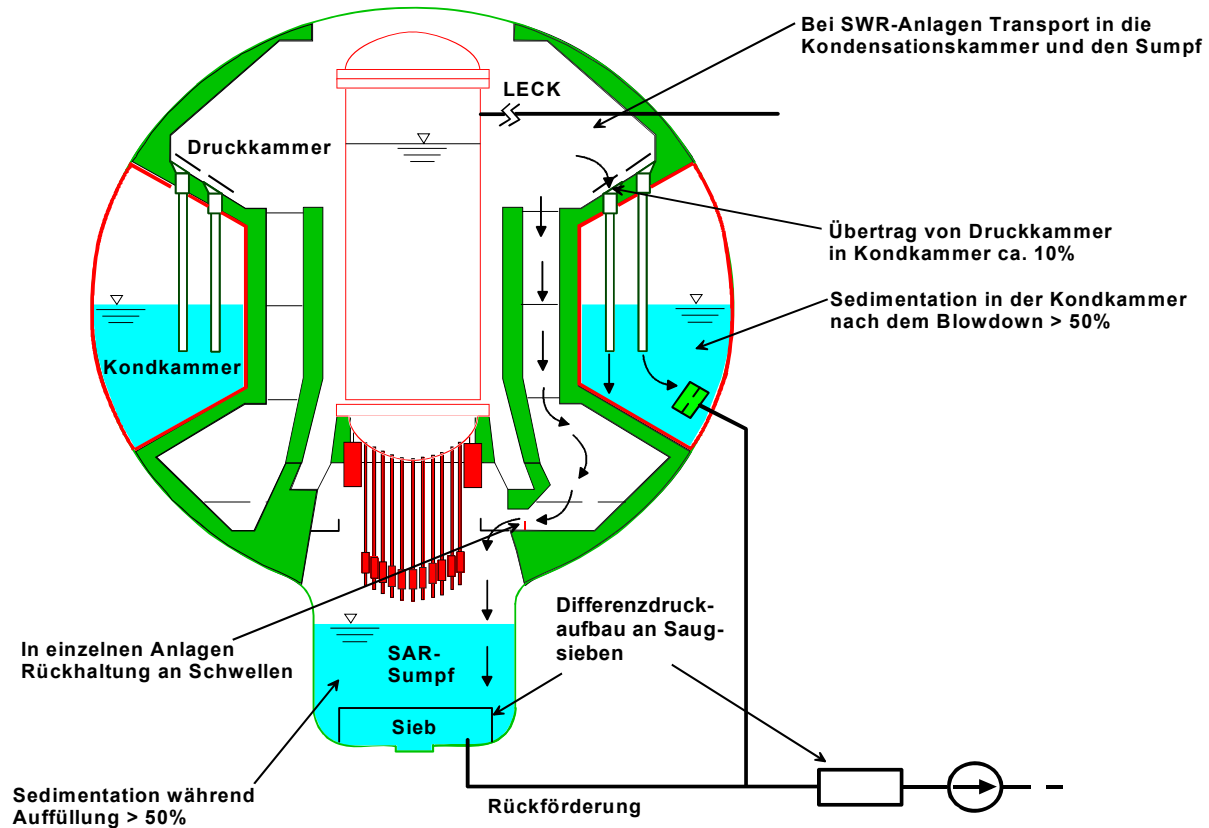
Allgemeines

- In den deutschen SWR-Anlagen wurden bereits unmittelbar nach dem Ereignis in Barsebaeck umfangreiche Untersuchungen durchgeführt und Nachrüstmaßnahmen realisiert
- Für SWR-Anlagen wurde die Weiterentwicklung des Standes von W+T seit dem Ereignis ständig verfolgt
- Ab 2004 Untersuchung neuer Erkenntnisse aus internationalen Untersuchungsprogrammen und deutschen Untersuchungen für die DWR-Anlagen
- Keine generische Analyse möglich, da Anlagenausführungen erhebliche Unterschiede aufweisen
- Keine Erkenntnisse vorhanden, die eine Störfallbeherrschung in Frage stellen könnten

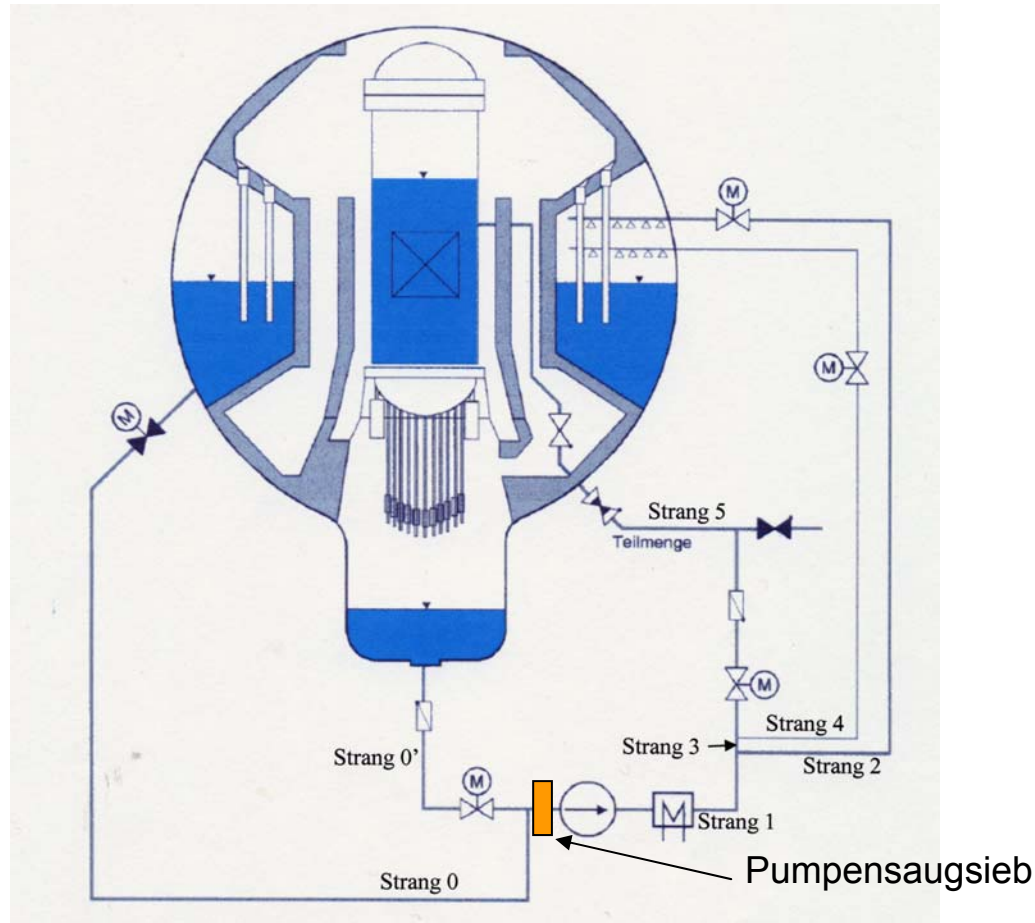
Sicherheitsbehälter Barsebaeck



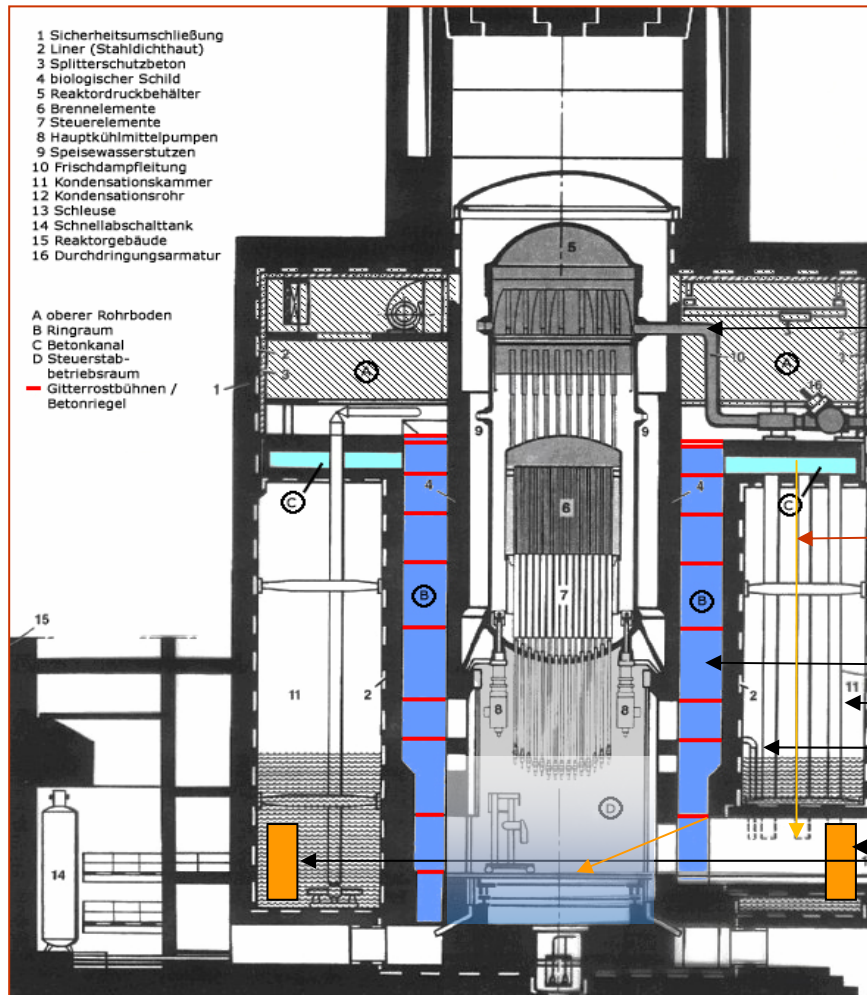
Transportwege bei SWR-Anlagen der Baulinie 69



Übersicht Not- und Nachkühlsystem SWR-Anlage 69



Transportwege bei SWR-Anlage Baulinie 72



Abdeckende Bruchlage

Übertrag von Druckkammer in die Koka erst nach mehrfacher Umlenkung der Strömung

Ringspalt

Kondrohre

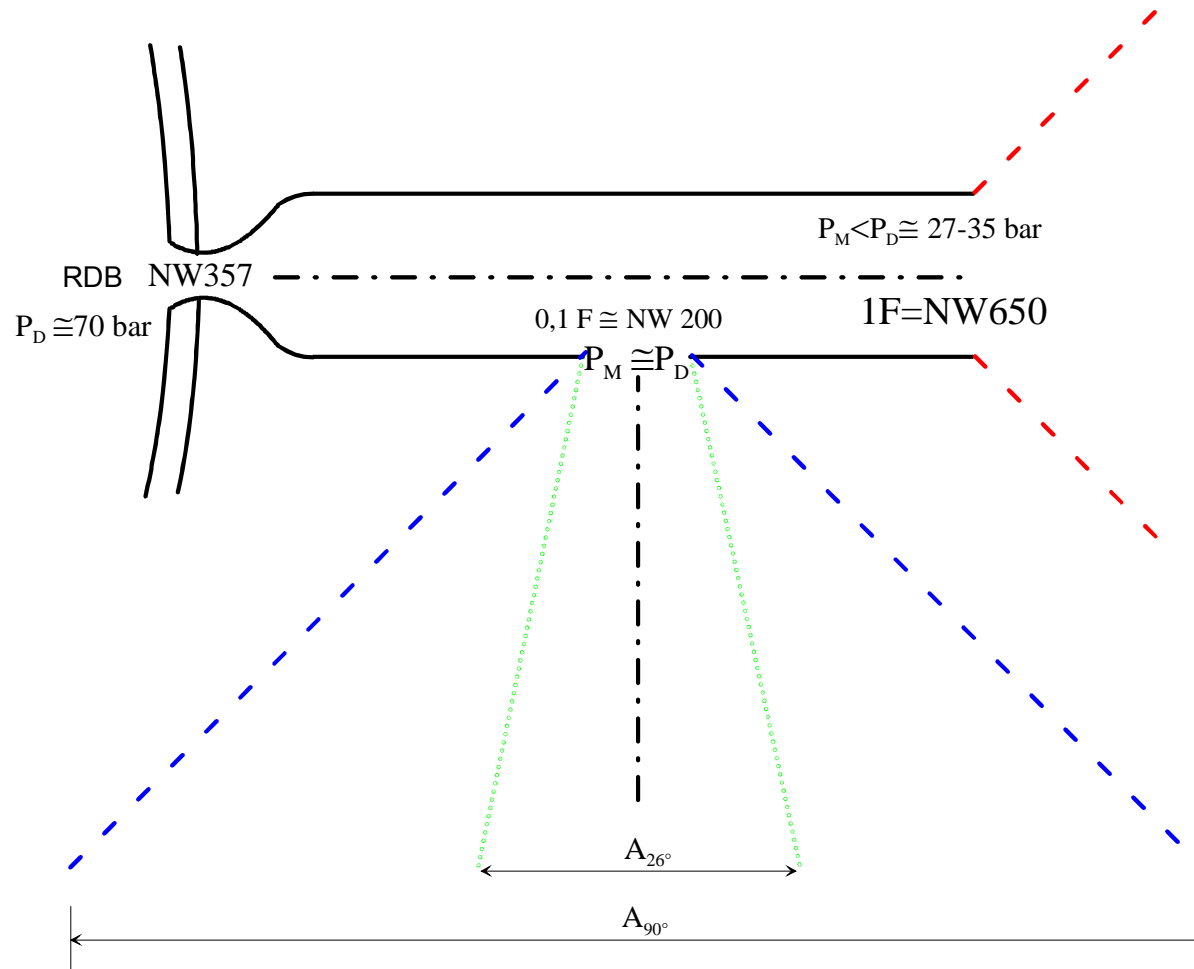
Überlaufrohre

Koka-Siebe (3x)

Untersuchungsumfang

- Bewertung des Freisetzungsmodelles
- Übertrag von der Druckkammer in die Kondensationskammer
- Sedimentation in der Kondensationskammer
- Penetration des Isolationsmaterialies durch Siebe
- NPSH-Reserve der Nachkühlpumpen
- Verhalten des Reaktorkernes
- Langzeiteffekte

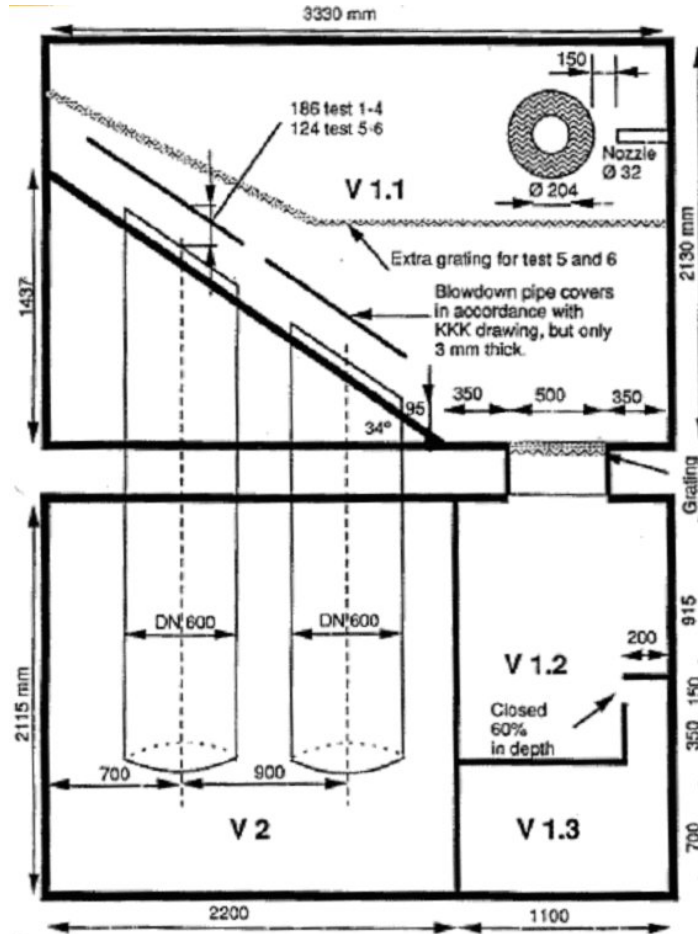
Anwendung des Freisetzungsmoделles bei SWR



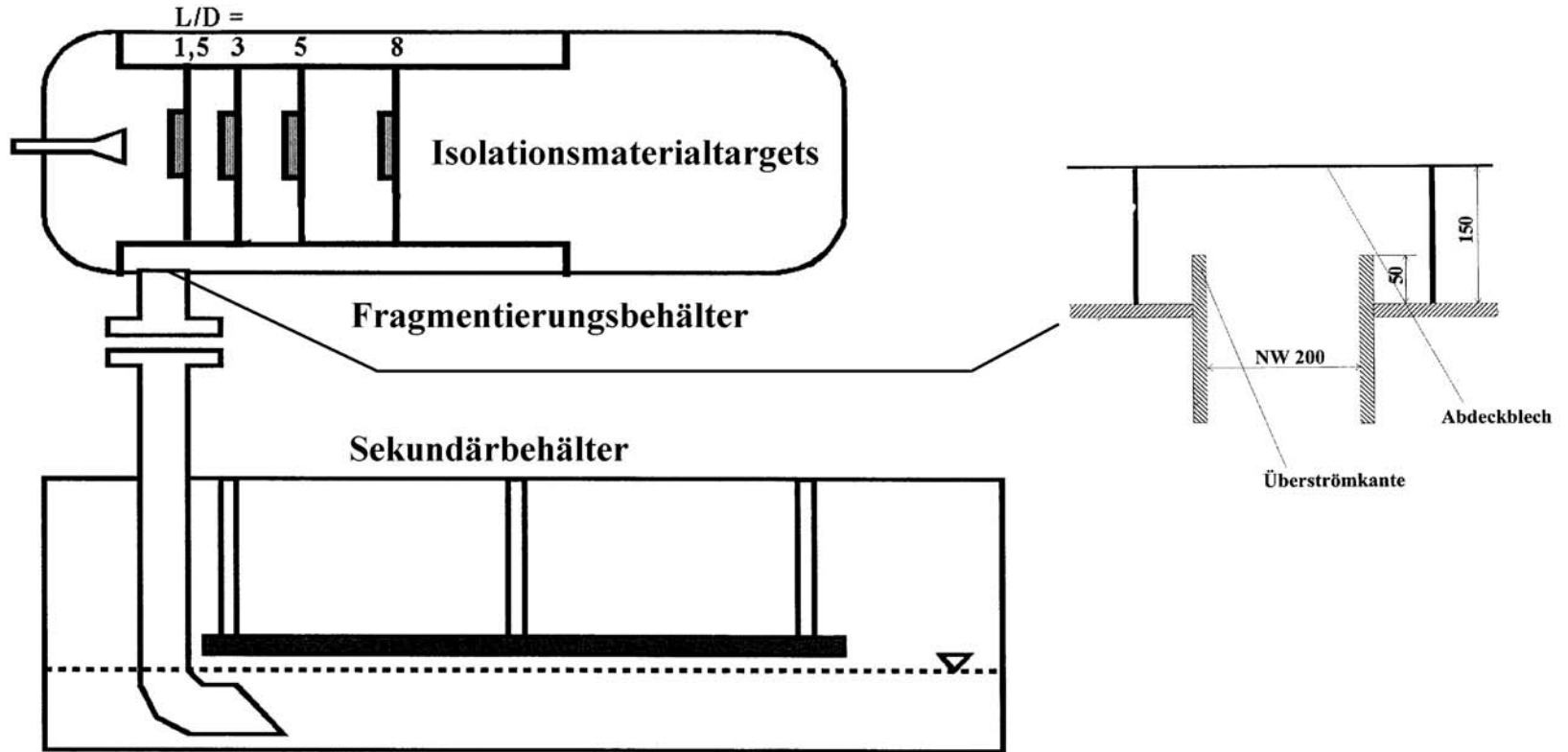
Übertrag Druckkammer-Kondkammer

- Basis für die SWR-Anlagen sind die Karlshamn-Versuche aus dem Jahr 1993, die einen Übertrag von ca. 3 % ergaben
- Experimente in der Fragmentierungsanlage des IPM in Zittau zeigten bei 80 bar Abblasedruck Überträge zwischen 13 und 23 %
- Nachrechnungen der Versuche mit COCOSYS und Vergleich mit Berechnung (FD-Bruch) zeigten, dass die Geschwindigkeiten im Versuchscontainer ein 0,1F-Leck abdecken. Die RSK-Anforderungen sind damit erfüllt
- Nachrechnungen der Experimente aus Zittau zeigten, dass Geschwindigkeiten selbst gegenüber einem 2F-Bruch zu hoch sind
- Fazit: Bisher angenommener Übertrag von 10 % realistisch für 2F-Bruch, konservativ für 0,1F-Leck

Container-Versuchsanlage



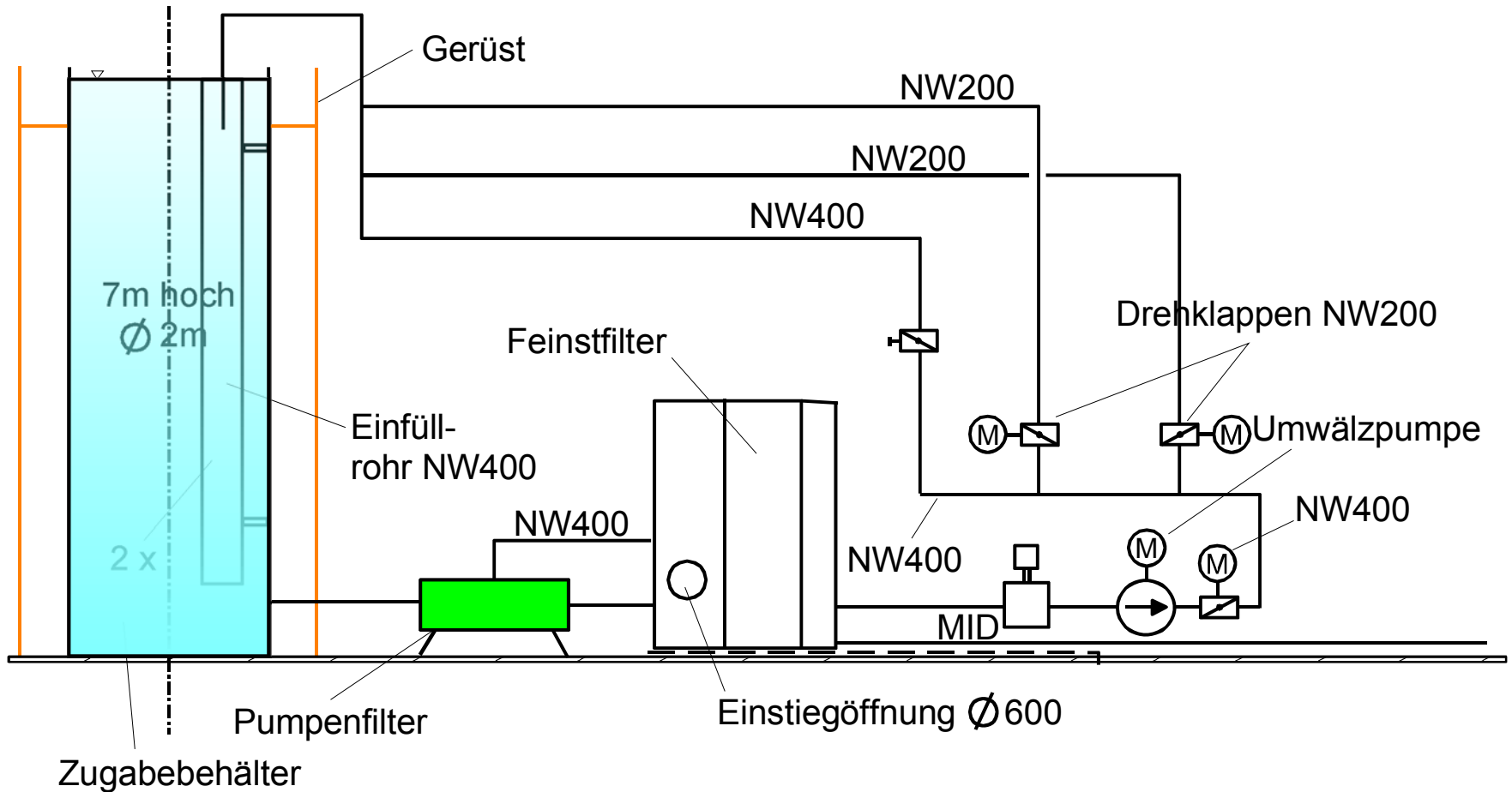
IPM-Fragmentierungsanlage



Sedimentation in Kondensationskammer 1

- Bewertung der bisherigen Annahmen zur Sedimentation seitens SWR-Betreiber wurde vorgenommen
- In die Kondensationskammer eingetragenes Material feiner als bisher angenommen
- Durchführung von Sedimentationsversuchen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten mit feinem Isolationsmaterial in großer Versuchsanlage mit 7 m Wassertiefe (vergleichbar mit Kondensationskammer)
- Nachrechnung der Versuche mit einem 3D-Modell auf der Basis der NUREG Größenverteilung lieferte vergleichbare Ergebnisse
- Auf der Basis dieser Ergebnisse Bewertung der Sedimentation in der Kondensationskammer

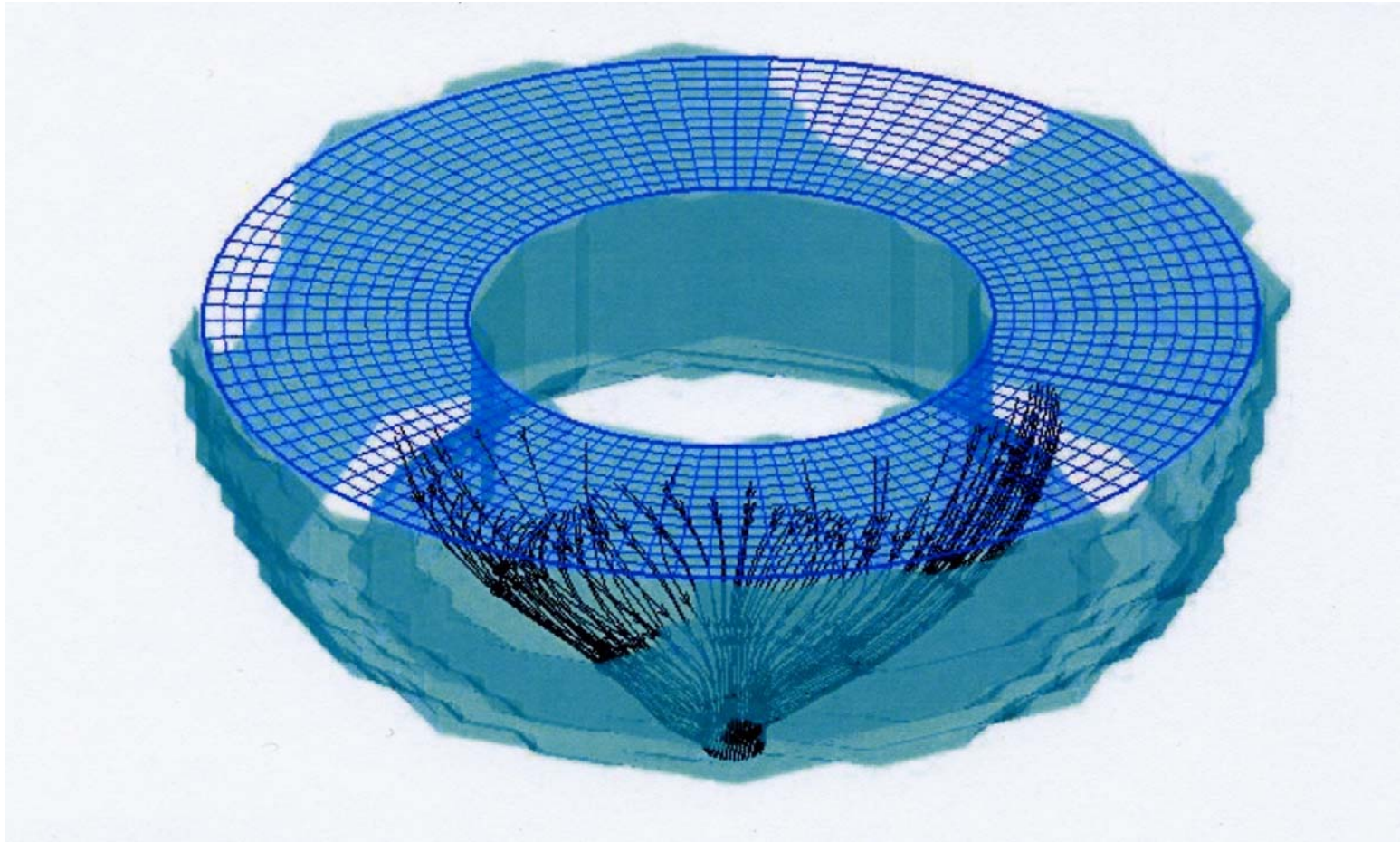
Schema Versuchsanlage



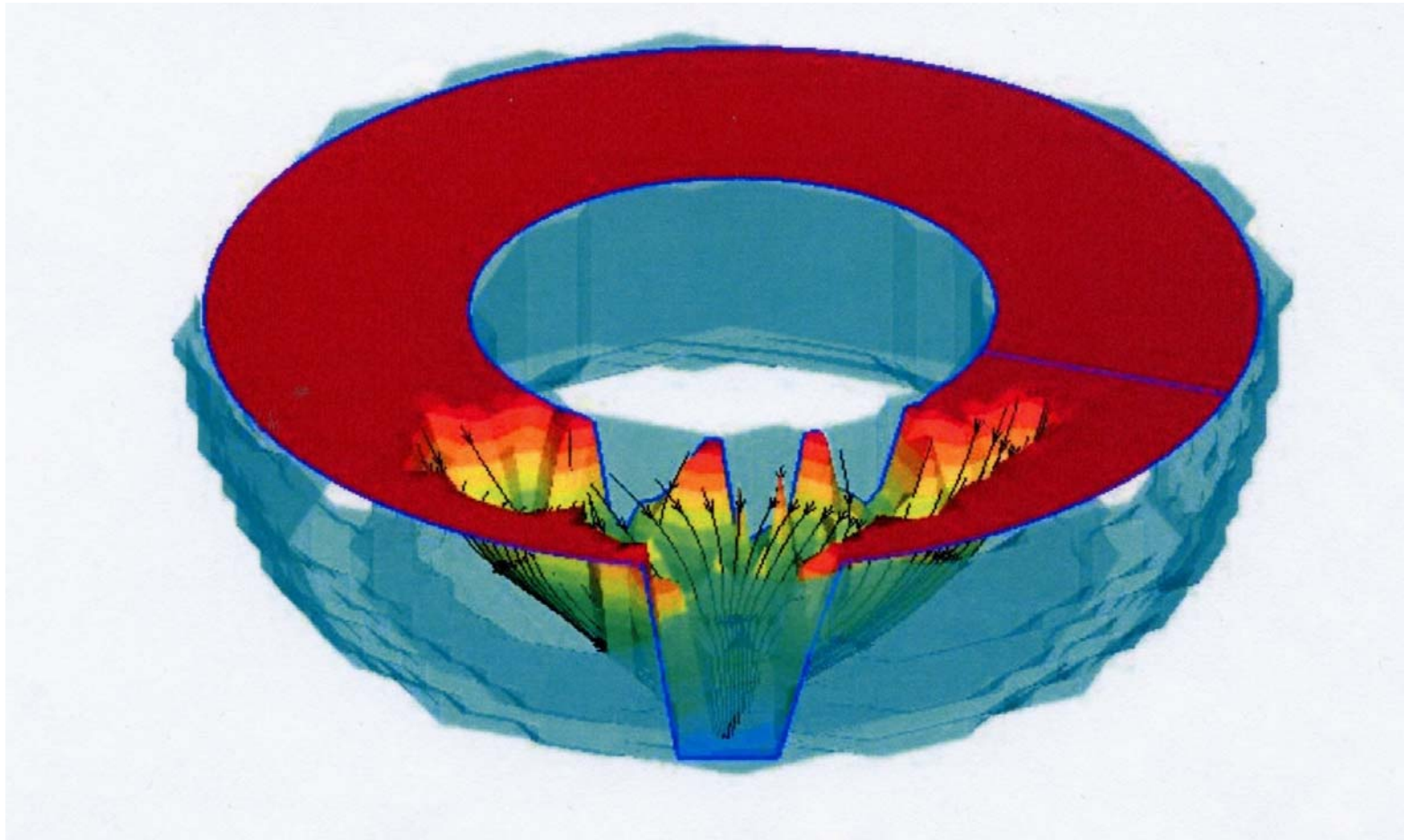
Sedimentation in Kondensationskammer 2

- Erstellung eines 3D-Modelles für die Kondensationskammer am Beispiel KKB
- Annahme einer homogenen Verteilung feinen Materials nach dem Blowdown
- Analyse verschiedener Fälle mit und ohne Überlagerung von Einzelfehler und Reparatur
- Berechnung der Strömungsfelder und der Sedimentation zeigte, dass höhere Geschwindigkeiten nur in Siebnähe auftreten
- Sedimentierter Anteil ist $> 80 \%$, sodass die bisherigen Annahmen konservativ sind

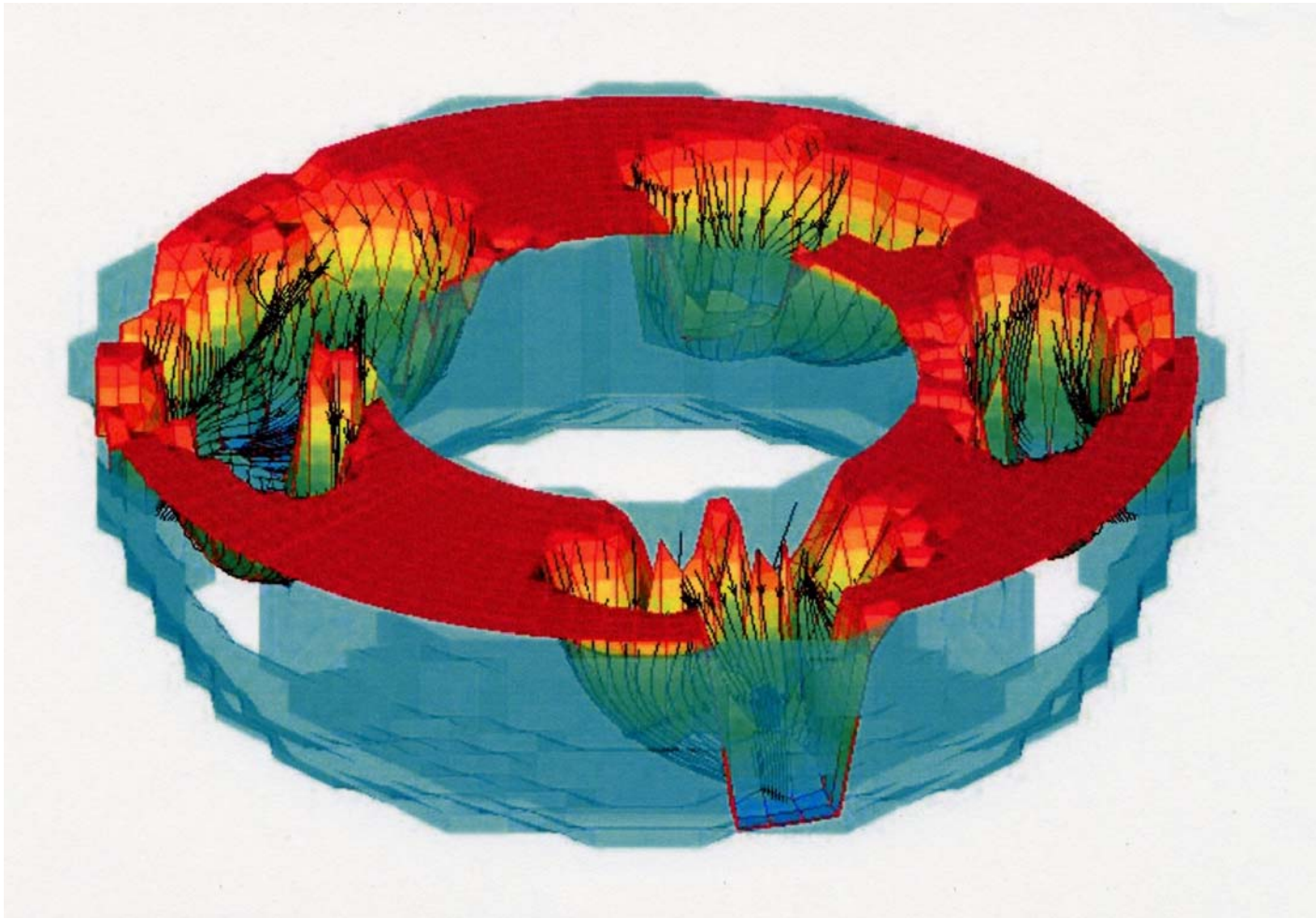
Modell Kondensationskammer



Strömungsmodell Koka (1 Strang in Betrieb)



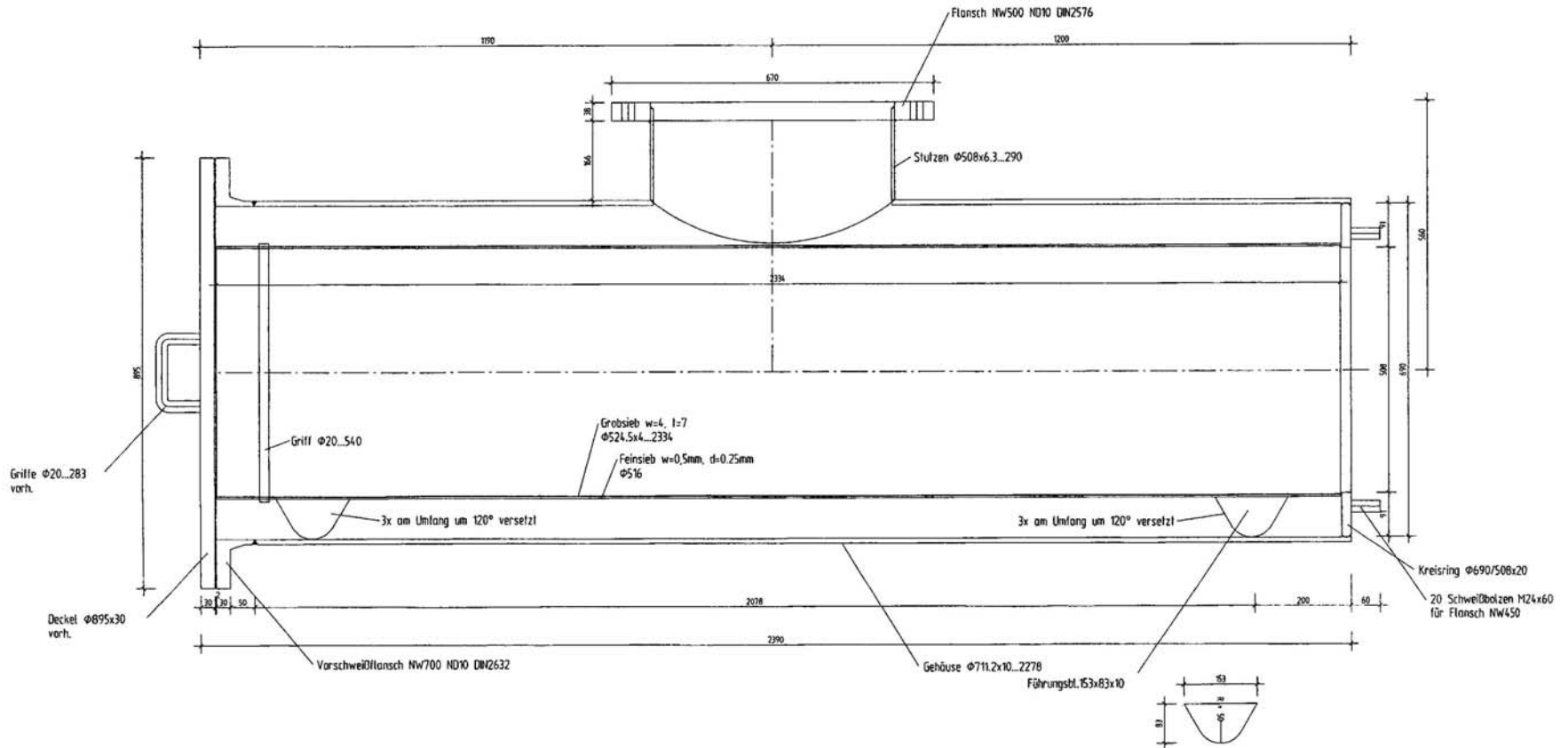
Strömungsmodell Koka (5 Stränge in Betrieb)



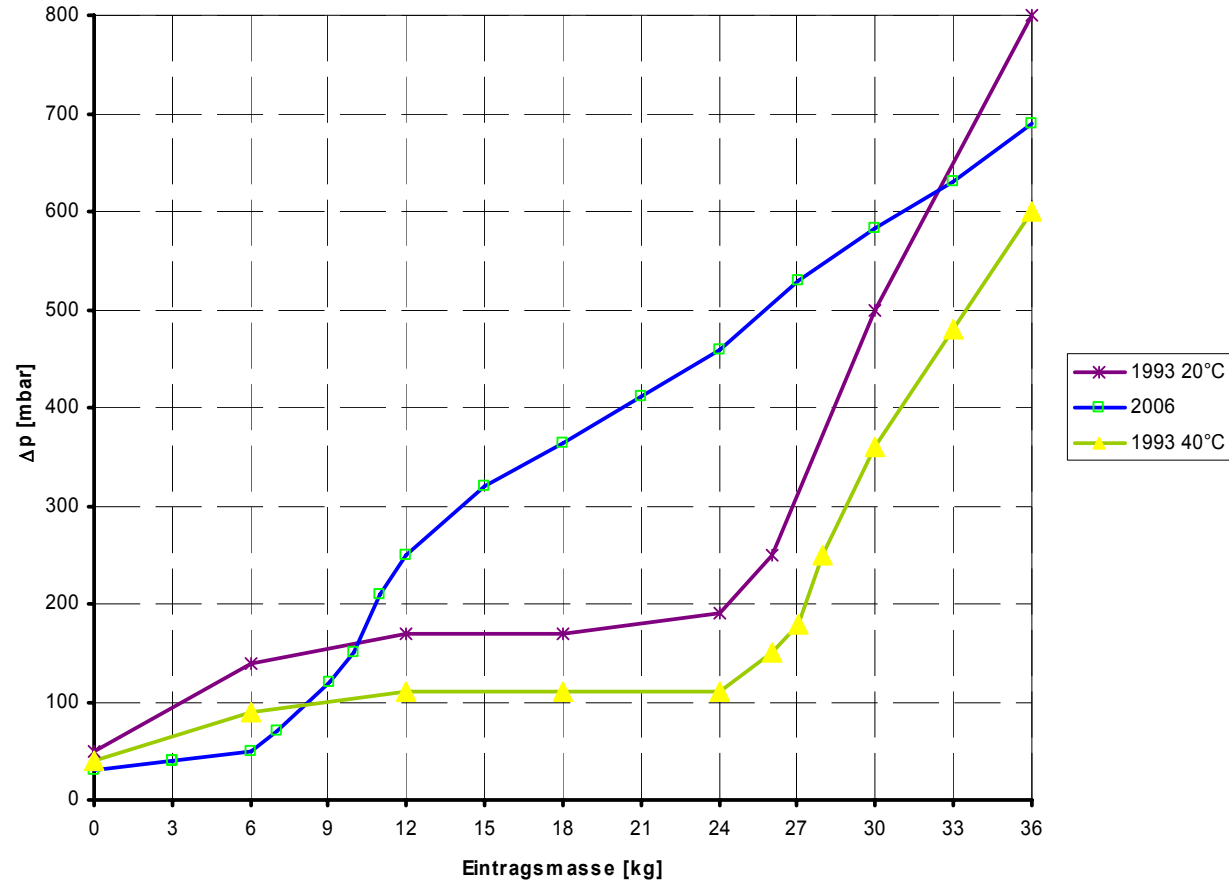
Massenpenetration durch Siebe

- Überprüfung von Pumpensaugsieben unter Verwendung feinen Materials im Maßstab 1:1
- Durchgeführte Versuche zeigen, dass Massenpenetration aufgrund des feinen Materials höher ist als bisher angenommen
- Druckverluste liegen im Bereich der 1993 gemessenen Werte

Nachbau Pumpensaugsieb im Maßstab 1:1



Differenzdruckverlauf in Abhängigkeit von der Beladung mit Isolationsmaterial



NPSH-Reserve der Not- und Nachkühlpumpen

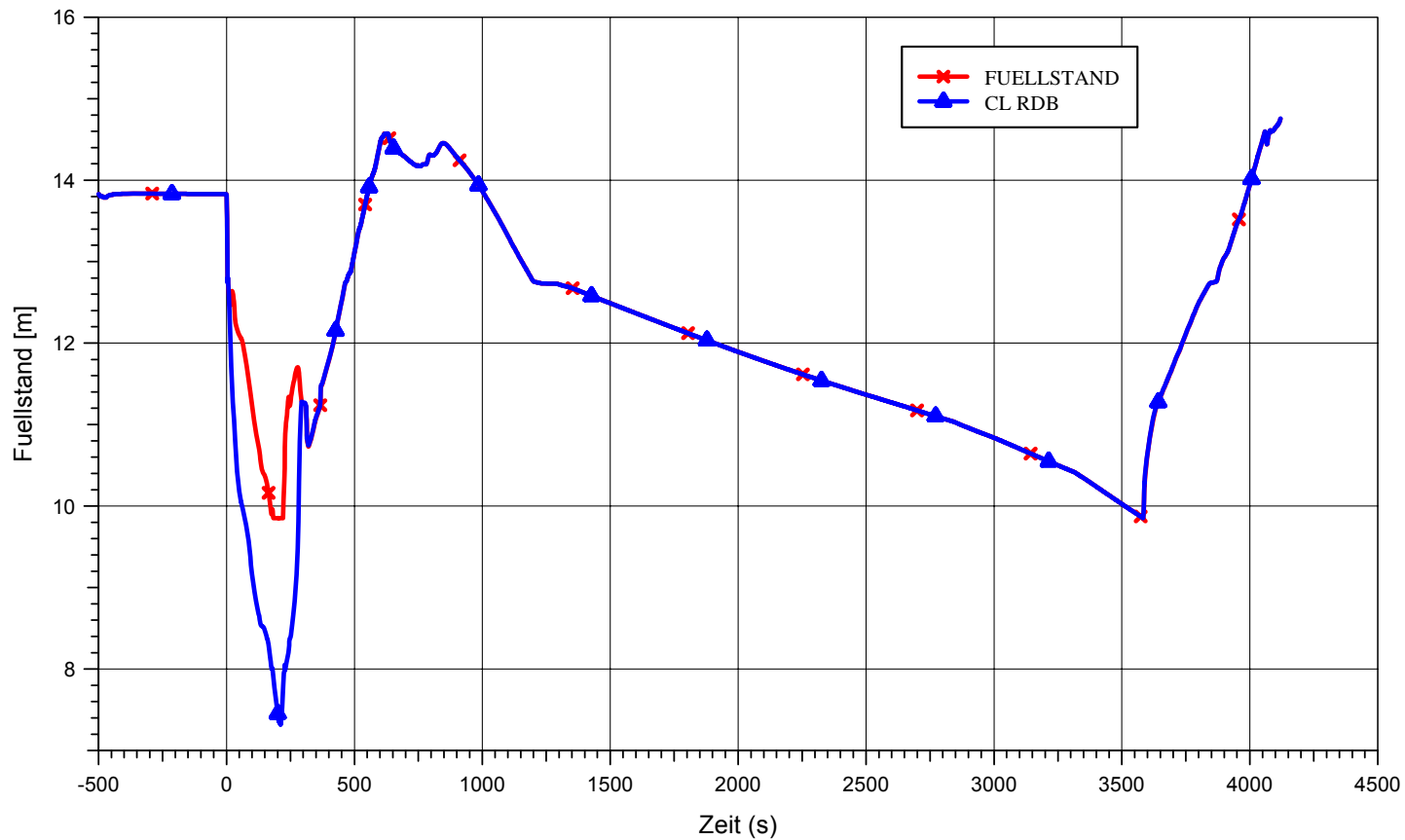
- Bisherige Beurteilung der NPSH-Reserven teilweise unter Verwendung sehr konservativer Randbedingungen (Sättigung und druckloser Sicherheitsbehälter)
- Überprüfung der bisherigen Annahmen durch detaillierte Störfallablaufberechnung mit ATHLET und COCOSYS
- Da Sumpfwasser unterkühlt ist und Überdruck im SHB vorherrscht, sind die Reserven höher als bisher angenommen
- Kleinste Reserve ergibt sich unmittelbar vor Abschaltung der Rückförderung aus dem SHB-Sumpf (> 1 Stunde nach Störfalleintritt)
- Berechnete NPSH-Reserve für zulässigen Differenzdruck an Sieben beträgt ca. 7 m bei Pumpennennfördermenge

Beurteilung Reaktorkern

- Bisherige Annahmen aus 1997 zur Verteilung des Materials im Kern sehr konservativ (Gleichverteilung über Abstandshalter)
- Bisher verwendete Verlustbeiwerte sehr konservativ, da keine experimentellen Daten vorlagen (1997/98)
- Neuberechnung mit ATHLET für eine repräsentative Anlage mit realistischer Materialverteilung und realistischen Verlustbeiwerten auf Basis von Brennelementversuchen für SWR aus 2001
- Analysen zeigen, dass auch bei einem heute anzunehmenden, erhöhten Eintrag von Isolationsmaterial in den Reaktorkern keine Brennstabaufheizung stattfindet
- Kein Dampfaustritt in den SHB, da beim SWR hohe Wasserüberdeckung des Reaktorkernes, sodass entstehender Dampf kondensiert
- Wird eine teilweise Aufheizung zugelassen, ergeben sich wesentlich höhere zulässige Eintragsmengen

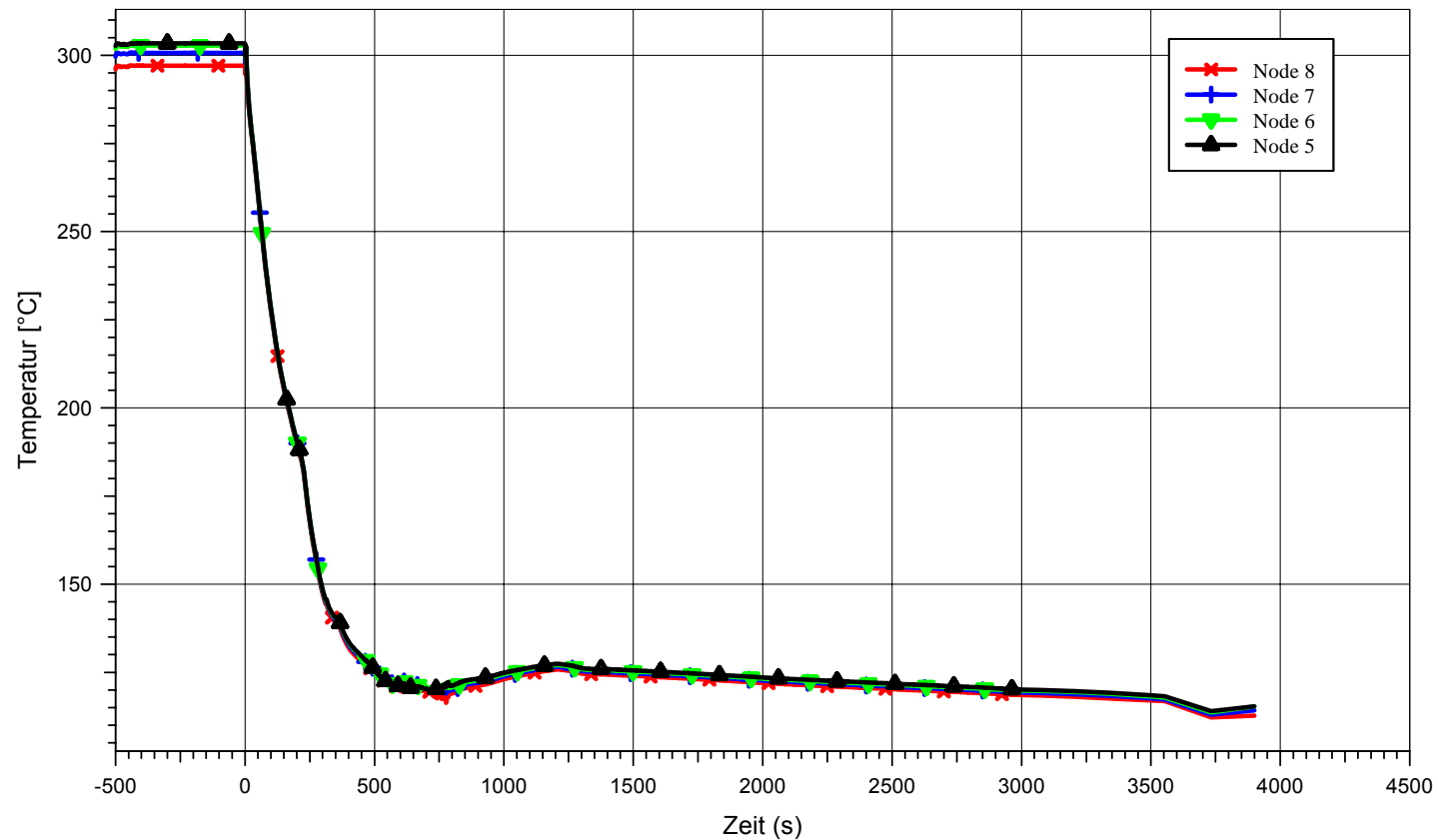
Beispielhafter RDB-Füllstandsverlauf

KKK: BE-Verstopfung, Speisewasserleitungsbruch RL38Z101, Verstopfung unterster Abstandshalter



Beispielhafter Verlauf BE-Oberflächentemperatur

KKK: BE-Verstopfung, Speisewasserleitungsbruch RL38Z101, Verstopfung unterster Abstandshalter

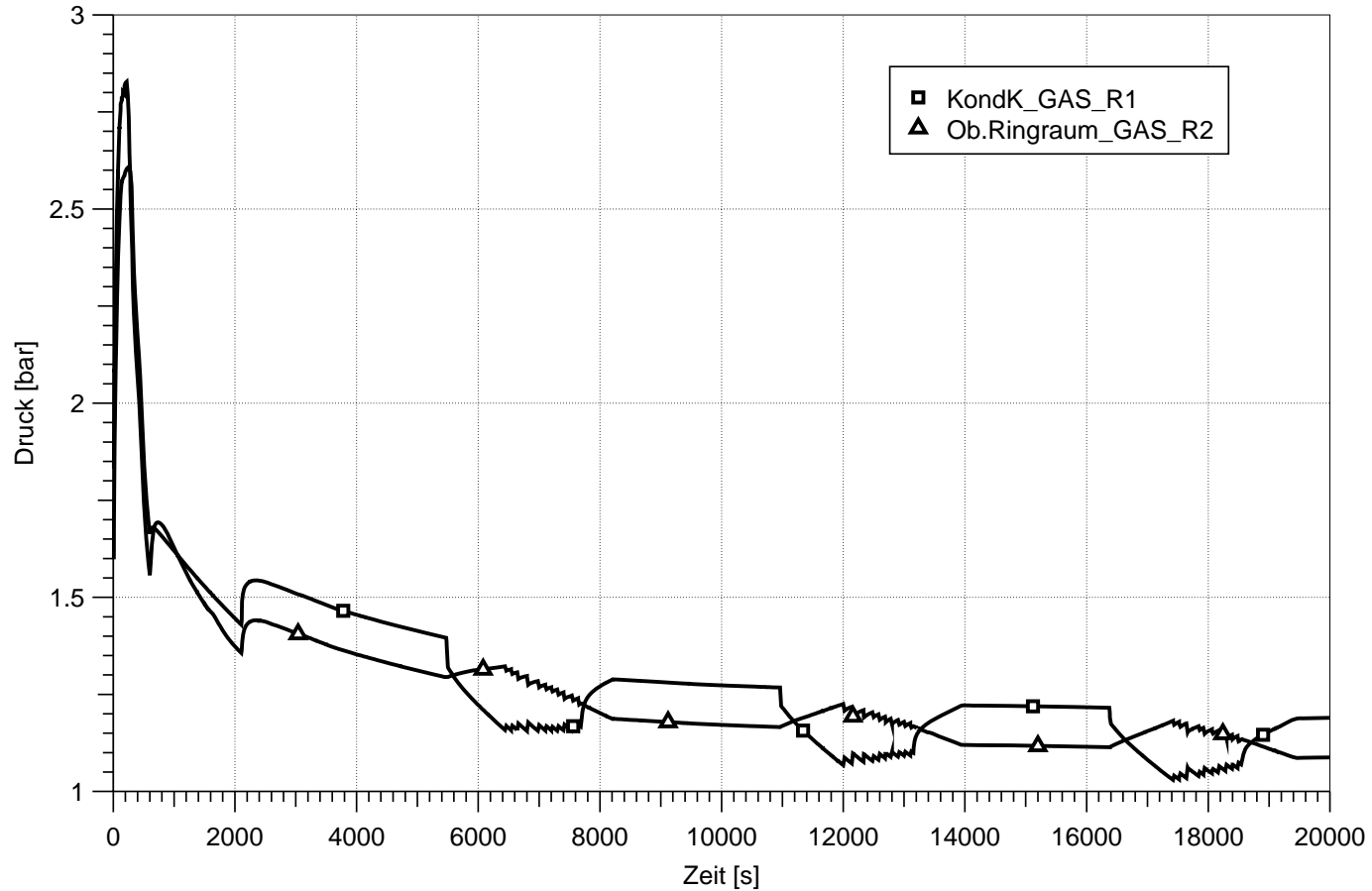


Langzeitverhalten Differenzdrücke

- Bei DWR-Anlagen wird langfristige Differenzdruckerhöhung in Folge von Korrosion (Bor), Staub oder Beschichtungen diskutiert
- Bei SWR-Anlagen sind die Sicherheitsbehälter (SHB) wesentlich kleiner, sodass aus Staub und Verunreinigungen kein Differenzdruckanstieg resultiert
- Bei SWR-Anlagen Korrosionsgefährdung wesentlich geringer, da keine Verwendung von Borsäure sondern Deionat, SHB ist inertisiert, somit geringer Sauerstoffanteil
- Druck im SHB bei SWR-Anlagen wenige Stunden nach Störfalleintritt wieder unterhalb der Reaktorschutzgrenzwerte, sodass Systeme wieder betrieblich gefahren werden können
- Verringerung der Mengenströme und Abschaltung einzelner Stränge möglich, wodurch die Differenzdrücke stark reduziert werden können
- Siebe in einzelnen SWR-Anlagen außerhalb des SHB angeordnet, sodass langfristig die Möglichkeit der Reinigung besteht

Beispielhafter Druckverlauf im SHB bei KMV-Störfall

KKB 2F-Bruch Speisewasserleitung



Zusammenfassung

- Aufgrund der RSK-Stellungnahme und der international stattfindenden Diskussionen wurden neue Bewertungen für die SWR-Anlagen durchgeführt
- Die Ergebnisse der einzelnen Untersuchungsschwerpunkte zeigen, dass der auslegungsgerechte Betrieb der Nachkühlpumpen gewährleistet ist
- Die Eintragsmengen in den Reaktorkern sind ausreichend begrenzt, sodass die Kernkühlung gewährleistet ist
- Störfallbeherrschung somit mit den realisierten Maßnahmen sichergestellt

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

**Untersuchungen zu DWR:
Freisetzung des Isoliermaterials,
Transport zum Sumpf, Verhalten im
Sumpf, Siebbelegung und
Langzeiteffekte**

Ulrich Waas, Framatome ANP GmbH, Erlangen

Untersuchungen zu DWR:

Freisetzung des Isoliermaterials, Transport zum Sumpf, Verhalten im Sumpf, Siebbelegung und Langzeiteffekte

Ulrich Waas, AREVA NP, Erlangen

In Siemens-DWR ist im Vergleich zu vielen Anlagen anderer Hersteller aufgrund des spezifischen Anlagen-Layouts und des Isolierungskonzeptes sowohl mit einer geringeren Isoliermaterialfreisetzung als auch mit einem geringeren Eintrag in den Sumpf zu rechnen (siehe Abb. 2). Die Schutzwirkung für das Isoliermaterial durch die Edelstahlblechkassetten zeigen die Abbildungen 2 und 3. Selbst im Nahbereich eines Lecks werden die Kassetten teilweise nur zusammengedrückt und nicht aufgerissen und geben damit das Isoliermaterial nicht frei. Die entsprechenden Fragmentierungsversuche wurden am Großarmaturenprüfstand in Karlstein durchgeführt, der aufgrund des dort vorhandenen sehr großen Druckspeichers besonders realitätsnahe Versuche zulässt.

Die Untersuchungen zum Verhalten des fragmentierten Isoliermaterials im Sumpf, zur entstehenden Siebbelegung im Sumpfbetrieb und zu den Langzeiteffekte aufgrund eventueller chemischer Einwirkungen wurden im Versuchsstand Erlanger Wanne durchgeführt. Mit dem Versuchsstand sind unter anlagenähnlichen Randbedingungen Integralversuche möglich (siehe Abbildung 5). Die Skalierung des Versuchsstandes liegt in vertikaler Richtung im Vergleich zur realen Anlage nahe bei 1:1, horizontal (Fläche) bei ca. 1:30 bzw. 1:60.

Aufgrund der in vertikaler Richtung anlagenähnlicher Skalierung können die Phänomene, die die Strömungsverhältnisse im Sumpfbetrieb wesentlich prägen, realistisch nachgebildet werden (Abbildung 6). Wesentlich hierbei ist der Luftmitriss des aus ca. 7m Höhe in das Sumpfwasser fallenden Leckwassers. Die mitgerissene Luft führt zu einem erheblichen Auftrieb, der dominierend gegenüber anderen Einflüssen Wasserwalzen verursacht, in denen das fragmentierte Isoliermaterial „gespeichert“ wird. Dies führt zu einem gänzlich anderen Mechanismus der Siebbelegung, als dies sonst in Strömungswannen bisher simuliert wurde.

Die Ausbildung der Siebbelegung und die dabei entstehenden Druckverluste über das Sumpfsieb hängen von einer ganzen Reihe von Einflussfaktoren ab (siehe Abbildung 7).

Die Versuche haben gezeigt, dass diese Einflussfaktoren unterschiedliche Bedeutung haben. Mit Kenntnis der Sensivität der Einflussfaktoren konnten abdeckende Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Differenzdrücke über die Sumpfsiebe abgeleitet werden (Abbildung 8). Eine deutlich konservative Randbedingung in den Versuchen bestand darin, dass die Wassertemperatur unter 50 °C lag, während in der realen Anlage in den ersten ca. 2 Stunden, in denen die Transport- und Sedimentationsprozesse im Wesentlichen abgeschlossen werden, die Temperatur noch über 70°C liegt. Bei diesen höheren Temperaturen ist die Sedimentation stärker und damit letztlich die Ablagerung auf den Sumpfsieben (Transportfaktor) kleiner ausgeprägt (siehe Abbildung 9). Für die Ableitung der numerischen Korrelationen wurden deshalb die Messwerte im Bereich zwischen 35°C und 50°C verwendet, nicht jedoch die noch konservativeren unter 35°C (Abbildung 10). Bei den Korrelationen wurden Einflüsse anderer Faktoren für jede Mineralwollart durch einhüllende Werte abgedeckt. Die Korrelationen sind damit für die Siemens-DWR für die jeweilige Mineralwollart abdeckend hinsichtlich der Berechnung der Druckdifferenz über die Sumpfsiebe (Abbildungen 10 + 11).

Für geringe Anteile von partikelförmig fragmentierten in faserförmigem Isoliermaterial kann der Einfluss auf die Druckdifferenzerhöhung durch Zuschlagsfaktoren berücksichtigt werden (siehe Abbildung 12).

Bei einer Maschenweite der Sumpfsiebe von 3x3 mm oder kleiner und bei Verwendung von Mineralwolle Isover (MD2-83, MD2-2004, MDK) ist der noch vorhandene Schlupf durch die Sumpfsiebe so fein, dass er weder im BE-Fuß noch im BE-Abstandshalter nennenswert zurückgehalten wird (Abbildung 13). Die Verwendung von Sumpfsieben der Maschenweite 3x3 mm stellt damit sicher, dass der Kühlmitteldurchsatz durch die Brennelemente nicht beeinträchtigt wird.

Die Ergebnisse aus den Versuchen in der Erlanger Wanne können für eine abdeckende Anlagenanalyse verwendet werden, da eine Reihe von Randbedingungen konservativ gewählt wurde (siehe Abbildung 14).

Einen weiteren wesentlichen Erkenntniszuwachs ergaben Integralversuche in der Erlanger Wanne zum Langzeitverhalten unter Berücksichtigung möglicher chemischer Effekte (Abbildung 15).

Durch die Versuche konnte eindeutig gezeigt werden, dass unter den in deutschen DWR gegebenen Randbedingungen ein längerfristiger Anstieg der Druckdifferenz über die Sumpfsiebe im Wesentlichen verursacht wird durch die Bildung von Korrosionsprodukten infolge der Einwirkung des borierten Leckwassers auf verzinkte oder ferritische Oberflächen (Abbildungen 16 - 18). Am schnellsten tritt dieser Effekt auf, wenn der Leckmassenstrom auf verzinkte oder ferritische Oberflächen oberhalb des Sumpfwassers ... trifft, da es dann zu einer Kombination von Korrosions- und Erosionseinwirkung kommt.

Weitere Einflussfaktoren, die den Zeitpunkt und die Geschwindigkeit des Differenzdruckanstiegs bestimmen, sind der Alterungszustand der Verzinkung (gealtert wirkt verzögernd durch passive Schutzschicht) und der pH-Wert des Sumpfwassers (höherer Wert verlangsamt, Abbildungen 19 + 20).

Unter typischen Bedingungen für Siemens-DWR (u.a. gealterte verzinkte Oberflächen, pH-Wert anfangs etwas unter 6) zeigten verschiedene Versuche, dass selbst bei Einwirkung des Leckstrahls auf verzinkte Oberflächen ein signifikanter Anstieg des Druckverlusts erst nach ca. 10 Stunden beginnt, d.h. erst weit in der Nachstörfallphase (Abbildung 21). In mehreren Versuchen mit ansonsten variierten Randbedingungen konnte gezeigt werden, dass bei Abfahren der Umwälzpumpen auf Mindestmenge (d.h. kein Durchsatz durch die Sumpfsiebe) die Siebbelegung in großem Umfang abfällt, wenn das Abfahren auf Mindestmenge nach ca. 10 Stunden erfolgt, also vor einem signifikanten Differenzdruckanstieg durch Einlagerung von Korrosionsprodukten. Nach dem Wiedereinschalten der Pumpen kommt es nicht zu einem Wiederaufbau der Siebbelegung, so dass auch langfristig der Differenzdruck über die Sumpfsiebe niedrig bleibt (Abbildungen 22 + 23).

Mit den inzwischen vorliegenden Versuchsergebnissen ist eine ausreichende Datenbasis für die Anlagenanalyse hinsichtlich Differenzdruck über die Sumpfsiebe vorhanden (Abbildung 24). Die aufgrund der Versuchsergebnisse durchgeführten Optimierungsmaßnahmen haben sich bewährt.

Untersuchungen zu DWR:

- ***Freisetzung des Isoliermaterials,***
- ***Transport zum Sumpf,***
- ***Verhalten im Sumpf,***
- ***Siebbelegung und***
- ***Langzeiteffekte***

Ulrich Waas

AREVA NP, Erlangen

Freisetzung des Isoliermaterials und Transport in den Sumpf

- > **Erheblich geringere Isoliermaterialfreisetzung**
in Siemens-DWR im Vergleich zu vielen Anlagen anderer Hersteller durch
 - großen Aufwand für Bruchausschluß (über LvB hinausgehend!), in größeren Rohrleitungen und Komponenten wanddurchdringender Riss nicht zu erwarten
 - wesentlich günstigeres Gebäudekonzept vor allem im Dampferzeugerbereich, nur Bereich unter Rohrboden betroffen
 - weitgehende Verwendung von Edelstahlblech-ummantelten Isolierkassetten, so dass selbst im Nahbereich des Lecks nur teilweise Freisetzung
- > **Erheblich geringerer Transport/Eintrag in den Sumpf** durch
 - Austrag besonders des fein fragmentierten Isoliermaterials aus den sumpfnahen großen Anlagenräumen in die Betriebsräume ohne direkten Rücklauf
 - Großes Volldruckcontainment/große Ablagerungsflächen
 - Kein Containment-Sprühsystem

Fazit: Eintrag von fragmentiertem Isoliermaterial etwa 1 Größenordnung geringer als z.B. bei Anlagen mit Westinghouse-Design

Fragmentierungsversuche - Ergebnisse



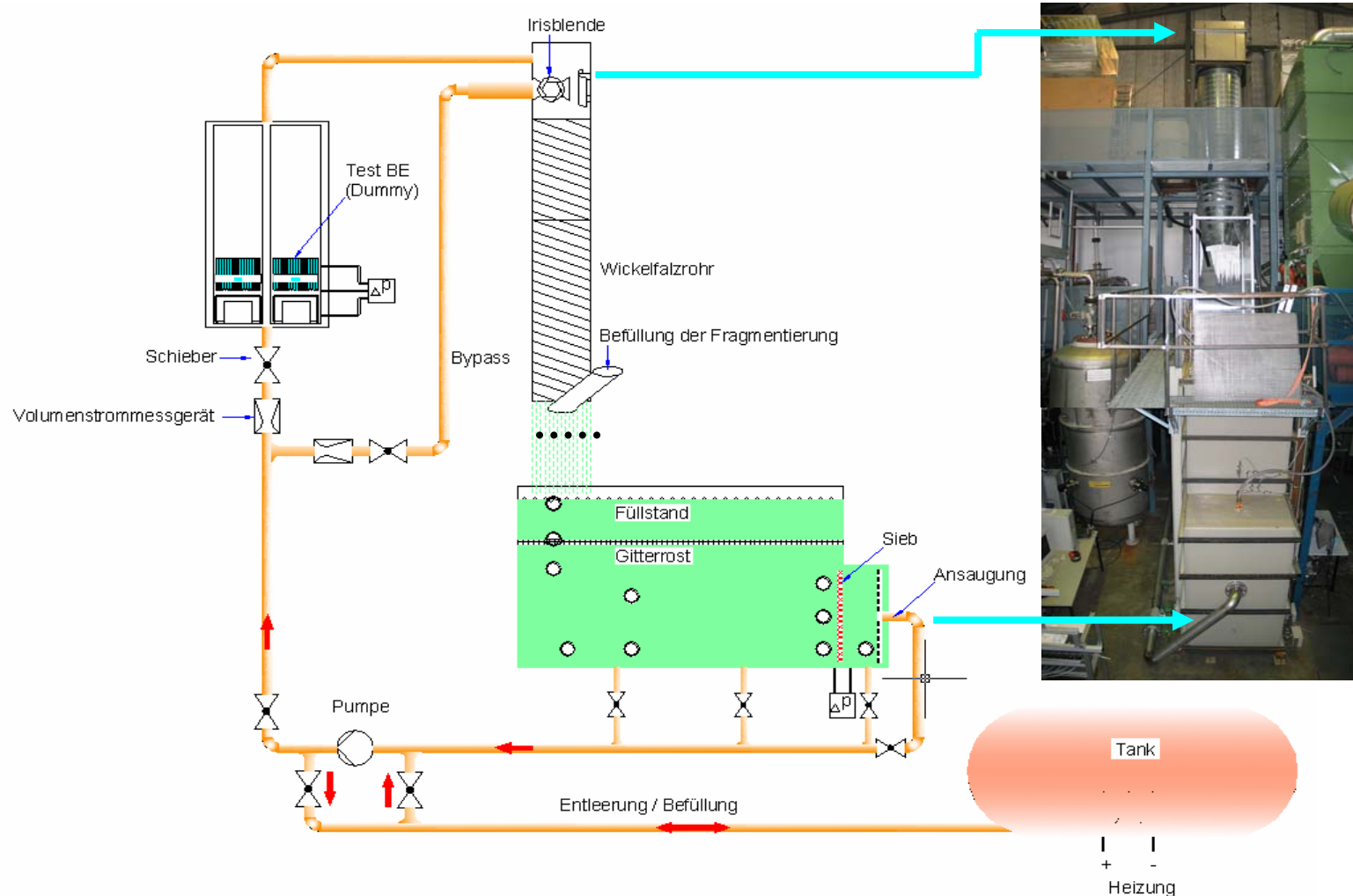
Zusammengedrückte, aber geschlossene Kasette nach Versuch FV5_1

Fragmentierungsversuche - Ergebnisse



Lage der beiden oberen (vorn im Bild) und unteren (hinten im Bild) Kassetten nach Versuch

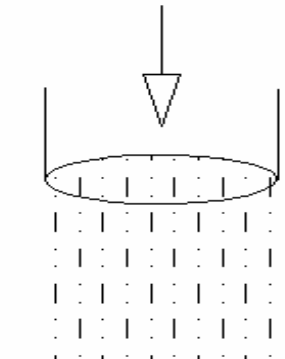
Verhalten im Sumpf - Versuchsstand Erlanger Wanne



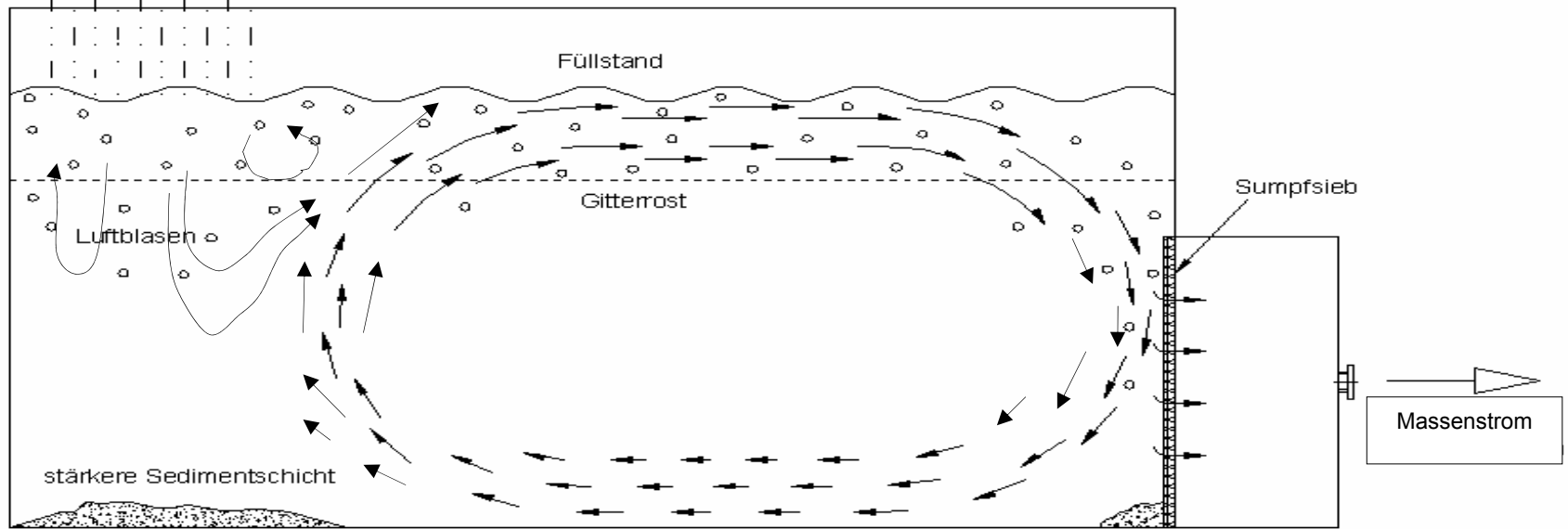
- Theoretisches Modell zur Einstellung experimenteller Parameter existiert, durch Vergleich GKSS-Versuch / Wannerversuch bestätigt
- Abdeckende Abbildung des Transport- und Sedimentationsverhaltens im Sumpf realer Anlagen

Grundlegendes Strömungsphänomen bei Versuchen

Verständnis zur Bewertung konservativer Randbedingungen wichtig



Luftmitriss des Leckmassenstroms prägt Strömungsverhältnisse („Wasserwalze“) auf, die dominierend sind gegenüber dem Durchsatz durch das Sumpfsieb.
 Luftmitriss ist experimentell zu ermitteln, da er nach heutigem Stand nicht mit CFD-Codes berechnet werden kann.



Faserstücke und Partikel werden in Wasserwalze „gespeichert“. Ein Teil (bevorzugt gröbere Fragmente) sedimentiert in strömungsberuhigten Zonen. Siebbelegung entsteht durch „Abschälen“ eines Teilstroms ► Die „Sortierung“ sorgt dafür, dass im Versuchsverlauf zunehmend nur feines Material auf Sumpfsieb abgelagert wird.

Siebbelegung - Sensitivität von Einflussfaktoren auf Δp Sumpfsieb

Viele Einflussfaktoren (überwiegend durch Änderung der Porosität wirksam):

- > Einspeiserate/Durchsatz im Flutbetrieb (**mäßig**)
- > Durchsatz im Sumpfbetrieb (**wichtig**)
- > Temperatur des Sumpfwassers - Viskosität/Sedimentation (**wichtig**)
- > Änderungen Geometrie/Strömungsverhältnisse (**nicht so wichtig**)
- > verschiedene Isoliermaterialarten (**wichtig**)
- > Fragmentierungsgrad Mineralwolle (**nicht so wichtig**, wenn genügend feines Material vorhanden)
- > mikroporöse Dämmstoffe (**wichtig**)
- > Staub (**weniger wichtig**)
- > Strömungsgeschwindigkeit am Sieb (**wichtig**)
- > Siebgröße (**wichtig**), Siebform - gefaltet/glatt (**unwichtig**)
- > Maschenweite des Siebes (**unwichtig**, wenn Schlupf/Kerneintrag gering)
- > Komprimierung des Belags auf dem Sieb (bei höheren Differenzdrücken zu beachten)

Mit Kenntnis der Sensitivitäten aus den Versuchen war es möglich,

- > **Einfache, generische, abdeckende Berechnungsverfahren für Δp abzuleiten,**
- > **Konservativität der aus den GKSS-Versuchen abgeleiteten Annahmen zu bestätigen.**

Siebbelegung - Auswertung der Versuche

Variationen der Einflussfaktoren führen zu erheblicher Streuung der Messwerte.

Vorgehen zur **vereinfachten abdeckenden** Auswertung

- Unterscheidung der Messwerte nur nach Materialart und Versuchstemperatur

Generische, abdeckende Korrelationen/Kurven werden ermittelt für

- den „**eintragungsspezifischen Druckverlust**“ (Welcher Druckverlust ergibt sich je kg Eintrag an Isoliermaterialfragmenten in den Sumpf?)

Weitere Variable: Siebfläche und Geschwindigkeit am Sieb

- den **Transportfaktor** (welcher Anteil des Eintrags wird am Sieb abgelagert?)

Weitere Variable: Durchsatz im Sumpfbetrieb

den „**belegungsspezifischen Druckverlust**“ (wie hoch ist der Druckverlust je kg/m² Belegung auf dem Sieb)

Weitere Variable: Geschwindigkeit am Sieb

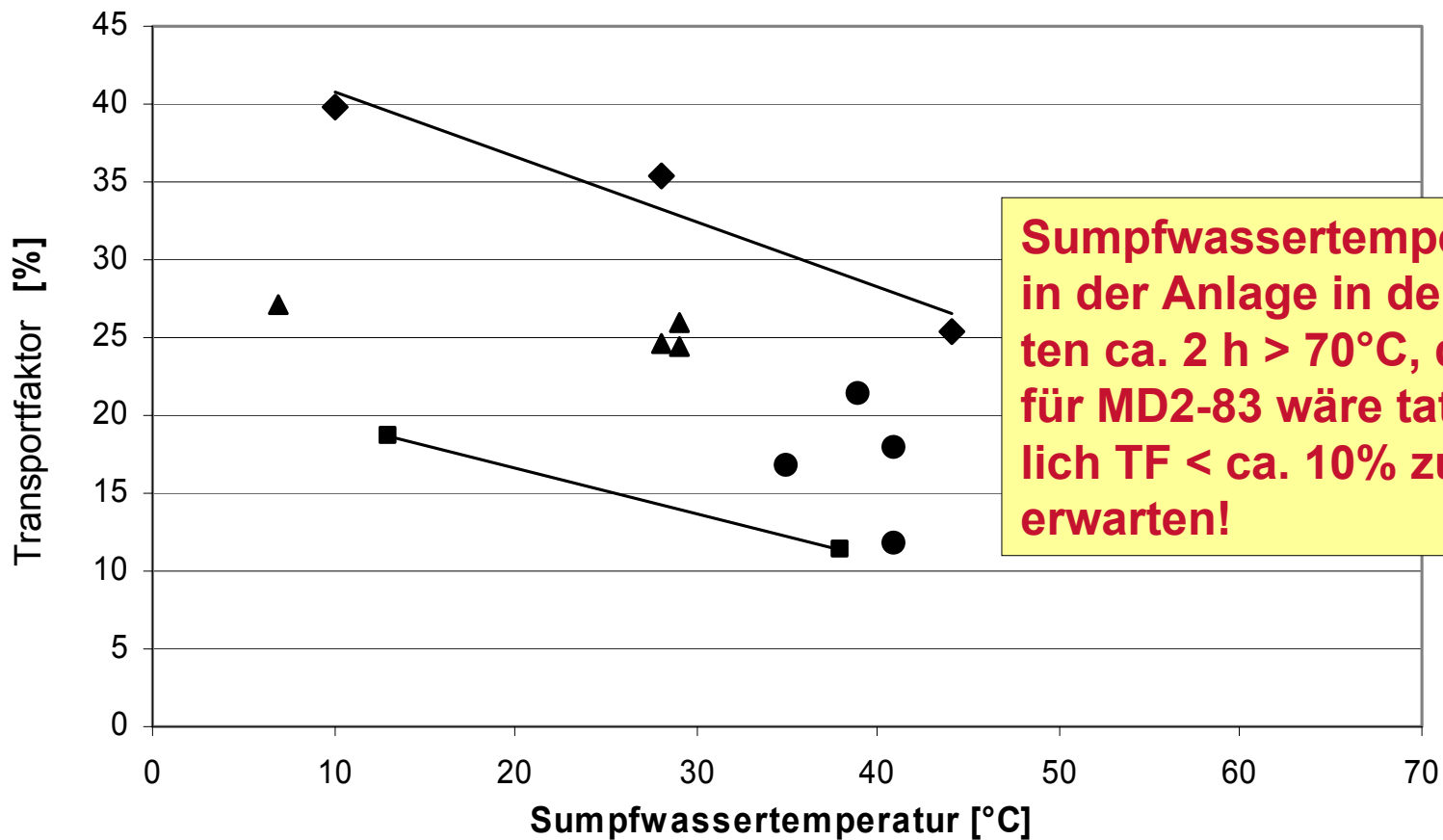
- > Alle anderen durch Parametervariationen verursachten Messwertstreuungen werden durch eine konservativ einhüllende Kurve abgedeckt. (Mikroporöse Dämmstoffe, Staub werden separat behandelt.)

Korrelationen sind abdeckend für Siemens-DWR.

Anlagenspezifisch können mit Zusatzbetrachtungen weniger konservative Δp -Werte bestimmt werden.

Beispiel Konservativität: Temperatur während Sedimentation

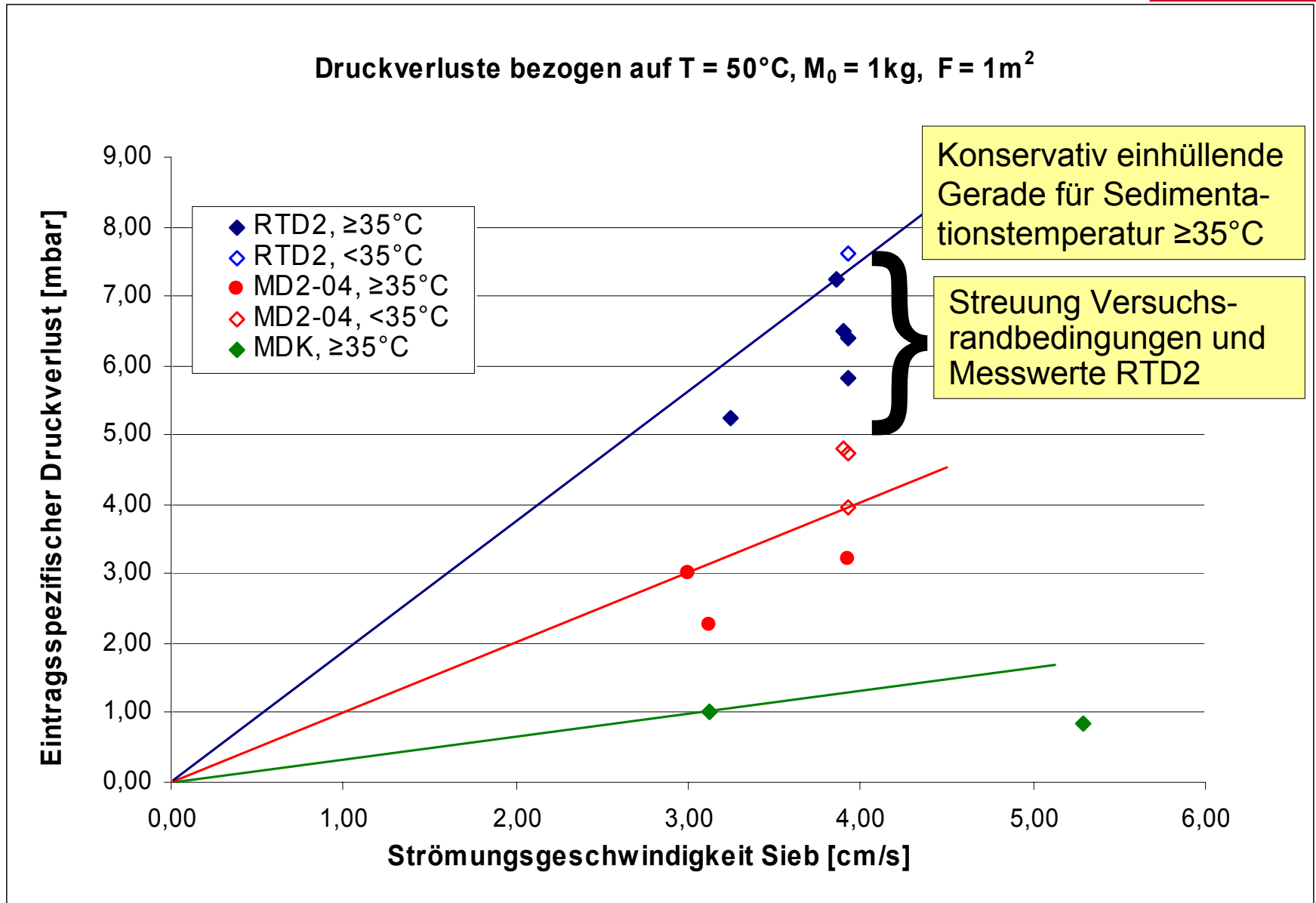
Mit steigender Temperatur sinkt Transportfaktor.



Sumpfwassertemperatur in der Anlage in den ersten ca. 2 h > 70°C, d.h. für MD2-83 wäre tatsächlich TF < ca. 10% zu erwarten!

■ MD2-83, 11kg/s ▲ MD2-83, 22 kg/s ● MD2-83, 25-27 kg/s ◆ MD2-83, 30-33 kg/s

Beispiel für Ermittlung der Korrelationen eintragungsspezifischer Druckverlust



Abdeckende Berechnungsformeln für maximalen Differenzdruck über Sumpfsieb

- Über eintragspezifischen Druckverlust:

$$\Delta p_A (T) = \Delta p_{ES} \cdot M_{0A} / F_A \cdot v_A \cdot \eta (T_A) / \eta (50^\circ\text{C})$$

Index A: Anlagendaten

M_{0A} = Eintragsmenge [kg]

F_A = Siebfläche [m²]

v_A = Geschwindigkeit am Sieb [cm/s]

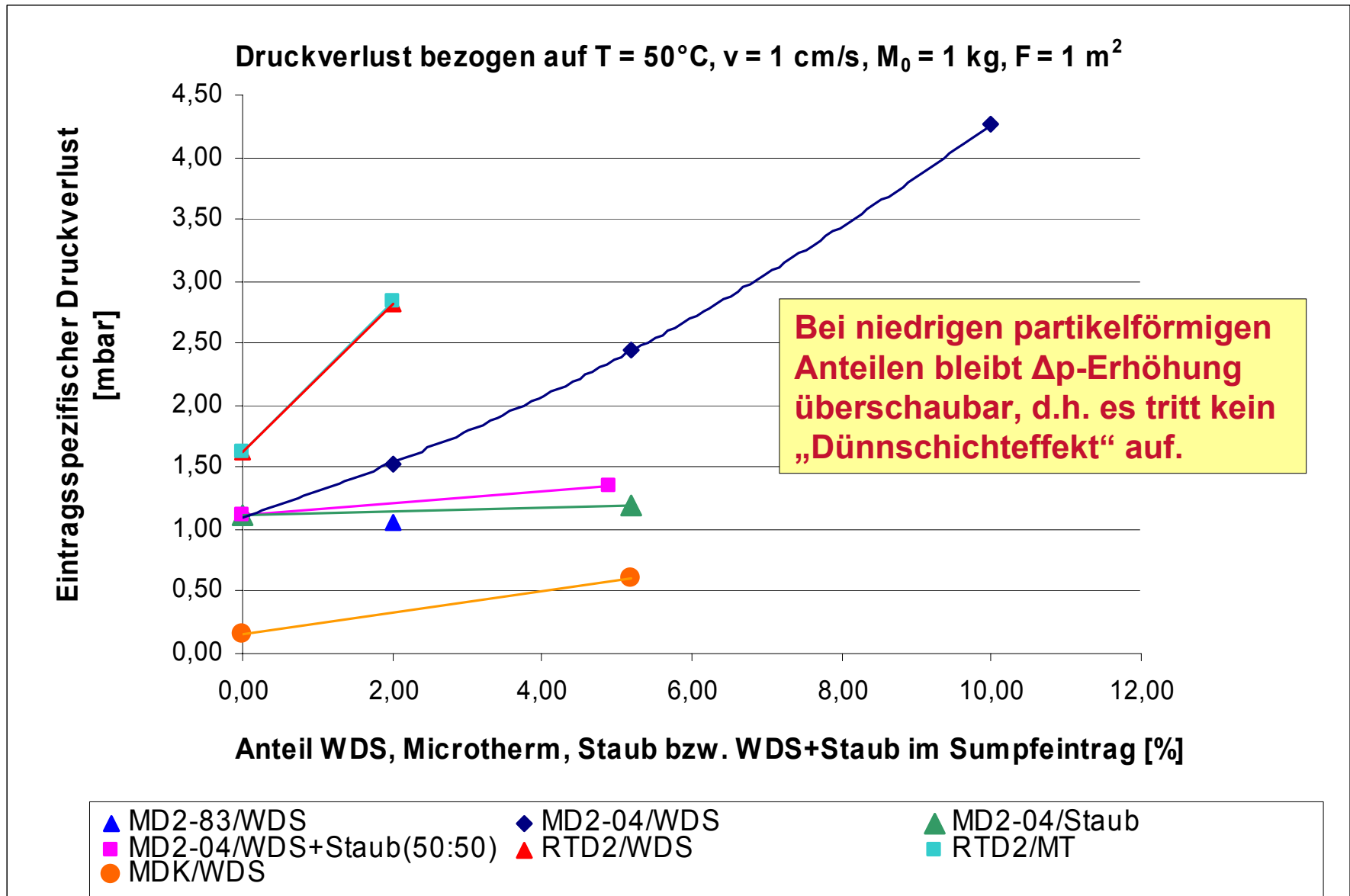
η = Viskosität

T_A = minimale Wassertemperatur im Sumpfbetrieb [°C]

	Δp_{ES} [mbar·m ² / kg·s/cm]
MD2-83	0,83
MD2-04	1,0
RTD2	1,9
MDK	0,33

- Für Berechnung über Transportfaktor und belegungsspezifischen Druckverlust → ähnliche Formel
- Für Beimischungen mikroporöser Dämmstoffe ist Zuschlagsfaktor zu berücksichtigen.

Δp -Erhöhung durch partikelförmige Beimischungen „Dünnschichteffekt“



Siebbelegung - Kerneintrag



Bei 3x3-Sieb und Mineralwolle MD (Isover): Auch nach mehrstündigem Sumpfbetrieb keine nennenswerten Ablagerungen am BE-AH erkennbar

Konservativitäten in Versuchen

- > In den Wannen-Versuchen wurde nur der „halbe“ Sumpf abgebildet, aber die für den gesamten Sumpf errechnete Eintragsmenge berücksichtigt; daher überhöhte Konzentration von fragmentiertem Isoliermaterial und verkürzte Zeiten für Umwälzung des Wassers.
- > Während Transport-/Sedimentationsphase war Temperatur mit $< 50\text{ °C}$ deutlich niedriger als in der Anlage mit Temperaturen oberhalb 70 °C , so dass in den Wannenversuchen Sedimentation deutlich unterschätzt wurde.
- > Der Bereich über den Decken der Sumpfansaugkammern wurde in den Versuchen nicht nachgebildet. In der Anlage würde ein erheblicher Teil des Massenstroms der sich ausbildenden Wasserwalze mit dem fragmentierten Isoliermaterial nicht unmittelbar vor dem Sumpfsieb nach unten geleitet, sondern über die Sumpfdecke strömen und dort weiteres Isoliermaterial ablagern, dadurch Verringerung der Ablagerung am Sumpfsieb.
- > In den Versuchen wurde das eingegebene Material vollständig gekärchert. Dies ist hinsichtlich Fragmentierungsgrad konservativ, da in Berechnung der Freisetzungsmengen auch Bereiche außerhalb des Einwirkungsbereichs des Leckstrahls berücksichtigt werden, bei denen eine gröbere Fragmentierung zu erwarten und auch beobachtet worden ist (insbesondere in aufgerissenen Kassetten verbleibendes Materials).

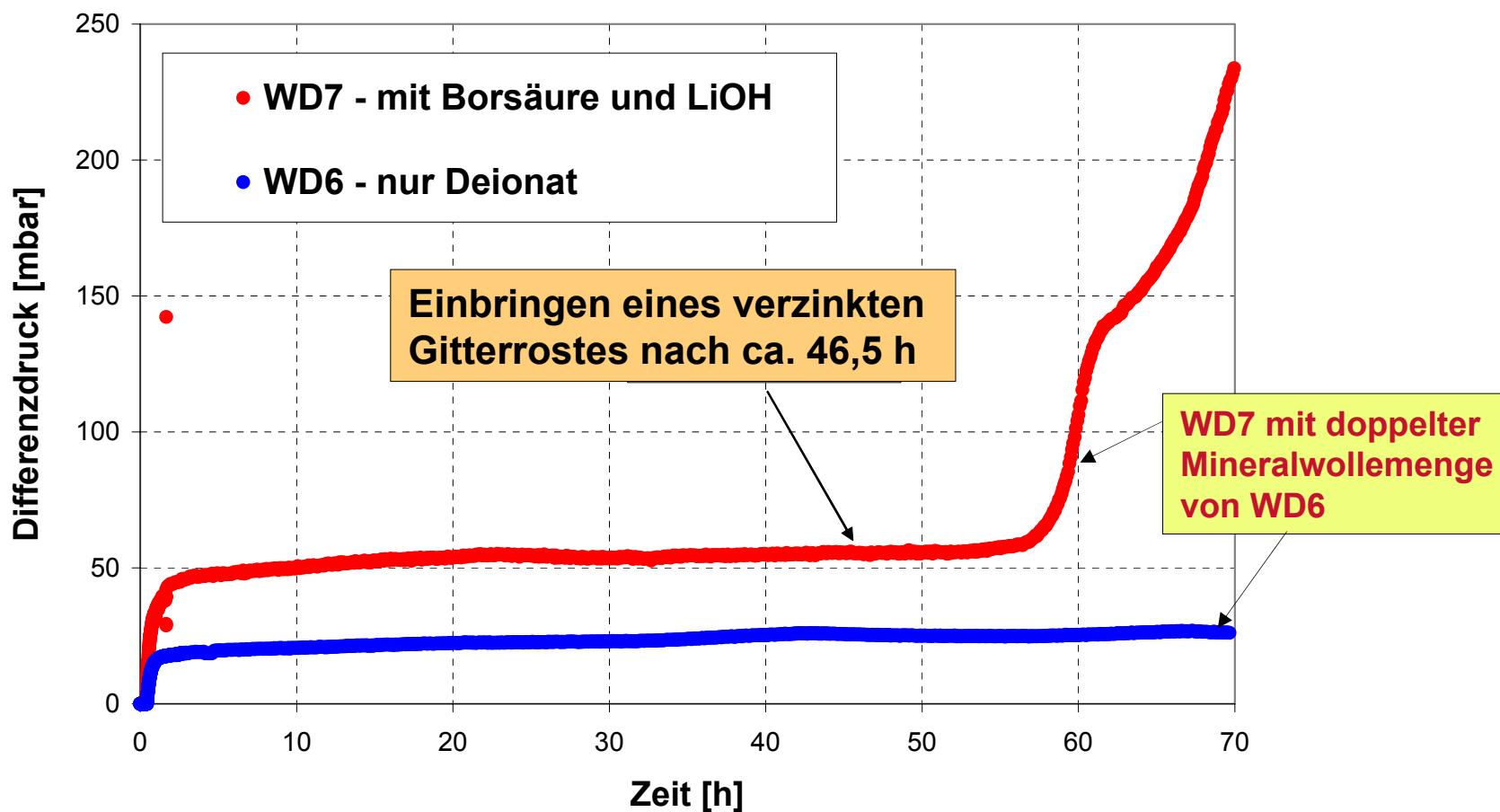
Langzeitverhalten - Randbedingungen der Versuche

- Insgesamt wurden mehrere Vorversuche im Labormaßstab, 5 Ringleitungsversuche und **21 Wannenversuche** durchgeführt
- 12 Wannenversuche dienten Parameterstudien und sind hinsichtlich ihrer chemischen Randbedingungen und Strömungsverhältnisse **nicht** übertragbar auf die Anlagen
- Versuche WD7, WD10 sowie WD15-21 sind hinsichtlich der Wasserchemie und Strömungsverhältnissen **als abdeckend** für die realen Anlagenbedingungen anzusehen
 - Keine Berücksichtigung alkalisierender Wirkungen anderer Materialien im Containment
 - Ungünstige Wassertemperatur über den ganzen Versuchszeitraum

Die für Anlagenverhältnisse repräsentativen Versuche WD7, WD10 und WD15-21 wurden hinsichtlich der Wasserchemie unter abdeckenden chemischen und thermohydraulischen Randbedingungen durchgeführt.

Langzeitverhalten Parameterstudien - Einfluss von Borsäure

Druckverlust über die Sumpfsiebe ist sowohl in Deionat als auch in Borsäure stabil, wenn kein ferritisches oder verzinktes Material vorhanden ist.



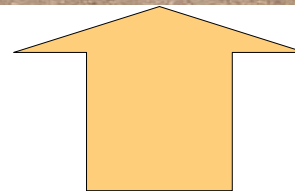
Langzeitversuche Korrosion/Erosion

- Im Vergleich zu den Ringleitungsversuchen entstehen relativ früh ablagerbare Korrosionsprodukte, wenn sich entsprechende Werkstoffe (Zink, ferritischer Stahl) im **Leckstrahl** befinden
- Ursache ist die **Kombination** aus **Korrosion** und **Erosion** im Leckstrahlbereich

Druckverlusterhöhung wird primär durch Korrosion/Erosion der Materialien im Leckstrahl, nicht im Sumpf (z.B. Sumpfsiebe) ausgelöst



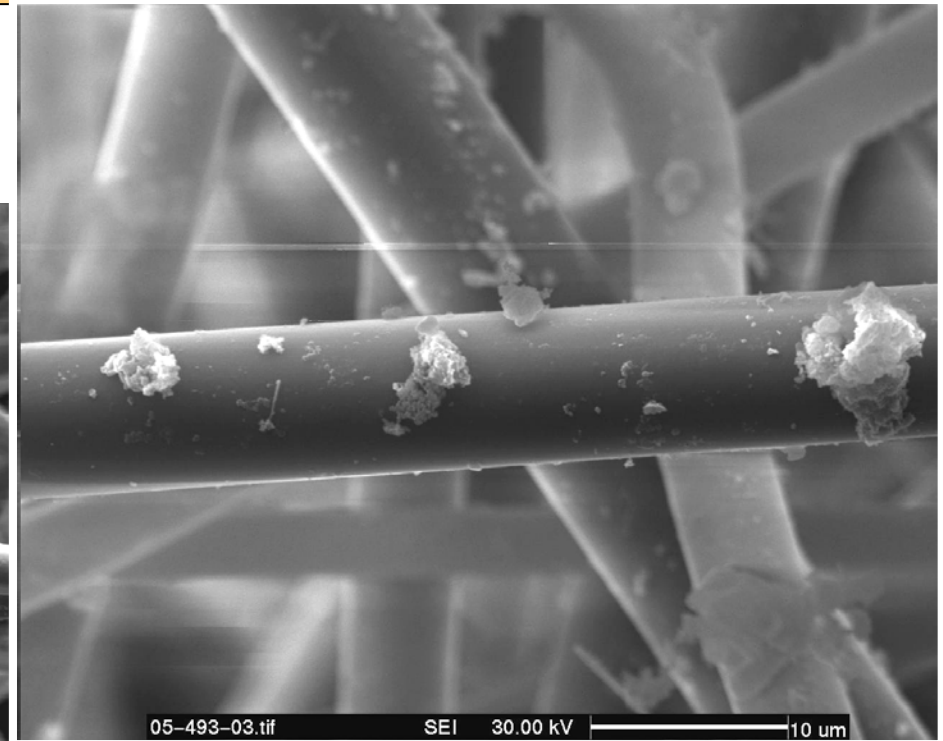
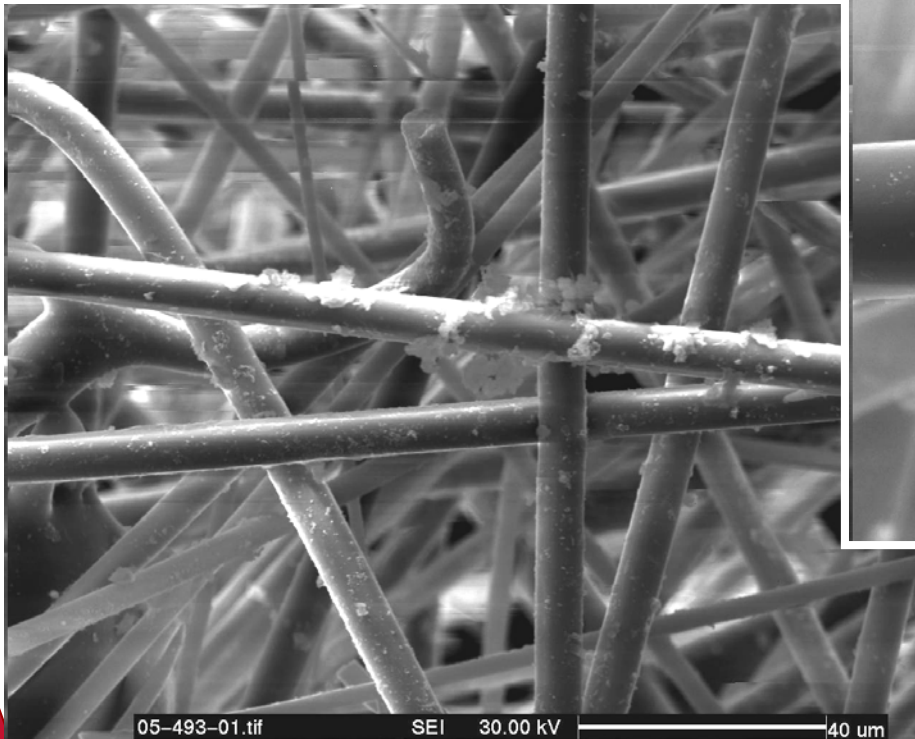
Gitterrost nach Versuch WD8



Strahlrichtung Leckstrahl
An den Seiten (vom Fallrohr ablaufend) größter Massenstrom

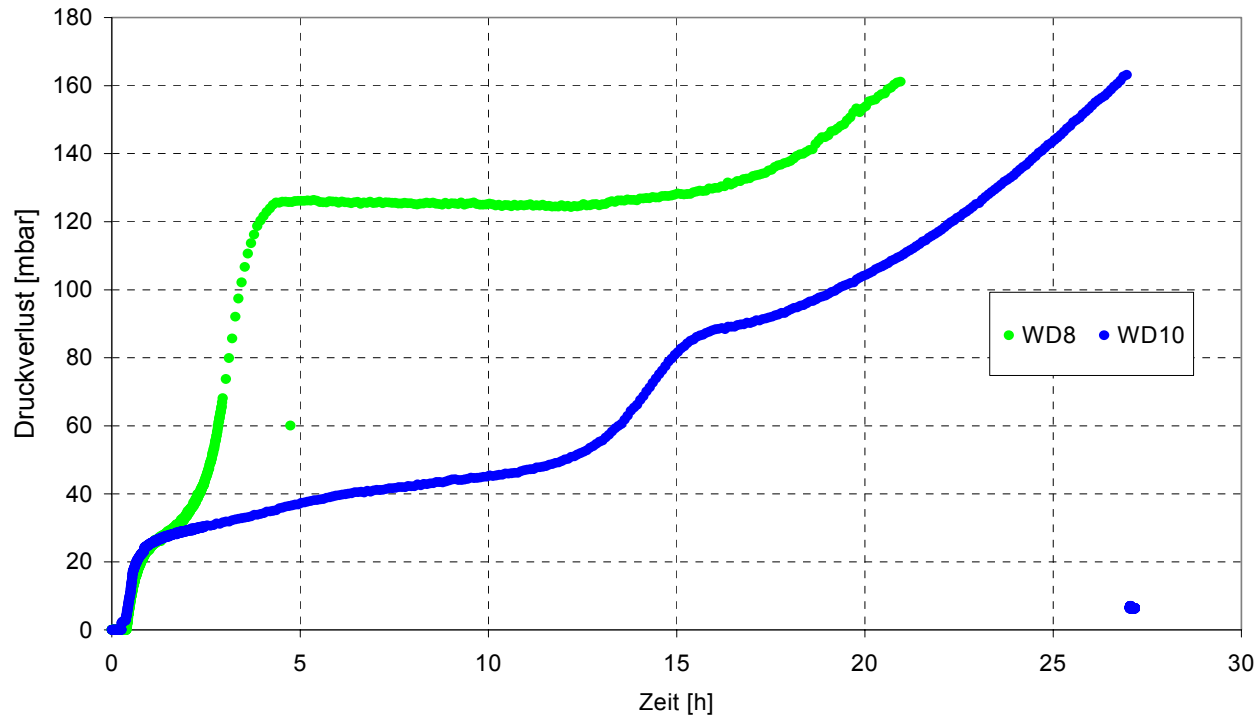
Korrosion des Zinks Struktur der Filterkuchen aus Mineralfasern

**Elektronenmikroskopie:
Adsorption der Korrosionsprodukte an den Fasern,
dadurch Erhöhung der Rauigkeit der Fasern**



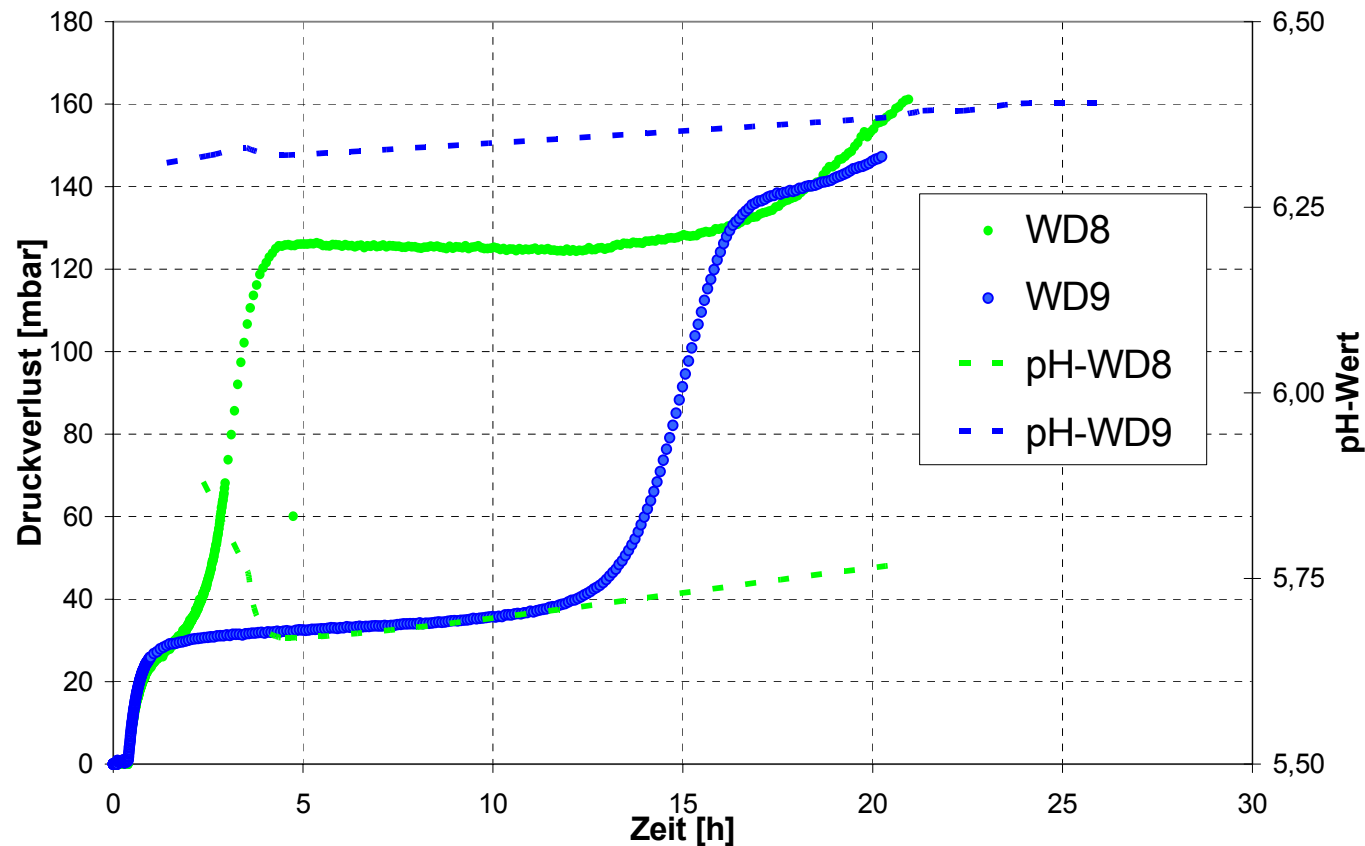
Langzeitversuche Parameterstudien - Einfluss des Zustands der Verzinkung

Gealterte Verzinkung (passive Schutzschicht) verzögert Beginn des Druckverlustanstiegs



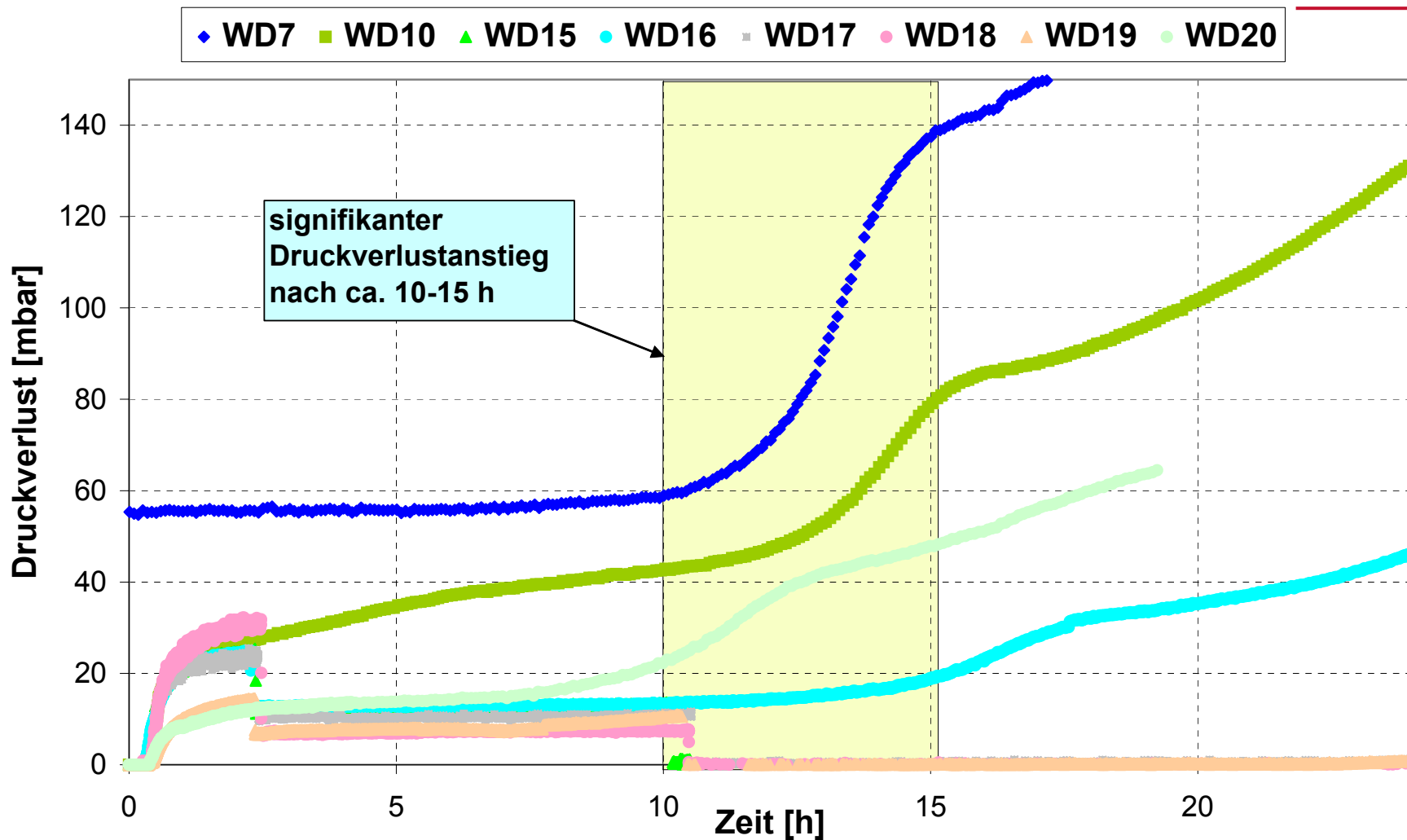
Randbedingungen WD8 und WD10 identisch, Verzinkung des Gitterrostes in WD8 neu, in WD10 alt

Höherer pH-Wert verringert Korrosionsgeschwindigkeit und verzögert Druckverlustanstieg



Druckverlust über die Sumpfsiebe WD8 und WD9 (frische Verzinkungen)

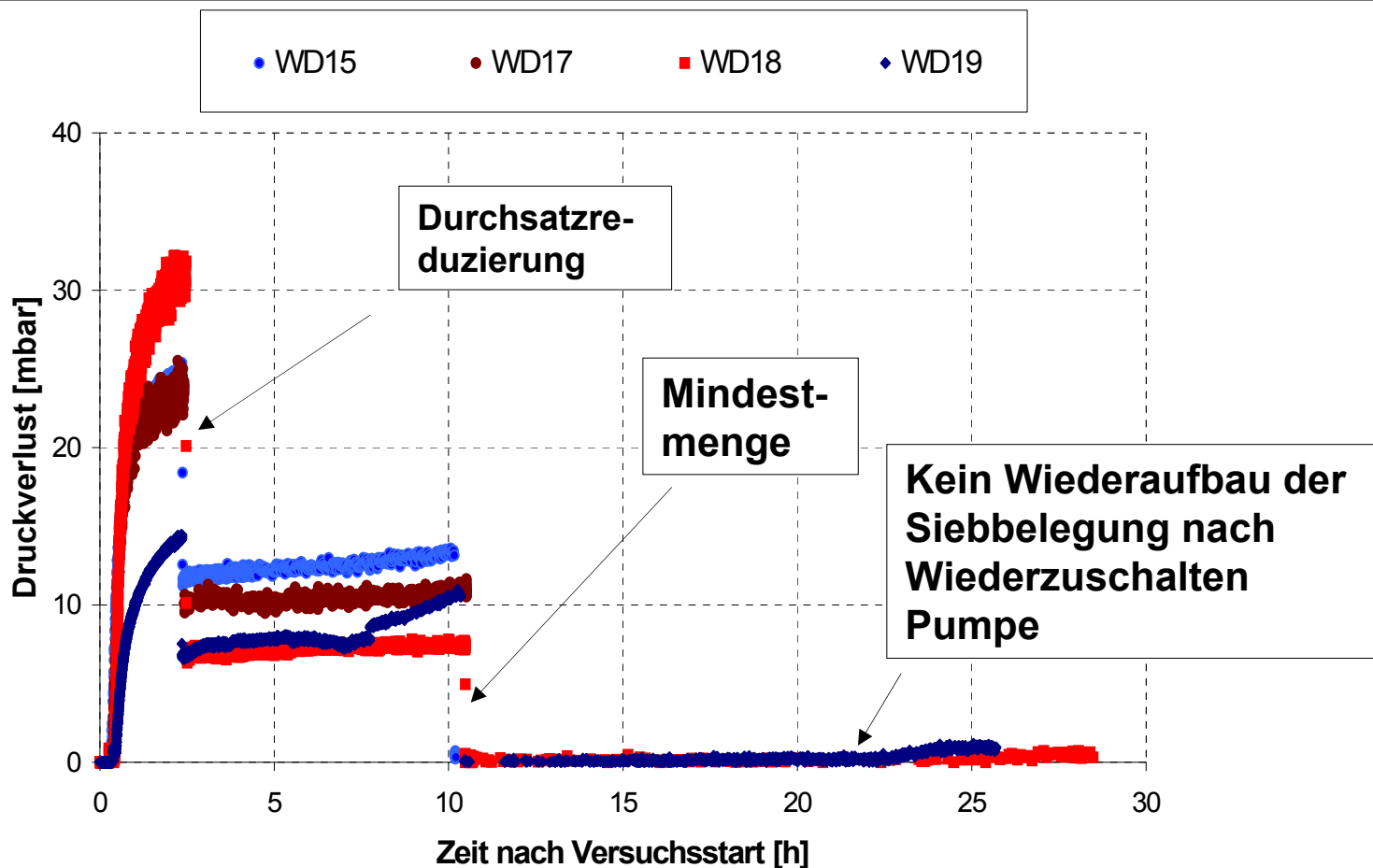
Langzeitverhalten Beginn Druckverlustanstieg



Stärkerer Druckverlustanstieg beginnt für alle untersuchten Mineralwollarten unter repräsentativen Bedingungen nach ca. 10 h (allerdings nicht, wenn faserförmige Siebbelegung gering ist)

Langzeitverhalten Entfernen der Siebbelegung (1v2)

Abschalten der Pumpe nach 10h (bzw. Reduzierung des Durchsatzes auf Mindestmenge) führt sicher zum Abfallen der Siebbelegung



Versuche wurden mit verschiedenen Mineralwollarten und -mengen sowie verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten durchgeführt.

Langzeitverhalten Entfernen der Siebbelegung (2v2)



**Beginn
Ablösung**



Ablösevorgang des Siebbelags

**belagfreie
Siebfläche**

- Nach 10 h: Filterkuchen fällt schon mit Mindestmenge der Pumpe ab
- Wenn Druckanstieg durch spätere Anlagerung von Korrosionsprodukten begonnen hat: Filterkuchen fällt erst bei Rückspülprozedur ganz oder teilweise ab

Untersuchungen zu DWR - Zusammenfassung

- > *Es gibt viele Parameter, die Freisetzung des Isoliermaterials, Transport zum Sumpf, Verhalten im Sumpf, Siebbelegung und Langzeiteffekte und damit den resultierenden Druckverlust beeinflussen.*
- > *Für die vergleichsweise überschaubaren Verhältnisse in Siemens-DWR haben die Versuche jedoch genügend Daten geliefert, um auch bei abdeckend zu unterstellenden Randbedingungen hinreichend abgesicherte Aussagen für die Kontrolle des Differenzdrucks über die Sumpfsiebe zu machen.*
- > *Die aufgrund der Versuchsergebnisse – auch unter Berücksichtigung von ergänzenden Versuchen in Zittau – in den letzten Jahren vorgenommenen Änderungen an Sumpfsieben (Größe, Maschenweite) und an Isolierungskonzepten (insbesondere Beseitigung von problematischen Kombinationen von faser- und partikelförmigem Isoliermaterial) sowie die Festlegung von Prozeduren zur Beseitigung von Siebbelegungen in der Nachstörfallphase verhindern einen auslegungsüberschreitenden Differenzdruck über die Sumpfsiebe.*

Das Barsebäck-Ereignis: Ablauf, Bedeutung und Folgen

Michael Maqua
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH, Köln

Das Barsebäck-Ereignis: Ablauf, Bedeutung und Folgen

Dr. Michael Maqua, GRS, Köln

Vortrag auf der KTG-Fachtagung „Aktuelle Themen der Reaktorsicherheitsforschung in Deutschland“ in Rossendorf, 03.-04. April 2006

Kurzfassung:

Am 28 Juli 1992 ereignete sich im schwedischen Kernkraftwerk Barsebäck-2 während des Anfahrens nach Brennelementwechsel ein kleiner Kühlmittelverluststörfall /1/. Dabei wurde soviel Isoliermaterial in die Kondensationskammer eingetragen, dass die zwei Siebe im Not- und Nachkühlungssystem nach wenig mehr als einer Stunde so belegt waren, dass die die beiden über die Siebe ansaugenden Pumpen kavitierten. Die Pumpen mussten abgeschaltet werden, um ein Rückspülen der betroffenen Siebe einzuleiten. Die Menge des freigesetzten Isoliermaterials war weit größer als zuvor erwartet. Nach dem Ereignis wurden weltweit Untersuchungen eingeleitet, um die Ursachen für das unerwartete Verhalten zu erforschen und Abhilfemaßnahmen zu definieren. Es hatte vor dem Ereignis eine größere Anzahl von Precursor-Ereignissen gegeben, aus denen jedoch nicht genügend Rückschlüsse gezogen wurden /1/, /3/. Als Abhilfemaßnahmen wurden weltweit im Wesentlichen die Vergrößerung der Siebfläche und die Verkleinerung der Maschenweite der Siebe durchgeführt. In einigen Fällen wurde auch das Isoliermaterial ausgetauscht /2/.

1 Problemstellung und Historie

Nach einem Kühlmittelverluststörfall können durch den Leckstrahl Isoliermaterialien von Rohrleitungen und umgebenden Komponenten gelöst werden. Diese Isoliermaterialien und andere Stoffe (Betonstaub, Beschichtungen, sonstige Materialien), die entweder durch den Leckstrahl freigesetzt werden oder latent im Sicherheitsbehälter vorhanden sind, können in den Sumpf bzw. in Siedewasserreaktoren auch in die Kondensationskammer eingetragen werden. Bei Umschaltung der Not- und Nachkühlung auf Sumpfbe-

trieb bzw. Ansaugung aus der Kondensationskammer können Isoliermaterialien und andere Stoffe sich so auf die Ansaugsieben der Not- und Nachkühlsysteme ablagern, dass der Durchfluss nicht mehr ausreicht, den Kern zu kühlen.

Die ersten Regelungen zur Sicherstellung der Not- und Nachkühlung wurden 1974 im Regulatory Guide RG 1.82 Revision 0 von der USNRC aufgestellt /4/. Allerdings kamen bald Zweifel an der Angemessenheit dieser Regelungen auf, so dass die USNRC das Unresolved Safety Issue USI A-43: "Containment Emergency Sump Performance" definierte. 1985 erfolgte eine vorläufige Lösung des Problems, die im Bericht NUREG-0897 /10/ beschrieben ist und zur Erstellung des RG 1.82, Revision 1 im gleichen Jahr führte /5/.

Als Grundlage für diese Regelungen dienten neben theoretischen Überlegungen wesentlich die schwedischen Marviken-Versuche und die deutschen HDR-Versuche /1/. In beiden Versuchsreihen waren die Ablösung und der Transport von Isoliermaterial allerdings nur Nebenprodukte der Versuche zu Kühlmittelverluststörfällen. Die dort beobachteten weiten Transportwege verschiedener Isoliermaterialien konnten nicht für quantifizierbare Aussagen genutzt werden. Auch die Verifizierung der USNRC Freisetzungsmodelle – das Kegel- und das Kugelmodell – war aufgrund des Versuchsaufbaus mit Freisetzung gegen eine Prallplatte im HDR nicht möglich.

2 Das Ereignis in Barsebäck, Block 2

Das Kernkraftwerk Barsebäck bestand aus zwei Siedewasserreaktoranlagen der Firma ASEA mit einer elektrischen Nettoleistung von je ca. 600 MW. Sie wurden 1975 bzw. 1977 in Betrieb genommen. Die aus politischen Gründen vorgenommene Abschaltung der Blöcke erfolgte 1999 und 2005. Das Kraftwerk liegt an der Westküste Schwedens in Sichtweite der dänischen Hauptstadt Kopenhagen und war während der gesamten Betriebszeit im Zentrum der politischen Auseinandersetzung über die friedliche Nutzung der Atomkernenergie zwischen Dänemark und Schweden.

Am 28. Juli 1992 wurde Barsebäck 2 nach einem Brennelementwechsel wieder angefahren /1/. Während des Brennelementwechsels war unter anderen auch ein Vorsteuerventil eines S+E-Ventils inspiziert worden. Durch einen fehlerhaften Zusammenbau war das Vorsteuerventil undicht. Somit stand der Reaktordruck vor einer Berstscheibe am Haupt-

ventil an. Um 5:28 Uhr erreichte der Druck im Reaktordruckbehälter etwa 3,0 MPa, den Berstdruck der Berstscheibe. Das Kühlmittel, Dampf von etwa 200°C, trat in das Containment aus und löste die zur Detektion von Kühlmittelverluststörfällen vorgesehenen Alarme aus. Die automatisch ablaufenden Maßnahmen zur Beherrschung liefen fast störungsfrei ab. Der weitere Ablauf kann Tabelle 1 entnommen werden.

Ablauf	Ereignis oder Maßnahme
5:28 Uhr	Bersten der Berstscheibe
0 min	Automatische Isolierung des Containments
1 min	Automatische Anregung des Containmentsprühsystems
6 min	Automatische Anregung des Notkühlsystems
12 min	Manueller Stopp des Containmentsprühsystems
14 min	Automatische Wiederinbetriebnahme des Containmentsprühsystems wegen zu hohem Druck im Drywell
25 min	Umschaltung von Strang 1 auf KoKa Kühlen
67 min	Umschaltung von Strang 2 auf KoKa Kühlen
69 min	Inbetriebnahme des Nachwärmeabfuhrsystems
69,5 min	hoher Differenzdruck über das Ansaugsieb von Containmentsprühpumpe 3 <ul style="list-style-type: none"> • Keine Auffälligkeiten am Pumpendurchfluss bemerkt • Obwohl Rückspülen hätte eingeleitet werden sollen, legte die Schicht die Priorität auf die Inbetriebnahme des Nachwärmeabfuhrsystems
73 min	hoher Differenzdruck über das Ansaugsieb von Containmentsprühpumpe 1 <ul style="list-style-type: none"> • Reaktionen wie oben
81 min	Schichtwechsel nach 81 Min.
111 min	Vorbereitungen zum Rückspülbetrieb getroffen
117 min	Stoppen der kavitierenden Pumpen 1 und 3 des Containmentsprühsystems wegen starker Durchflussschwankungen
148 min	Durchführung des Rückspülbetriebs
158 min	Wiederinbetriebnahme vom Pumpe 3
249 min	Zustand „unterkritisch kalt“ erreicht

Tabelle 1: Ablauf des Ereignisses in Barsebäck-2 /1/

3 Wesentliche Erkenntnisse aus dem Ereignis in Barsebäck-2

Die Freisetzung von Isoliermaterial mit dem möglichen Verstopfen der Ansaugfilter im Sumpf bzw. in der Kondensationskammer (in Barsebäck identisch) war auslegungsgemäß vorgesehen. Allerdings war erwartet worden, dass sich ein derartiger Differenzdruck über die Siebe bei einem großen Kühlmittelverluststörfall nach ca. 1 Stunde aufbaut. Bei einem kleinen Kühlmittelverluststörfall wie im vorliegenden Ereignis sollte sich dieser Differenzdruck erst nach etwa 10 Stunden aufbauen /1/.

Bei dem Ereignis wurden ca. 200 kg Isoliermaterial (im Wesentlichen Mineralfaser) von den Rohrleitungen um das betroffenen Ventil freigesetzt. Dabei wurden alle Rohrleitungen bis zu einem Abstand von ca. 1,5 m vom Ventil völlig abisoliert und bis zu einem Abstand von ca. 2,5 m teilweise abisoliert /1/.

Das im Drywell („trockener“ Teil des Containments – oberhalb der Kondensationskammer) verbliebene Isoliermaterial (ca. 100 kg) wurde wie folgt vorgefunden:

- 50% auf Strukturen, insbesondere auf dem Drywellboden
- 20% auf der Wand und Komponenten in der Nähe des Ventils
- 10% an der Wand gegenüber von der de-isolierten Leitung
- 12% an der Wand über dem Gitter oberhalb des Ventils
- 8% am Gitter über dem Ventil

Etwa die Hälfte des freigesetzten Isoliermaterials wurde in die Kondensationskammer gespült (ca. 100 kg). Es ist nicht bekannt, wie viel mit dem Dampf, dem Leckstrahl oder dem Containmentsprühsystem eingetragen wurden /1/.

Bei den nachfolgenden Versuchen, die zum Teil in der Anlage durchgeführt wurden, konnte festgestellt werden, dass der aufgetretene Druckverlust über die Ansaugsiebe bei Eintrag einer gleichen Isoliermaterialmenge in die Kondensationskammer bestätigt werden konnte. Dabei war es unerheblich, ob der in der Kondensationskammer befindliche „Mixer“ (Propeller zur Verhinderung von Schichtungen) eingeschaltet war. Es wird davon ausgegangen, dass das Isoliermaterial in der Kondensationskammer gleich verteilt war und keine wesentliche Sedimentation stattgefunden hatte /1/.

Bei später durchgeführten Versuchen in der Anlage Oskarshamn konnten die transportierte Isoliermaterialmenge in die Kondensationskammer nicht bestätigt werden /1/.

International löste das Ereignis in Barsebäck eine Vielzahl von Versuchen und Maßnahmen aus, die bis heute noch nicht ihren vollständigen Abschluss gefunden haben.

4 Weitere Ereignisse

Das Ereignis in Barsebäck war nicht das einzige, bei dem Isoliermaterial oder andere Stoffe Ansaugsiebe verstopften bzw. Ansaugsiebe aus anderen Gründen nicht ordnungsgemäß funktionsfähig waren. Einige dieser Ereignisse ereigneten sich bereits vor dem Barsebäck-Ereignis, sie können als Precursor angesehen werden, Es ist festzustellen, dass Lehren aus diesen Precursoren nur unvollständig gezogen bzw. national und international genügend diskutiert und kommuniziert wurden.

Gundremmigen A, Deutschland, 1977

Im Zwei-Kreis-Siedewasserreaktor Gundremmigen A ereignete sich am 13. Januar 1977 eine Überspeisungstransiente [1]. Im Laufe des Ereignisses riss ein S+E-Ventil aufgrund von Schwingungen ab. Dies führte zu einem Kühlmittelverluststörfall. Die Schwingungen wurden durch das Abblasen von Wasser bzw. Wasser-Dampf-Gemisch aufgrund der Überspeisung hervorgerufen. Die S+E-Ventile waren nicht auf die Belastungen beim Abblasen von Wasser ausgelegt.

Im Bereich des Leckstrahls wurde das Isoliermaterial praktisch vollständig von den Rohrleitungen und Komponenten abgelöst und vor das Ansauggitter geschwemmt. Da der Reaktor einen Notkondensator besaß, wurde eine Ansaugung der Nachkühlsysteme aus der Ventilkammer während des Störfallverlaufs nicht benötigt. Somit fand eine mögliche Verstopfung der Siebe bzw. ein Eintrag von abgelöstem Isoliermaterial in den Reaktor nicht statt.

Bei der intensiven Analyse des Ereignisses wurde das Potential eines möglichen Eintrags von Isoliermaterial in den Kern erkannt. Als Abhilfemaßnahmen wurden eine Verzehnfachung der Siebflächen bei gleichzeitiger Verkleinerung der Maschenweite auf 3*3 mm² bzw. 4*4 mm² vorgeschlagen. Durch die endgültige Abschaltung des Reaktors nach dem Störfall wurden diese Maßnahmen nicht mehr durchgeführt.

Perry, USA, 1992 und 1993

Im Zusammenhang mit der Ansaugung aus der Kondensationskammer ereignete eine ganze Kette von Vorkommnissen sich zwischen Mai 1992 und März 1993 im amerikanischen Siedewasserreaktor Perry /1/, /3/.

Während der Revision im Mai 1992 wurde festgestellt, dass die Ansaugsiebe in der Kondensationskammer mit faserigem und partikelförmigem Material belegt waren. Hierbei sollte bedacht werden, dass in Kondensationskammern amerikanischer Siedewasserreaktoren sich oft größere Mengen an Korrosionsprodukten befinden, da die an die Kondensationskammer anschließenden Systeme ferritische Rohrleitungen haben. Die Ansaugung über die Siebe wird betrieblich beim Kondensationskammerkühlen benutzt. Nach Feststellung des Siebelags wurde als Abhilfemaßnahme dieser lediglich entfernt.

Im Januar 1993 wurde bei einer erneuten Reinigung der Siebe wiederum ein Belag festgestellt. Zudem wurde beobachtet, dass die tonnenförmigen Siebe nach innen verformt waren vermutlich infolge der Druckdifferenzen bei Ansaugvorgängen. Als Maßnahme wurden die Siebe durch baugleiche Siebe ersetzt.

Beim Wiederanfahren nach diesem Stillstand im März 1993 wurde beim Kondensationskammerkühlen festgestellt, dass die Siebe wieder verstopft waren. Der Grund war diesmal ein bei den vorangegangenen Arbeiten in der Kondensationskammer vergessener Glasfaserfilter, der aus Arbeitsschutzgründen benötigt worden war. Der Filter war in der Kondensationskammer verblieben und abgelöste Glasfasern führten zur Verstopfung der Ansaugsiebe. Als Abhilfemaßnahme wurde die Siebfläche verdoppelt und eine Rückspülmöglichkeit der Siebe vorgesehen.

Sonstige beobachtete Phänomene

In den USA wurde eine Vielzahl von verschiedenartigen Ereignissen beobachtet, die eine auslegungsgemäße Not- und Nachkühlung nach einem Kühlmittelverluststörfall potentiell behindert hätten. Eine ausführliche Beschreibung der Phänomene findet sich in NUREG-CR-6808 /3/.

So wurde zum Beispiel in der Anlage Susquehanna während einer Revision im März 1988 festgestellt, dass sich die Aluminiumabdeckung über der Glaswollisolierung an Armaturen, Pumpen und anderen Einbauten infolge Alterung der Verklebung abgelöst hatte. Etwa die Hälfte der 230 m² Aluminiumabdeckung war betroffen. Es wurde abge-

schätzt, dass die abgelösten Aluminiumfolien die Ansaugsiebe bei einem Kühlmittelverluststörfall hätte behindern können /1/, /3/.

Als weitere Ursachen für eine potentielle Gefährdung der Kernkühlung wurden in den USA meist mehrfach beobachtet /3/:

- Unverfügbarkeiten von Redundanzen oder Systemen durch verstopfte Ansaugsiebe
- Schmutz (z. B. Korrosionsprodukte, Farbpartikel, Staub) im Containment (insb. in der Kondensationskammer bei SWR aber auch in DWR)
- Mängel in der Instandhaltung
- Mängel am Sieb (z. B. Öffnungen oder Beschädigungen)

5 Maßnahmen nach Barsebäck

Eine Auswertung der Maßnahmen in den betroffenen Ländern (nach /2/) ergibt, dass im Wesentlichen drei Abhilfemaßnahmen durchgeführt wurden oder werden:

- Vergrößerung der Siebfläche
- Verkleinerung der Maschenweite
- In einer geringeren Anzahl von Fällen: Maßnahmen zur Verringerung der Freisetzung (z. B. bessere Kapselung, Reduktion der Isoliermaterialmenge) oder Tausch des Isoliermaterials (z. B. Fasern ersetzt durch RMI)

Besondere Verdienste in der Zusammenfassung des Wissensstandes und der internationalen Aktivitäten nach dem Barsebäck-Ereignis kommen der OECD-NEA-CSNI Arbeitsgruppe PWG-1 (heute Working Group on Operating Experience WGOE) zu. Zusammen mit der schwedischen Aufsichtsbehörde SKI wurde Anfang 1994 eine internationale Konferenz in Stockholm durchgeführt /7/. Auf dieser Konferenz wurde eine Arbeitsgruppe etabliert, die mit deutscher Beteiligung den Bericht „Knowledge Base for Emergency Core Cooling System Recirculation Reliability“ im Februar 1996 /1/ erstellte. Dieser Bericht stellte den damaligen Wissenstand zu den vielfältigen Phänomenen des Isoliermaterialverhaltens nach einem Kühlmittelverluststörfall dar. Im Jahre 2002 wurde von der NEA ein Bericht zu den bis dahin durchgeführten Maßnahmen in den Mitgliedsländern veröffentlicht /2/. Ebenso wurden weitere Workshops organisiert, zuletzt mit großer internatio-

naler Beteiligung 2004 in Albuquerque in den USA /8/. Ein geplantes Update zum „Knowledge Base“-Bericht unterblieb nach Erscheinen des NUREG-CR-6808 /3/.

Im Folgenden werden die Abhilfemaßnahmen nach dem Barsebäck-Ereignis für einige ausgewählte Länder kurz dargestellt. Eine ausführlichere Darstellung auch für weitere Länder können den Bericht NEA 2002 /2/ entnommen werden.

In Schweden wurden bis 1993 in allen Siedewasserreaktoren die Siebflächen vergrößert bei gleichzeitiger Verkleinerung der Maschenweiten. Die Rückspülmöglichkeit wird für alle SWR-Anlagen eingeführt. Das Isoliermaterial wurde zum Teil ausgetauscht. In einigen Bereichen wurde metallische Isolierung (RMI) eingeführt. Zur Dimensionierung der Nachrüstmaßnahmen in Anlagen mit Druckwasserreaktor wurde angenommen, dass das Isoliermaterial von einem Loop einschließlich des Dampferzeugers komplett freigesetzt wird. Dies entspricht etwa 60 m³ Isoliermaterial. Als Nachrüstmaßnahmen wurden die Siebflächen vergrößert und die Sieblochdurchmesser auf 3 mm verkleinert.

Die finnischen DWR-Anlagen vergrößerten bis 1993 die Siebflächen auf ca. 100 m² und verkleinerten dabei die Lochdurchmesser auf 2 mm. Die Siebe in den SWR-Anlagen wurden nicht umgebaut, da sie auch unter den neuen Störfallannahmen als ausreichend dimensioniert angesehen wurden. Die Rückspülmöglichkeit wurde in den DWR eingeführt und in den SWR ertüchtigt. In den SWR wurde ein Teil des Isoliermaterials ausgetauscht bzw. in einigen Bereichen durch RMI ersetzt.

In den USA wurden von 1996 – 1999 in den SWR die Siebflächen zum Teil sehr stark (auf 46 – 580 m²) vergrößert. Faseriges Isoliermaterial wurde teilweise durch RMI ersetzt. Die USNRC definierte den Generic Safety Issue 191 “Technical Assessment: Parametric Evaluations for Pressurized Water Reactors”. Die in diesem Rahmen durchgeführten Versuche und theoretische Überlegungen wurden im NUREG-CR-6808 „Knowledge Base for the Effect of Debris on PWR Emergency Core Cooling Sump Performance“ (2003) /3/ dokumentiert. Als Folge dieser Arbeiten wurden das Bulletin 2003-01 /11/ und die Revision 3 des Regulatory Guides 1.82 veröffentlicht /6/. Daraus ergeben sich auch weit reichende Konsequenzen für DWR-Anlagen. Die Umsetzung der Maßnahmen in DWR ist zurzeit noch nicht abgeschlossen.

In Frankreich wurden vom Betreiber EdF erst spät Abhilfemaßnahmen beschlossen. Zuvor hatte das IRSN in Großversuchen nachgewiesen, dass auch in französischen DWR-Anlagen ein Potential zur Behinderung der Not- und Nachkühlung nach einem Kühlmittelverluststörfall bei Eintrag von abgelöstem Isoliermaterial besteht. Die Versuche von IRSN

werden derzeit mit Schwerpunkt auf das Langzeitverhalten von Isoliermaterial auf den Sieben und chemischen Reaktionen (Glasfaser mit Borsäure und NaOH) fortgesetzt /9/.

Neue Untersuchungen zeigen weitere sicherheitstechnisch wichtige Phänomene im Zusammenhang mit der Verstopfung von Ansaugsieben durch Isoliermaterial. Hier seien der „thin-bed Effekt“ (Gleichmäßige dünne Isoliermaterialsicht, in der partikelförmiges Material eingelagert werden kann. Dies führt zu relativ hohen Druckverlusten.), die „downstream“ Effekte (Zum Beispiel Verstopfen von Brennelementen und Beschädigung von mehrstufigen Pumpen aufgrund von durch die Ansaugsiebe penetriertem Isoliermaterial) und die Langzeiteffekte wie die chemischen Reaktionen des Borwassers mit Strukturmaterialien genannt.

6 Zusammenfassung

Die potentielle Behinderung der Nachkühlung nach einem Kühlmittelverluststörfall durch Verstopfung der Ansaugsiebe im Sumpf und der Kondensationskammer durch abgelöstes Isoliermaterial ist seit Mitte der 70er Jahre bekannt. Aber erst nach dem Ereignis in Barsebäck-2 im Jahr 1992 wurden international umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, um die mit der Freisetzung von Isoliermaterial verbundenen Phänomene zu verstehen.

Als erste Länder führten Schweden und Finnland kurz nach dem Ereignis weit reichende Abhilfemaßnahmen durch. In den meisten anderen Ländern erfolgte die Umsetzung von Maßnahmen erst Jahre später (vorrangig in SWR). Die Umsetzung ist für DWR-Anlagen noch nicht abgeschlossen.

Neue Untersuchungen zeigen weitere sicherheitstechnisch wichtige Phänomene im Zusammenhang mit der Verstopfung von Ansaugsieben durch Isoliermaterial. Drei der bedeutendsten dieser Phänomene sind der „thin-bed Effekt“, die „downstream“ Effekte und die Langzeiteffekte.

7 Quellen

- /1/ NEA: Knowledge Base for Emergency, Core Cooling System Recirculation Reliability, NEA/CSNI/R(95)11, February 1996
- /2/ NEA, Knowledge Base for Strainer Clogging - Modifications performed in different countries since 1992, NEA/CSNI/R(2002)6, October 2002
- /3/ USNRC, Knowledge Base for the Effect of Debris on Pressurized Water Reactor Emergency Core Cooling Sump Performance, NUREG-CR-6808, February 2003
- /4/ USNRC, Reg. Guide 1.82, Rev. 0, Water Sources for Long-Term Recirculation Core Cooling following a Loss-of-Coolant Accident, 1974
- /5/ USNRC, Reg. Guide 1.82, Rev. 1, Water Sources for Long-Term Recirculation Core Cooling following a Loss-of-Coolant Accident, 1985
- /6/ USNRC. Reg. Guide 1.82, Rev. 3, Water Sources for Long-Term Recirculation Core Cooling following a Loss-of-Coolant Accident, November 2003
- /7/ NEA, Proceedings of the OECD/NEA Workshop on the Barsebäck Strainer Incident, Stockholm, January 1994, NEA/CSNI/R(1994)13/B
- /8/ NEA, Summary and Conclusions of the OECD/NRC Workshop on Debris Impact on Emergency Coolant Recirculation; Albuquerque, NM, USA, 26-27 February 2004. NEA/CSNI-R(2004)2
- /9/ *J.-M. Mattei, Y. Armand (IRSN), A. Klementova, M. Liska (Trencin University, Slovakia), I. Vicena, J. Batalik, B. Soltesz, V. Gubco (VUEZ, Slovakia)*
ECCS sump clogging and recirculation issue: chemical effects programme, Vortrag auf EUROSAFE 2005, Brüssel
- /10/ USNRC, Containment Emergency Sump Performance, NUREG-0897, Rev. 1, October 1985



Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) mbH

/11/

USNRC, Bulletin 2003-01, Potential Impact of Debris Blockage on Emergency
Sump Recirculation at Pressurized-Water Reactors, June 9, 2003

Das Barsebäck-Ereignis: Ablauf, Bedeutung und Folgen

KTG-Fachtagung

**Aktuelle Themen der Reaktorsicherheitsforschung in
Deutschland**

Dr. Michael Maqua

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH

Forschungszentrum Rossendorf, 03. – 04. 04. 2006

Gliederung

- Geschichtliches
- Ablauf des Ereignisses in Barsebäck
- Wesentliche Erkenntnisse aus Barsebäck
- Andere Ereignisse
- Nationale und internationale Reaktionen

Problemstellung

- Nach einem KMV kann sich freigesetztes Isoliermaterial und andere Stoffe (Betonstaub, Beschichtungen, sonstige Materialien) so an Komponenten wie Ansaugsieben der Nachkühlsysteme ablagern, dass der Durchfluss nicht mehr ausreicht, den Kern zu kühlen.
- Man unterscheidet zwischen Materialien, die durch das Ereignis freigesetzt werden, und latent im SHB vorhandene lose Stoffe.
- Von weiterer Bedeutung sind u. a. das Langzeitverhalten der Materialien im SHB sowie das Korrosionsverhalten von Einbauten unter KMV-Bedingungen.

Historie

- Erste Regelungen in den USA 1974 im RG 1.82, Revision 0
- Unresolved Safety Issue (USI) A-43: “Containment Emergency Sump performance” ab 1979
- Vorläufige Lösung mit NUREG-0897 und RG 1.82, Rev. 1, in 1985

Wesentliche Erkenntnisse aus „alten“ Versuchen

- Zwei große Versuchsserien betrachteten auch Freisetzung und Transport von Isoliermaterial
 - Marviken, Schweden, dokumentiert 1973
 - HDR, Deutschland, dokumentiert 1985
- Versuche Mitte der 70er Jahre in Schweden zeigten, dass nach einem kleinen KMV ein Verstopfen der Ansaugsiebe erst nach ca. 10 Std. auftreten

Wesentliche Erkenntnisse aus Marviken-Versuchen

- Bei Abblaseversuchen erhebliche Beschädigungen an Aluminium-Abdeckungen und Isoliermaterialien gefunden
- Weite Transportwege beobachtet
- Keine quantifizierten Ergebnisse zu Zerstörung und Transport

Wesentliche Erkenntnisse aus HDR-Versuchen

- Bei Abblaseversuchen erhebliche Beschädigungen an Isoliermaterialien gefunden
- Falls Abdeckung des Isomaterials beschädigt wurde, kam es zum Abtrag von 3 – 5 m Länge auf der Leitung
- Verschiedene Isoliermaterialien incl. RMI getestet
- Vergleich mit USNRC Kegelmodell aufgrund der Prallplatte vor der Ausströmöffnung schwierig

Infos über Barsebäck-2



- Barsebäck-2 war ein Siedewasserreaktor von ASEA Atom
- Inbetriebnahme 1977, Nettoleistung 600 MW
- Lage in Sichtweite von Kopenhagen, daher stets im Mittelpunkt des dänischen Protestes
- Endgültige Abschaltung Mai 2005

Ablauf in Barsebäck (1)

- Ereignis begann am 28. Juli 1992 um 05:39 Uhr
- Anlagenzustand unter 2% Leistung beim Wiederauffahren nach Brennelementwechsel
- Während des BE-Wechsels wurde u.a. ein Vorsteuerventil eines S+E-Ventils inspiziert und anschließend falsch zusammengesetzt
- Durch das undichte Vorsteuerventil herrschte Reaktordruck vor einer Berstscheibe eines S+E-Ventils

Ablauf in Barsebäck (2)

- Bei Erreichen eines Reaktordrucks von 3,0 MPa brach die Berstscheibe und ein Dampf (ca. 200°C) wurde in das Containment freigesetzt (maximaler Durchfluss ca. 38 kg/s)
- Die vorgesehenen Maßnahmen bei Freisetzung von Frischdampf ins Containment liefen weitgehend wie vorgesehen ab
 - Isolierung des Containments
 - Anregung des Containmentsprühsystems (nach 1 Minute)
 - Anregung des Notkühlsystems (nach 6 Minuten)

Ablauf in Barsebäck (3)

- Manueller Stopp des Containmentsprühsystems nach 12 Min.
- Automatische Wiederinbetriebnahme nach 14 Min. wegen zu hohem Druck im Drywell
- Nach 25. Min. Umschaltung von Strang 1 auf KoKa Kühlen
- Nach 67. Min. Umschaltung von Strang 2 auf KoKa Kühlen
- Nach 69. Min. Inbetriebnahme des Nachwärmeabfuhrsystems

Ablauf in Barsebäck (4)

- Nach 69,5 Min.: hoher Differenzdruck über das Ansaugsieb von Containmentsprühpumpe 3
 - Keine Auffälligkeiten am Pumpendurchfluss bemerkt
 - Obwohl Rückspülen hätte eingeleitet werden sollen, legte die Schicht die Priorität auf die Inbetriebnahme des Nachwärmeabfuhrsystems
- Nach 73 Min.: hoher Differenzdruck über das Ansaugsieb von Containmentsprühpumpe 1
 - Reaktionen wie oben

Ablauf in Barsebäck (5)

- Schichtwechsel nach 81 Min.
- Nach 111 Min.: Vorbereitungen zum Rückspülbetrieb getroffen
- Stoppen der kavitierenden Pumpen 1 und 3 des Containmentsprühsystems wegen starker Durchflussschwankungen nach 117 Min.
- Durchführung des Rückspülbetriebs nach 148 Min.
- Wiederinbetriebnahme vom Pumpe 3 nach 158 Min.
- Zustand „unterkritisch kalt“ 249 Min. nach Störfalleintritt erreicht

Wesentliche Erkenntnisse aus Barsebäck (1)

- Freisetzung von ca. 200 kg Isoliermaterial
- Ca. 100 kg Isoliermaterial in die KoKa gespült
- Komplette De-Isolierung in ca. 1,5 m Abstand des Ventils
- Teilweise De-Isolierung bis zu ca. 2,5 m Abstand des Ventils

Wesentliche Erkenntnisse aus Barsebäck (2)

- 50% des Isoliermaterials verblieben im Drywell
- Transport im Drywell:
 - 50% auf Strukturen, insbesondere Drywellboden
 - 20% auf der Wand und Komponenten in der Nähe des Ventils
 - 10% an der Wand gegenüber von der de-isolierten Leitung
 - 12% an der Wand über dem Gitter oberhalb des Ventils
 - 8% am Gitter über dem Ventil

Wesentliche Erkenntnisse aus Barsebäck (3)

- Versuche in Barsebäck konnten den Druckverlust über die Siebe bei der beobachteten Isoliermaterialmenge nachvollziehen
- Nur wenige gesicherte Erkenntnisse über den Transport in der Koka
 - Wesentlicher Eintrag in den Quadranten unterhalb des Ventils abgeleitet aus Verteilung auf Drywellboden
 - „Mixer“ nur mit wenig Einfluss auf die Verteilung des Isoliermaterials (Erkenntnis aus Versuchen in der Anlage)
 - Vermutlich gleichmäßige Verteilung des Isoliermaterials im Wasser

Wesentliche Erkenntnisse aus Barsebäck (4)

- Später durchgeführte Versuche in Oskarshamn zeigten einen wesentlich kleineren Transport in die KoKa
- International wurde vielfältige Versuche und Analysen eingeleitet

Andere Ereignisse

- Gundremmingen A, 1977
- Perry, USA, 1992 und 1993
- Susquehanna-2, USA, 1988
- Sonstige Ereignisse

Gundremmingen A, der vergessene Precursor

- Bei einer Transiente am 13.01.1977 riss ein S+E-Ventil beim Abblasen von Wasser nach Überspeisung des RDB ab
- Dabei wurden in dem betreffenden Raumbereich große Teile der Isolation abgerissen und vor das Ansaugsieb geschwemmt
- Ein Verstopfen des Siebes trat nicht auf (keine Ansaugung)
- Vorgeschlagene Maßnahmen
 - Vergrößerung der Siebfläche um ca. Faktor 10
 - Verringerung der Maschenweite auf 3*3 bzw. 4*4 mm²

Perry, Amerikas Barsebäck

- Während einer Revision im Mai 1992 wurde faseriges und partikelförmiges Material auf den Ansaugsieben in der KoKa gefunden
- Nach Reinigung der Siebe Januar 1993 wurde festgestellt, dass die Siebe verformt waren, Einbau identischer Siebe
- Im März 1993 ereignete sich ein Ereignis, bei dem die Siebe wieder verstopft waren (KoKa Kühlen mit NWA System) durch vergessenen Glaswolle-Filter
- Maßnahmen
 - Vergrößerung der Siebfläche um ca. Faktor 2
 - Rückspülmöglichkeit installiert

Susquehanna-2 oder was sonst noch passieren kann

- Während einer Revision im März 1988 wurde festgestellt, dass sich die Aluminiumabdeckung über der Glaswollisolierung an Armaturen, Pumpen und anderen Einbauten durch Alterung der Verklebung ablöste
- Etwa die Hälfte der Aluminiumabdeckungen betroffen (ca. 230 m²)
- Nach Abschätzung hätten die Aluminiumabdeckungen die Filter bei einem KMV blockieren können
- Abhilfemaßnahmen werden nicht berichtet

Sonstige Ereignisse in den USA

- Unverfügbarkeiten von Redundanzen oder Systemen durch verstopfte Ansaugsiebe
- Schmutz (z. B. Korrosionsprodukte, Farbpartikel, Staub) im Containment (insb. in der KoKa aber auch DWR)
- Mängel in der Instandhaltung
- Mängel am Sieb (z. B. Öffnungen oder Beschädigungen)

Maßnahmen nach Barsebäck

- International
- Schweden
- Finnland
- USA
- Frankreich

Grundsätzliche Maßnahmen nach Barsebäck

- Vergrößerung der Siebfläche
- Verkleinerung der Maschenweite
- Selten: Maßnahmen zur Verringerung der Freisetzung (z. B. bessere Kapselung, Reduktion der Materialmenge) oder Tausch des Isoliermaterials (z. B. Fasern gegen RMI)

Internationale Maßnahmen nach Barsebäck

- Internationale Konferenz Anfang 1994 in Schweden
- NEA-Arbeitsgruppe erarbeitet Bericht „Knowledge Base for Emergency Core Cooling System Recirculation Reliability“ Februar 1996
- Weitere Workshops von NEA organisiert, zuletzt 2004 in Albuquerque
- Geplante Neufassung des Knowledge Base Reports wurde nach Erscheinen des NUREG-CR-6808 aufgegeben

Maßnahmen in den USA

- 1996-1999: SWR vergrößern die Siebflächen (46 – 580 m²) und ersetzen teilweise faseriges Isoliermaterial durch RMI
- Generic Safety Issue 191: Technical Assessment: Parametric Evaluations for Pressurized Water Reactors
- Viele Versuche und theoretische Überlegungen wurden im NUREG-CR-6808 „Knowledge Base for the Effect of Debris on PWR Emergency Core Cooling Sump Performance“ (2003) dokumentiert
- Reg. Guide 1.82 Rev. 3 in 2003 veröffentlicht – weitreichende Konsequenzen auch für DWR

Maßnahmen in Schweden

- Bis 1993: SWR vergrößern die Siebflächen und verkleinern die Maschenweiten, Rückspülen wird in allen Anlagen eingeführt
- Isoliermaterial zum Teil ausgetauscht, in einigen Bereichen wurde RMI eingeführt
- DWR Nachrüstmaßnahmen umfassen Siebflächenvergrößerung und kleine Sieblochdurchmesser (3 mm),

[Bei der Nachweisführung wird angenommen, dass ein Loop einschl. Dampferzeuger wird bei KMV komplett de-isoliert (ca. 60 m³ Isoliermaterial)]

Maßnahmen in Finnland

- Bis 1993: DWR vergrößern die Siebflächen und verkleinern die Maschenweiten/Lochdurchmesser (100 m², 2 mm Durchmesser)
- SWR-Siebe wurden nicht erneuert, da auch unter anderen Störfall-Randbedingungen groß genug
- Rückspülen wurde in DWR eingeführt bzw. in SWR ertüchtigt
- Isoliermaterial zum Teil in SWR ausgetauscht, in einigen Bereichen wurde RMI eingeführt

Maßnahmen in Frankreich

- EDF entschied erst spät, Siebe in den Anlagen zu erneuern, Vorstellung des Konzeptes in GPR-Sitzung 12/2004
- Zur Zeit wird Konzept umgesetzt
- IRSN führt weiterhin Versuche zur Sumpffilterverstopfung durch, der Schwerpunkt liegt jetzt auf chemischen Reaktionen und Langzeitverhalten

Resümee

- Barsebäck-Problem war seit Mitte der 70er Jahre bekannt, wurde jedoch unterschätzt
- In Schweden und Finnland wurden zeitnah nach dem Ereignis weitreichende Vorsorgemaßnahmen getroffen
- In den meisten anderen Ländern erfolgte die Umsetzung der Maßnahmen erst Jahre später (vorrangig in SWR)
- Für DWR-Anlagen sind sie noch nicht abgeschlossen
- Neue Untersuchungen zeigen weitere sicherheitstechnisch wichtige Phänomene (thin-bed, downstream, Langzeitverhalten)



Sicherheitsnachweise und Auswirkungen auf den Reaktorbetrieb

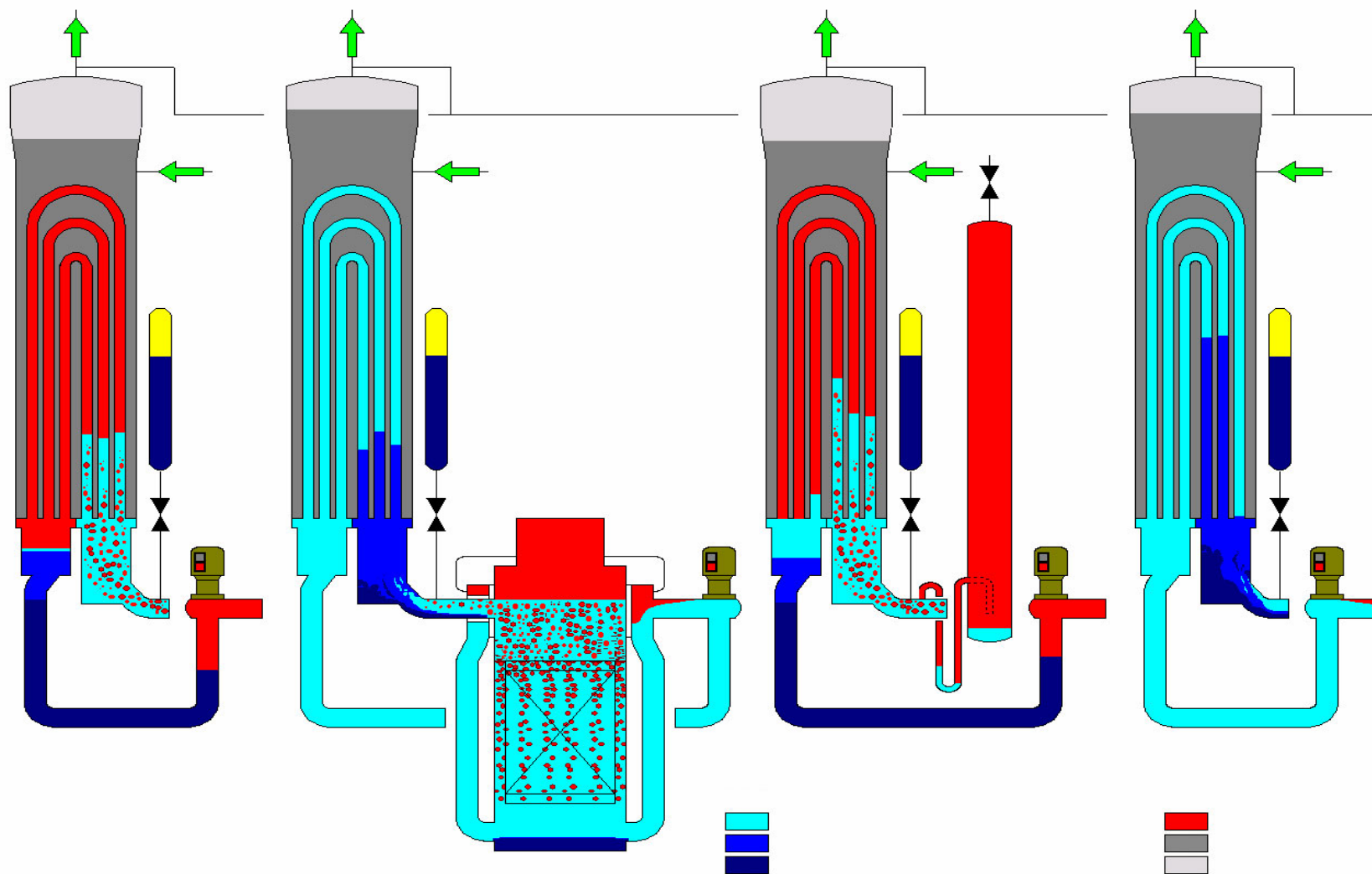
U. Stoll/H.Ludwig
Framatome ANP, Erlangen

- ***Borverdünnung während SB-LOCA (Reflux-Condenser-Betrieb)***
- ***Generische Ergebnisse von Analysen***
- ***relevante physikalische Effekte – Experimente***
 - ***PKL***
 - ***ROCOM***
- ***Konservative Annahmen in den Analysen/Experimenten***
- ***Vergleich der minimalen lokalen mit der kritischen Borkonzentration***
- ***Zusammenfassung***

Borverdünnung während SB-LOCA

- > Während Reflux-Condenser-Betrieb kondensiert Dampf in den DE-Rohren und sammelt sich im Pumpenbogen*
- > Beim Wiederaanlaufen des Naturumlaufs wird der niedrigborige Wasserpfropfen in Richtung RDB bewegt*
- > Im Downcomer und im unteren Plenum vermischt sich der niedrigborige Wasserpfropfen mit hochborigem Wasser*

Reflux-Condenser-Betrieb in zwei Loops



Allgemeine Ergebnisse von Analysen (1)

> **Analysen zeigen:**

- *Größtmögliche Kondensatproduktion erhält man, wenn das unterstellte Leck groß genug ist um den Naturumlauf in mindestens 2 Loops zu unterbrechen und klein genug um zur Wärmeabfuhr auf die Sekundärseite angewiesen zu sein*

- *Es gibt keinen Reflux-Condenser-Betrieb wenn alle SEP aktiv sind → Analysen werden deshalb mit nur zwei verfügbaren SEP durchgeführt (Einzelfehler und Reparaturfall in den Dieseln). Wo möglich, wird konservativ unterstellt, dass eine verbliebene SEP nahe dem Leck einspeist*

- *Die Druckdifferenz im Bruchloop ist zu klein zum Umschalten der SEP von Heißeinspeisung zu Kalteinspeisung oder umgekehrt*

Allgemeine Ergebnisse von Analysen (2)

> **Analysen zeigen:**

■ *KKW mit vorrangiger Heißeinspeisung:*

- *Kaltseitiges Leck: Teilmengen des niedrigborierten Wassers gehen über das Leck verloren, die Einspeisung beider SEP erreicht den RDB*
- *Abdeckend muss nur heißseitiges Leck analysiert werden*

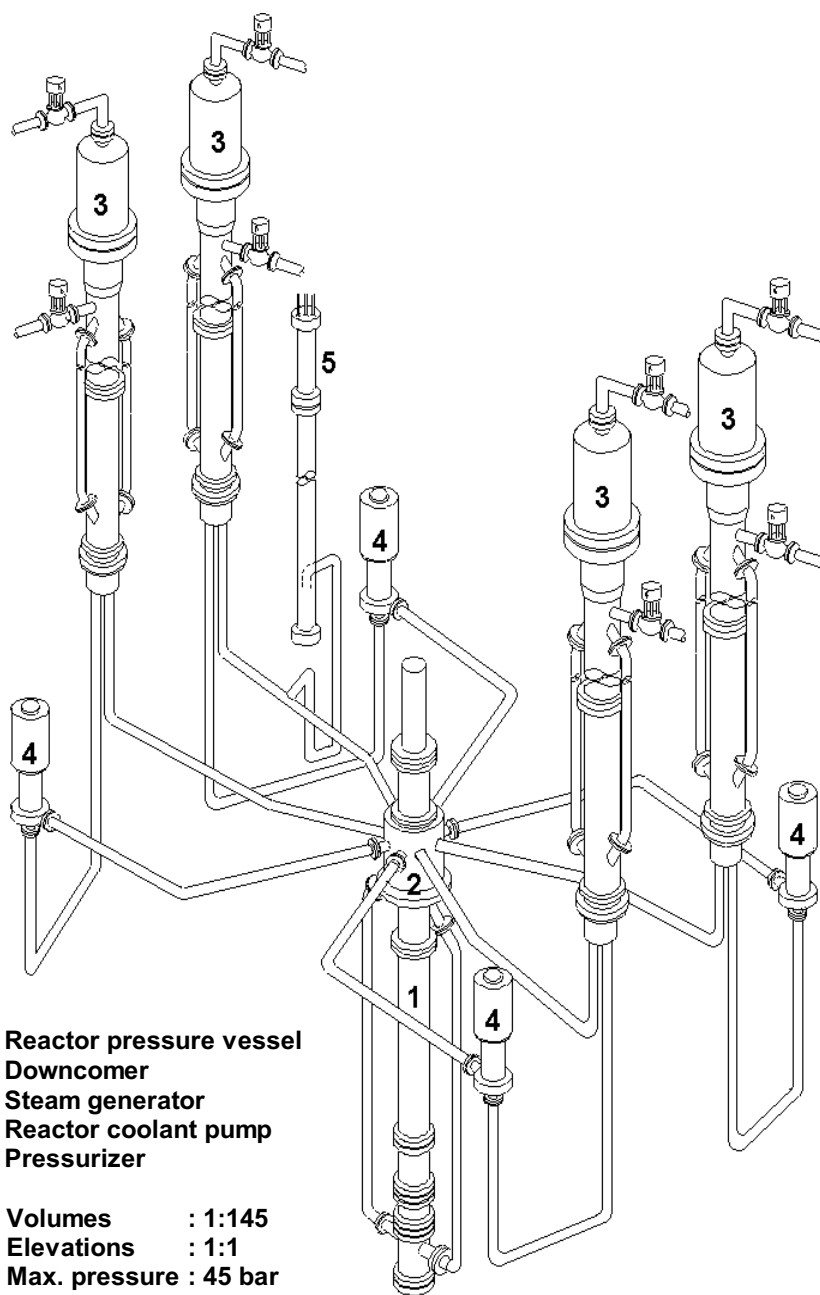
■ *KKW mit vorrangiger Kalteinspeisung:*

- *Kaltseitiges Leck: die Einspeisung einer SEP geht über das Leck verloren, somit ist hier das kaltseitige Leck am ungünstigsten*

- *Zusätzliche Heiß- und kaltseitige Niederdruckeinspeisung erhöht die minimale Borkonzentration am Kerneintritt. Konservativerweise wird in den Analysen daher kein Start der Niederdruckeinspeisung vor Anlaufen des Naturumlaufs angenommen.*

Experimentelle Untersuchungen

- > *Volumen und Borkonzentration der niedrigborierten Wasserpfropfen*
→ **PKL**
- > *Wiederaanlaufen Naturumlauf* → **PKL**
- > *Vermischung im Downcomer und im unteren Plenum* → **ROCOM**



1. Reactor pressure vessel
2. Downcomer
3. Steam generator
4. Reactor coolant pump
5. Pressurizer

Volumes : 1:145
 Elevations : 1:1
 Max. pressure : 45 bar
 Max. power : 2.5 MW (10%)

PKL III Tests zur Untersuchung der SB-LOCA Borverdünnung

		National Program 2000	OECD / SETH Program 2001 - 2003			National Program 2004
		E1.1	E2.1	E2.2	E2.3	F1.3
Break size		40 cm ²	40 cm ²	32 cm ²	50 cm ²	39 cm ²
Break position		Hot leg in loop with pressurizer	Hot leg in loop with pressurizer	Cold leg	Hot leg	Hot leg
ECC	HPSI	All 4 SIPs into cold legs	All 4 SIPs into hot legs	2 of 4 SIPs, cold legs (1 in affected loop)	2 of 4 SIPs, hot legs (1 in affected loop)	2 of 4 SIPs, hot legs (1 in affected loop)
	ACCs	---	---	---	All 4 hot leg ACCs	All 4 hot leg ACCs
	LPSI	Cold-leg injection into all 4 loops	Hot-leg injection into all 4 loops	Cold-leg injection into 2 of 4 loops	Hot-leg injection into 2 of 4 loops	Hot- and cold-leg injection into 2 of 4 loops
SG sec. sides		100 K/h	100 K/h	100 K/h	100 K/h	100 K/h
Central topics of investigation		Symmetry, boron concentration in all 4 loops	Symmetry, boron concentration in all 4 loops	Max. condensate production during design basis accident with break in cold leg	Max. condensate production during design basis accident with break in hot leg	Symmetry, boron concentration in all 4 loops

KKW mit vorrangiger Heißspeisung

Versuchsergebnisse

> *Analysen and PKL III Tests zeigten:*

■ *Die Bandbreite heißseitiger Lecks mit Reflux-Condenser-Betrieb beinhaltet zwei Szenarien :*

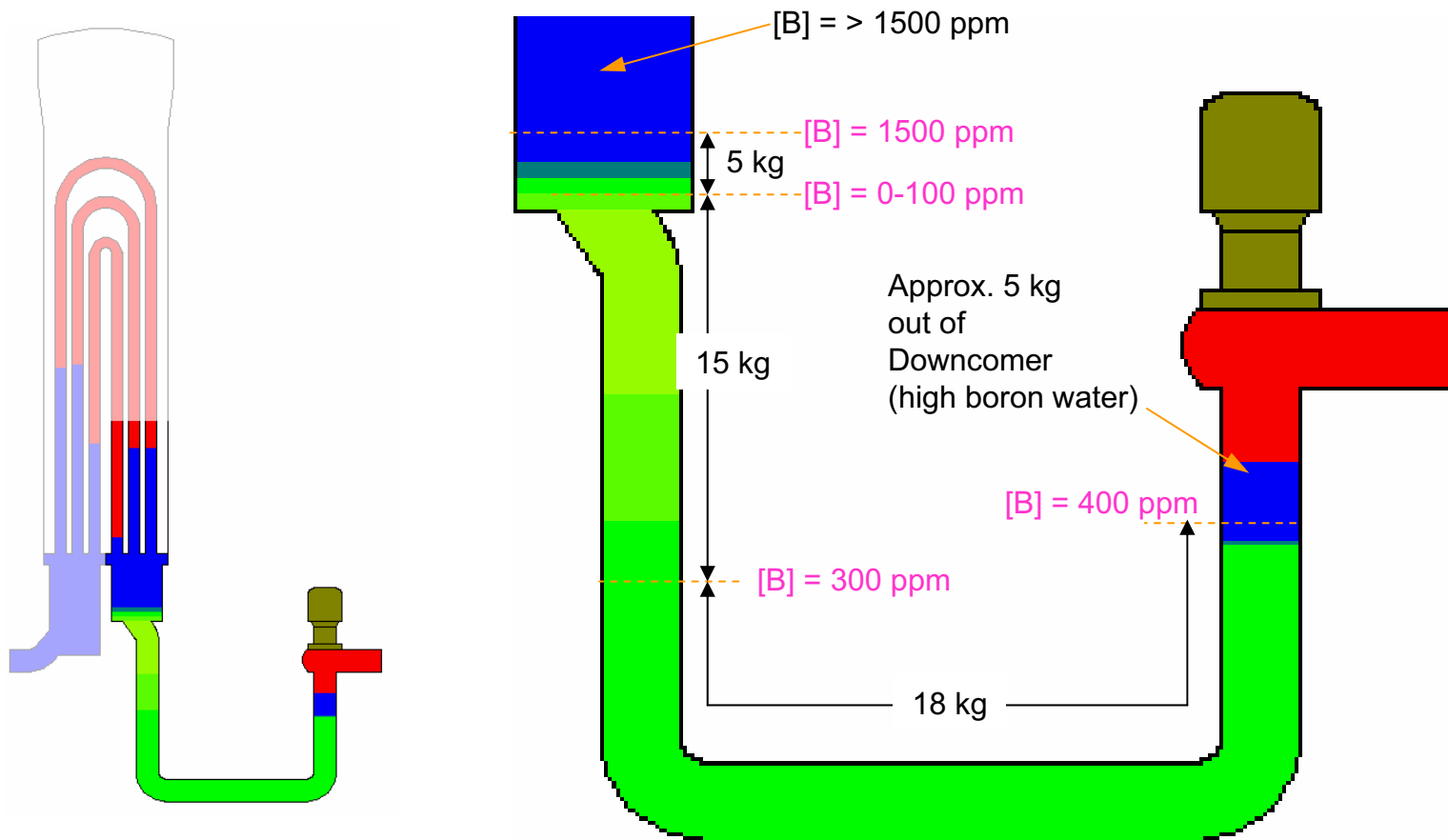
- *Szenario 1 (wahrscheinlich): Unterbrechung des Naturumlaufs in allen Loops bevor das minimale PK- Inventar erreicht ist, vorzugsweises Wiederanlaufen des Naturumlaufs in den Loops ohne Hochdruckeinspeisung*
- *Szenario 2 (unwahrscheinlicher, nur möglich in einem eng begrenzten Leckgrößenbereich):*
 - *permanenter Naturumlauf in zwei Loops mit SE*
 - *Unterbrechung des Naturumlaufs in den Loops ohne SE mit entsprechendem Reflux-Condenser-Betrieb*
 - *Wiederanlauf des Naturumlaufs nach Füllen dieser Loops*

PKL III Tests F1.3 and E2.3 heißseitiges Leck, heißseitige SE

- > Szenarien 1 und 2 wurden in PKL III Tests F1.3 and E2.3 (SE Borkonzentration 2200 ppm) untersucht
 - PKL III Test F1.3, Szenario 1: Minimale Borkonzentration am Kerneintritt > 1500 ppm → Borkonzentration am Kerneintritt für Szenario 1 >> 1500 ppm
 - PKL III Test E2.3, Szenario 2:
 - Nach entsprechenden Vorversuchen konnte ein kontinuierlicher Naturumlauf in den Loops mit SE und ein Reflux-Condenser-Betrieb in den Loops ohne SE erreicht werden.
 - Niedrigborierte Wasserpfropfen sammelten sich in den Pumpenbögen
 - Damit konnte das (entsprechend skalierte) Volumen des niedrigborierten Wasserpfropfens und der Massenstrom des anlaufenden Naturumlaufts bestimmt werden

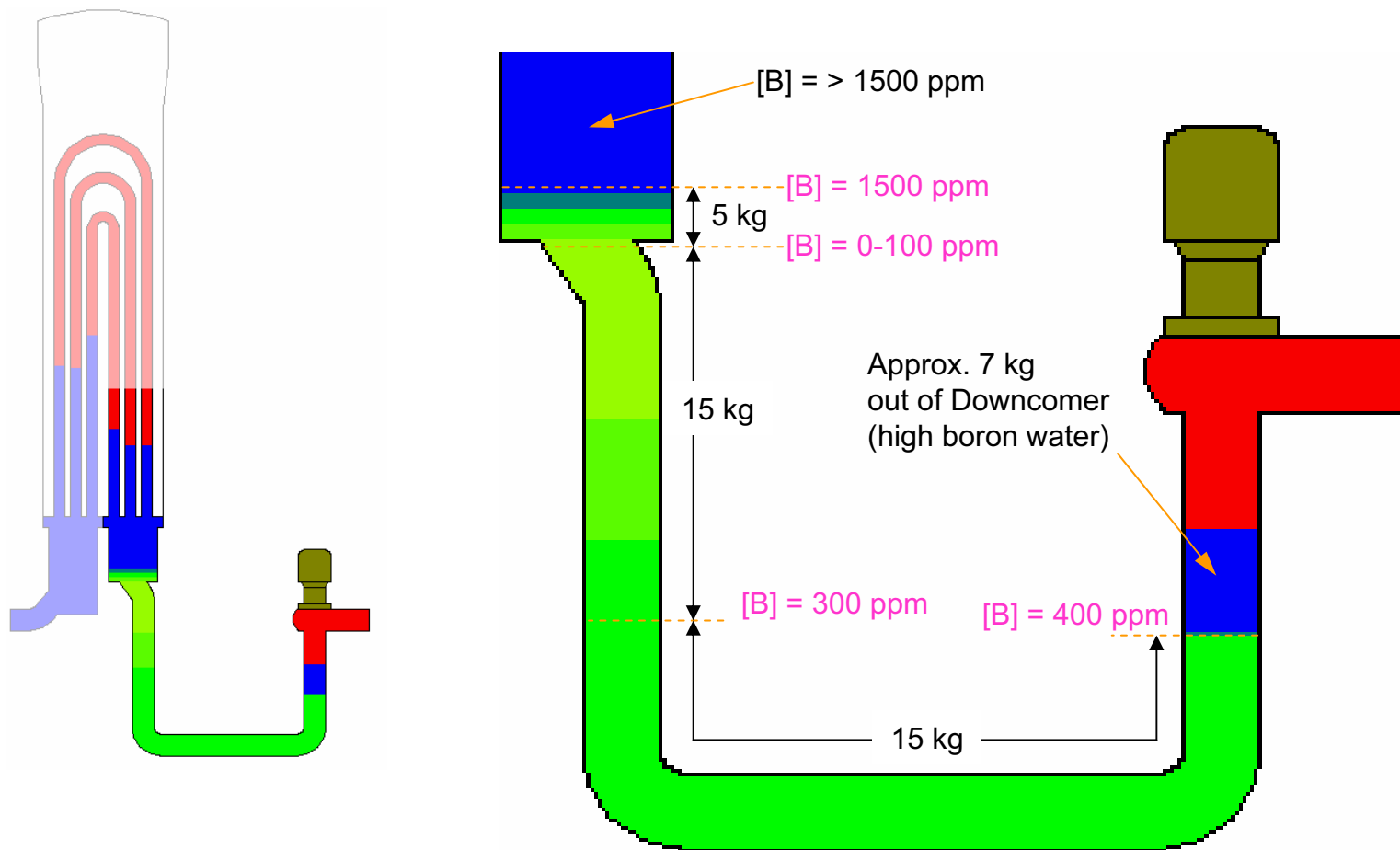
PKL III E2.3

niedrigborierter Wasserpfropfen in Loop 2 beim Wiederaanlaufen des Naturumlaufs in diesem Loop (480 s nach Testbeginn)



PKL III E2.3

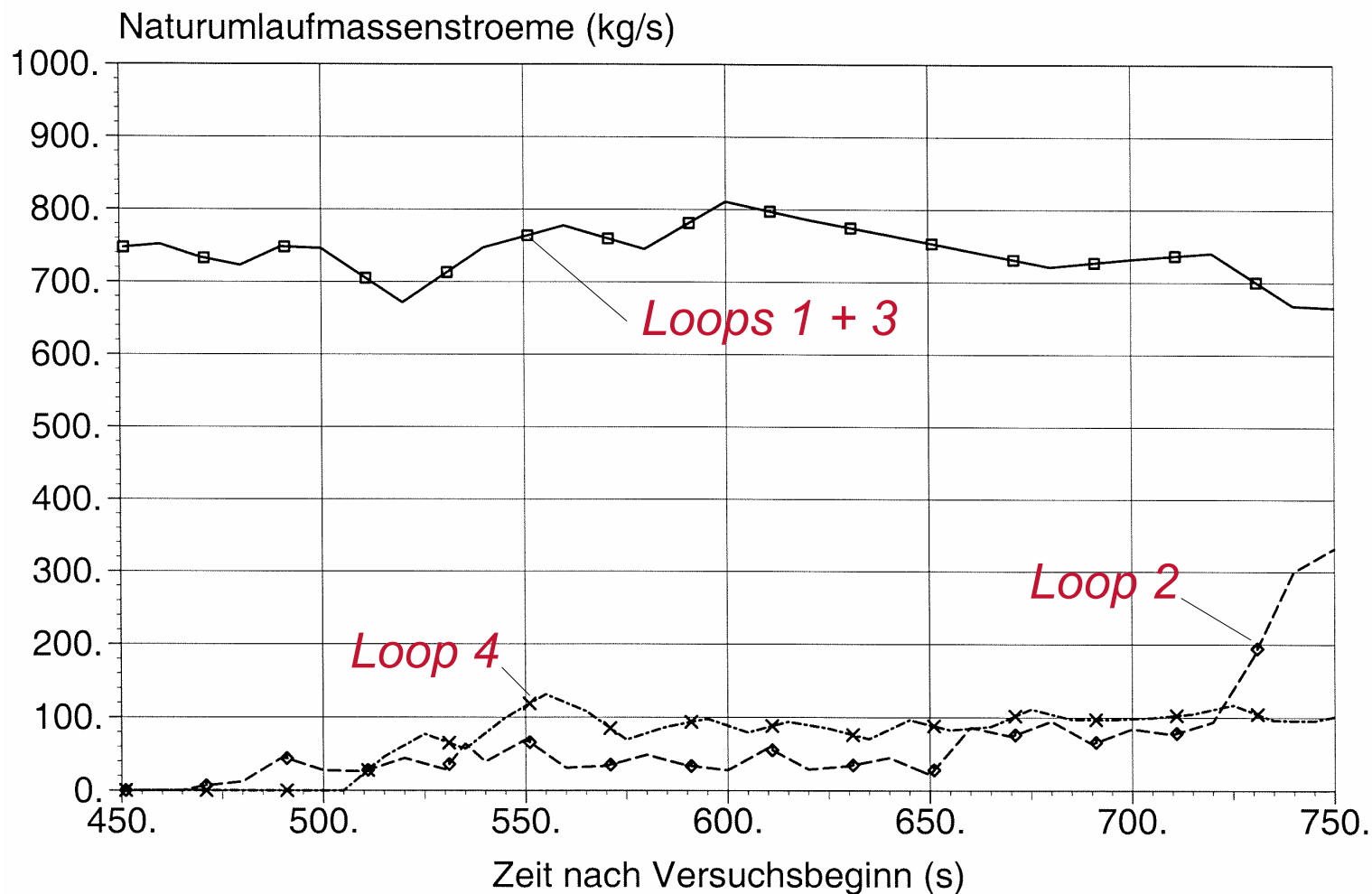
niedrigborierter Wasserpfropfen in Loop 4 beim Wiederaanlaufen des Naturumlaufs in diesem Loop (730 s nach Testbeginn)



Wiederaanlaufen des Naturumlaufs

- > *Nach Wiederaanlaufen des Naturumlaufs zeigt der Massenstrom ein kurzzeitiges Maximum (Peak) bevor er quasistationäre Werte erreicht*
- > *Der niedrigborierte Wasserpfropfen erreicht den Downcomer während des Peaks*
- > *Der Naturumlauf startet niemals in allen Loops zur gleichen Zeit. Das Wiederaanlaufen ist in den Loops mit SE signifikant verzögert.*
- > *Keine niedrigborierte Wasserpfropfen in den Loops mit SE*
- > *Die niedrigborierten Wasserpfropfen in den anderen Loops erreichen den Downcomer und bestimmen die minimale Borkonzentration am Kerneintritt*

DWR 1300: Naturumlaufmassenströme (hochgerechnet auf der Basis der PKL III E2.3 Ergebnisse)



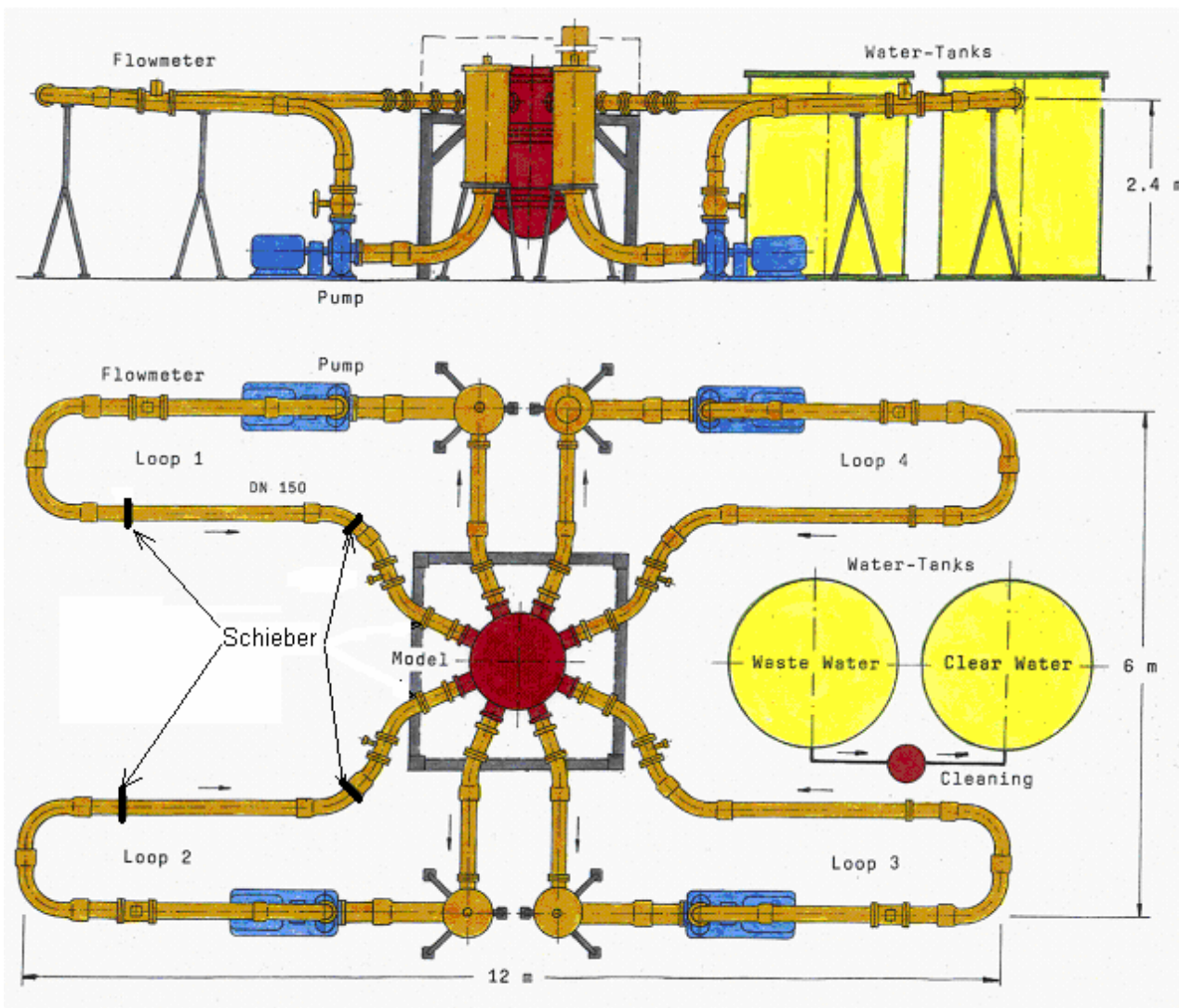
Vermischung in den Loops, Downcomer und unterem Plenum

- > *Die Vermischung der niedrigboreierten Wasserpfropfen mit höherboreiertem Kühlmittel ist der wesentliche Mechanismus zur Beherrschung solcher Szenarien*
- > *Computercodes sind bisher nicht in der Lage die Vermischung zu zweifelsfrei zu berechnen, daher:*
 - *wird die Vermischung in den DE-Heizrohren und in den Loops durch konservative PKL III Versuche bestimmt,*
 - *wird die Vermischung im Downcomer und unterem Plenum durch ROCOM Versuche (basierend auf Randbedingungen der PKL Versuche) bestimmt.*
 - *Die Anwendung der PKL und ROCOM Ergebnisse auf Maßstäbe von realen Anlagen erfolgt anhand generischer Skalierungsgesetze*

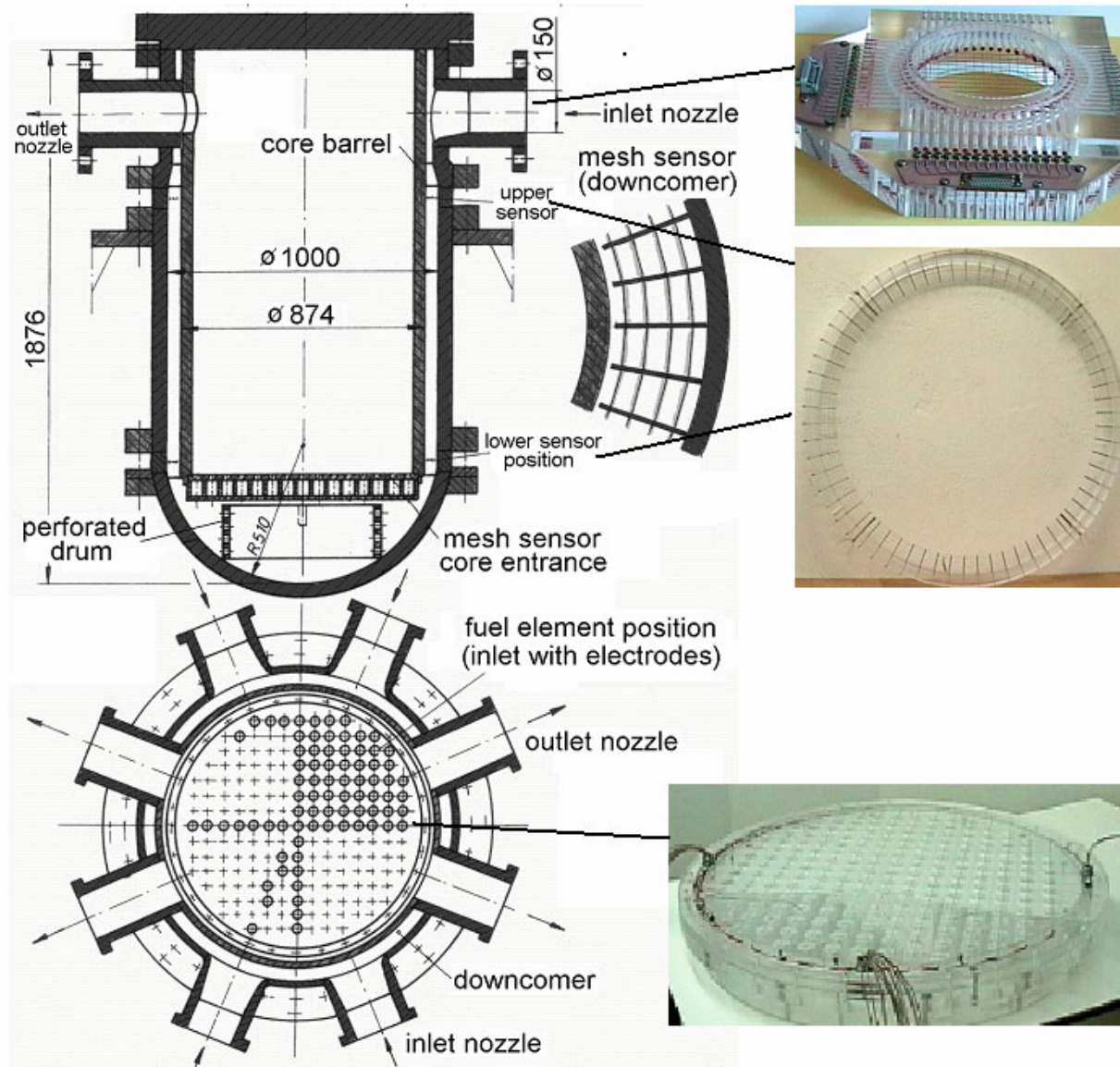
ROCOM Versuchsanlage



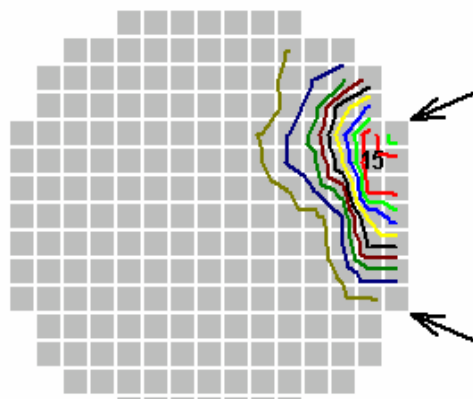
ROCOM Versuchsanlage



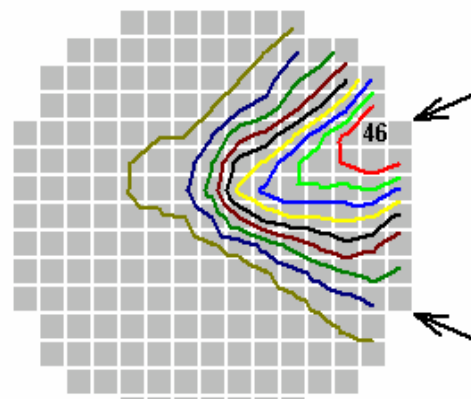
Messung von lokalen Vermischungskalaren in ROCOM



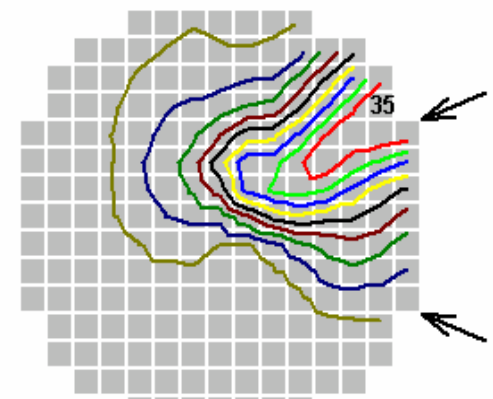
ROCOM: gemessene Vermischung (Randbedingungen aus PKL III E2.3)



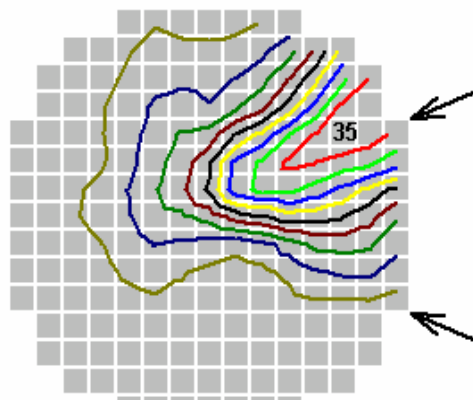
Stepwidth: 1.5
t=350.000s



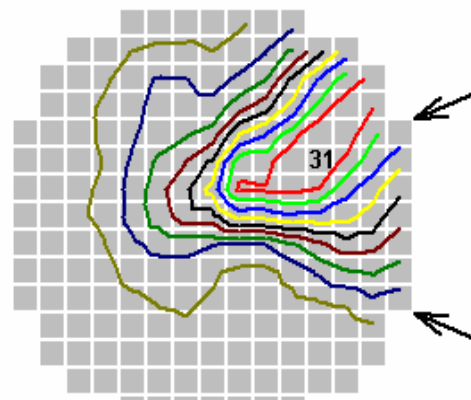
Stepwidth: 4.4
t=370.000s



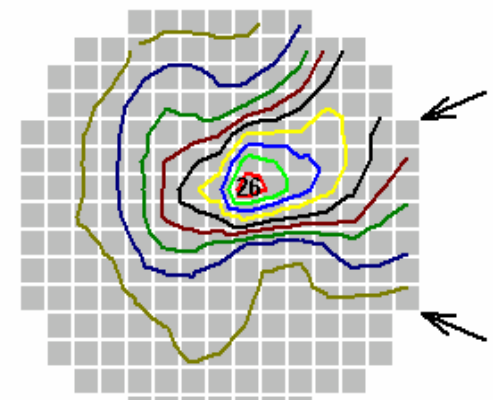
Stepwidth: 3.2
t=390.000s



Stepwidth: 3.2
t=400.000s



Stepwidth: 2.8
t=410.000s



Stepwidth: 2.3
t=420.000s

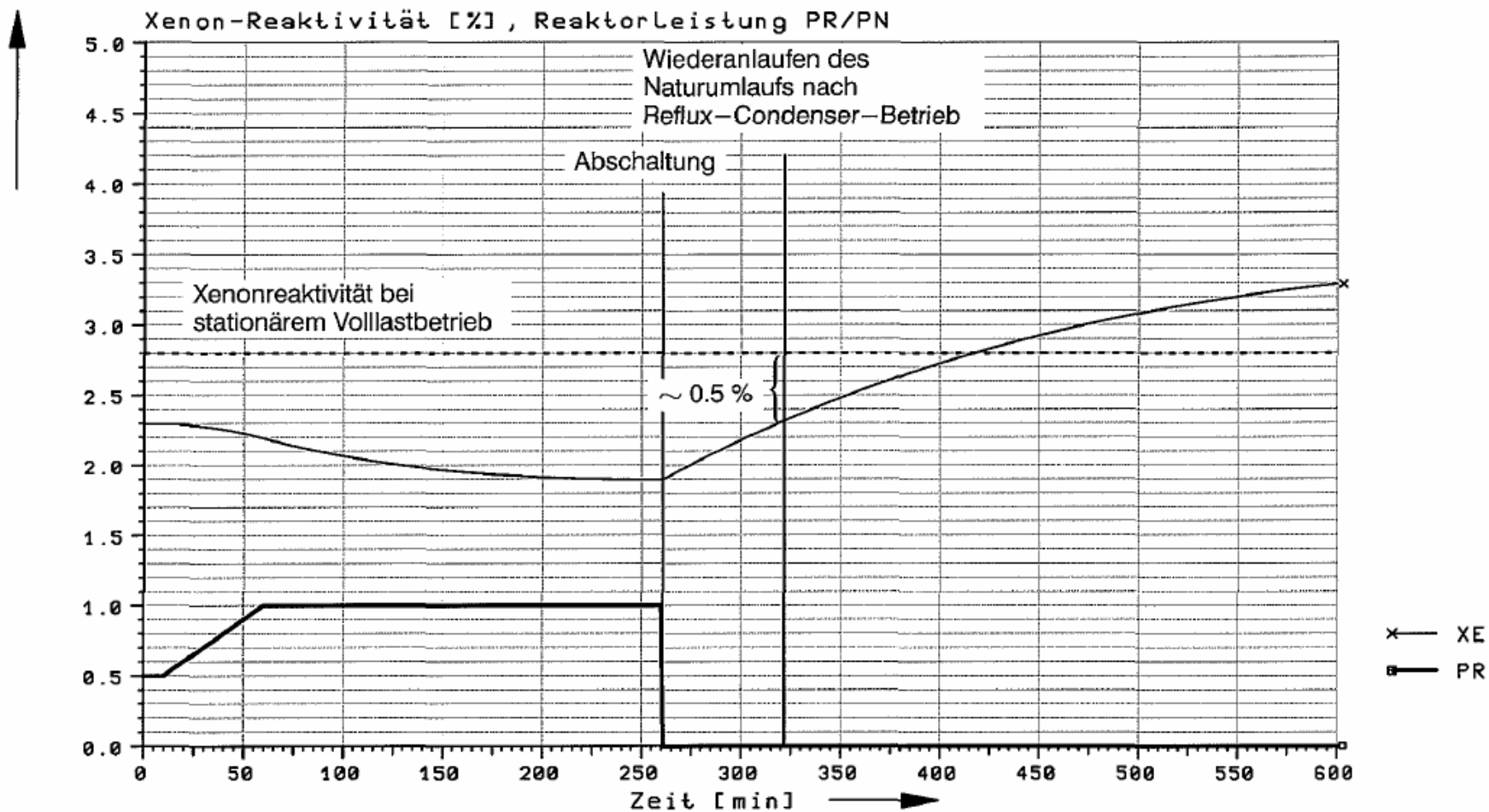
Konservative Annahmen in den Versuchen und Analysen

- *Zwei SE-Systeme werden als nicht verfügbar angenommen*
- *PKL III E2.3: heißseitige Druckspeichereinspeisung und Zusatzboriersystem nicht simuliert*
- *Die in PKL III E2.3 gemessenen niedrigboreierten Wasserpfropfen werden in ROCOM so modelliert, dass sie gleichzeitig den Downcomer erreichen*
- *Dichteunterschiede, die in PKL II E2.3 gemessen wurden und die positive Wirkung auf die Vermischung haben, wurden in ROCOM nicht berücksichtigt*
- *In Analysen werden konservative Annahmen zur Bestimmung der kritischen Borkonzentration (Borkonzentration, die benötigt wird, um Kritikalität zu vermeiden) getroffen*

Vergleich der minimalen lokalen Borkonzentration mit der kritischen Borkonzentration

- > *ROCOM Versuche liefern die minimalen Borkonzentrationen am Kerneintritt. Diese Borkonzentration ist unabhängig von Beladung und Zykluszeitpunkt.*
- > *Die kritische Borkonzentration zur Vermeidung der Rekritikalität wird unter folgenden Voraussetzungen bestimmt:*
 - *Wassertemperatur 180°C (anstelle von 200°C in PKL III E2.3)*
 - *1% Unterkritikalität (konservativ, da eigentlich eine Forderung nur für die Langzeitbeherrschung)*
 - *Postulierte Xenon-Konzentration:*
 - *Realistisch: 1 h nach Abschaltung aus Volllast*
 - *Konservativ: Lastwechsel von 50% auf 100% 3 h vor Störfalleintritt (maximaler Xenonausbrand)*

Ermittlung der kritischen Borkonzentration konservative Annahmen zur Xenonkonzentration nach Lastwechsel



- *Vermischungsvorgänge in den Loops, im Downcomer und im unteren Plenum erhöhen die minimale Borkonzentration auf:*
 - *ca. 1600 ppm wenn die Wasserpfropfen den Downcomer zu unterschiedlichen Zeiten erreichen (wahrscheinlich)*
 - *ca. 1000 ppm wenn konservativ postuliert wird, dass beide Wasserpfropfen zur gleichen Zeit den Downcomer erreichen*
- *Diese minimale Borkonzentration ist auf reale Anlagen übertragbar*
- *Die kritische Borkonzentration wird unter konservativen Randbedingungen anlagenspezifisch ermittelt und muss geringer als die minimale Borkonzentration sein*
- ***Entsprechende Nachweise wurden bereits geführt, allerdings sind bisher von Gutachtern (und RSK) nur 850 ppm minimale Borkonzentration anerkannt → mit aktuellen Kernen einzuhalten***

Kenntnisstand zu unterstellten Borverdünnungsszenarien in DWR

Experimente an der Versuchsanlage ROCOM zur Kühlmittelvermischung bei Wiederaanlauf der Naturzirkulation

Sören Kliem, Tobias Sühnel, Hans-Michael Prasser, Frank-Peter Weiß,
Forschungszentrum Rossendorf e. V., Dresden

EXPERIMENTE AN DER VERSUCHSANLAGE ROCOM ZUR KÜHLMITTELVERMISCHUNG BEI WIEDERANLAUF DER NATURZIRKULATION

S. Kliem, T. Sühnel, H.-M. Prasser, F.-P. Weiss

Forschungszentrum Rossendorf, Institut für Sicherheitsforschung
PF 510119, D-01314 Dresden

1 Einleitung

Ein kleiner Leckstörfall kann im Druckwasserreaktor (DWR) bei teilweisem Ausfall der Hochdruckeinspeisung zum Abriss der Naturzirkulation führen. Entsprechend den RSK-Leitlinien und Sicherheitskriterien für Kernkraftwerke ist bei der Auslegung des Notkühlsystems der Instandhaltungsfall und ein gleichzeitiger Einzelfehler im Anforderungsfall zu unterstellen. Bei den unterstellten Szenarien geht zusätzlich eine der verbleibenden Hochdruckeinspeisungen über das Leck verloren, da die selbsttätig wirkende Umschaltung der Notkühleinspeisung zwischen dem heiß- und kaltseitigen Einspeisestrang aufgrund der zu geringen Schalldruckdifferenz bei dieser Leckgröße nicht erfolgt. In diesen Fällen wird der größte Teil der Nachzerfallswärme im Reflux-Condenser-Betrieb abgeführt. Dieser Reflux-Condenser-Betrieb führt zur Produktion und zur Ansammlung von gering boriiertem Kühlmittel im Primärkreislauf. Auf Grund des Inventarverlustes über das Leck und des Abfahrens der Sekundärseite mit 100 K/h, das mit der Reaktorschnellabschaltung eingeleitet wurde, fällt der Primärdruck. Bei einem bestimmten Druckniveau ist der Massenstrom der Noteinspeisung groß genug, um die Leckverluste zu kompensieren. Die Primärkreisläufe werden entsprechend ihrer individuellen Zustände wieder aufgefüllt und der Naturumlauf springt wieder an. Die minderboriierten Kondensatpfropfen werden in Richtung Reaktorkern transportiert.

Deutsche Kernkraftwerke mit Druckwasserreaktoren sind mit heißseitiger oder kaltseitiger Vorzugslage der selbsttätig wirkenden Umschaltung der Notkühleinspeisung ausgestattet. Zusammen mit der möglichen Leckposition ergeben sich daher folgende vier mögliche Kombinationen von Leck- und Einspeiseposition:

- Kaltseitiges Leck mit kaltseitiger Einspeisung
- Heißseitiges Leck mit kaltseitiger Einspeisung
- Kaltseitiges Leck mit heißseitiger Einspeisung
- Heißseitiges Leck mit heißseitiger Einspeisung

Thermohydraulische Analysen mit fortgeschrittenen Rechenprogrammen (S-RELAP oder ATHLET) wurden für alle vier Kombinationen durchgeführt. Diese Analysen haben ergeben, dass je nach Vorzugslage der Notkühleinspeisung bei den Anlagen die Kombination "Kaltseitiges Leck mit kaltseitiger Einspeisung" und "Heißseitiges Leck mit heißseitiger Einspeisung" führend sind bei der Produktion und der Akkumulation von deboriertem Kühlmittel. Weiterhin hat eine Analyse der GRS zur Lecklage mit Vorzugseinspeisung "heiß" auf Basis des LOBI-Experiments ergeben, dass unter bestimmten Bedingungen (hohe Nachzerfallsleistung) der Naturumlauf in den beiden bespeisten Schleifen nicht abreißt. Bei der abgebauten LOBI-Anlage der ISPRA han-

delte es sich um ein 1:700 2-Schleifen-Modell einer 1300 MW-Anlage (Referenzanlage Biblis-B). Der Reflux-Condenser-Betrieb findet nur in den beiden anderen Schleifen statt. Wenn nach dem Wiederauffüllen des Primärkreislaufes die Naturzirkulation in diesen Schleifen wieder anläuft, werden die angesammelten minderborierten Kondensatpfropfen in Richtung Reaktorkern transportiert. Aufgrund der in den beiden bespeisten Schleifen bestehenden Zirkulation ist zu erwarten, dass die Aufborierung auf dem Weg zum Reaktorkern weniger effektiv ist als in den Szenarien mit Abriss der Naturzirkulation in allen Schleifen. Einzelheiten zu den thermohydraulischen Analysen aller vier Szenarien sind in (Pointner, 2003) zu finden.

Zusammenfassend ist zu konstatieren, dass für die Anlagen mit kaltseitiger Vorzugslage der Notkühlein speisung die Kombination „Kaltseitiges Leck mit kaltseitiger Einspeisung“ sowie die Kombination „Heißseitiges Leck mit heißseitiger Einspeisung“ für die Anlagen mit heißseitiger Vorzugslage der Notkühlein speisung hinsichtlich der minimalen Borkonzentration am Kerneintritt das jeweils abdeckende Szenario darstellt (Pointner, 2003).

Für beide Szenarien wurden Versuche an der Großversuchsanlage PKL durchgeführt. Die Versuchsanlage PKL (Mull, 2003) ist eine skalierte Nachbildung eines KWU-Druckwasserreaktors. Die PKL-Anlage bildet die gesamte Primärseite und wesentliche Teile der Sekundärseite der Referenzanlage im Höhenmaßstab von 1:1 nach. Bezüglich Volumen, Leistung und Massenstrom ist die Anlage im Maßstab von 1:145 skaliert. Die Versuchsanlage verfügt über vier symmetrisch um den Reaktor-druckbehälter (RDB) angeordnete Primärkreisstränge. Bei der Auslegung der Anlage wurde darauf geachtet, dass die Reibungsbeiwerte in den einzelnen Komponenten der Anlage den Originalwerten der Referenzanlage entsprechen. Durch diese Modellierung ist die Anlage bestens für die Untersuchung der thermohydraulischen Vorgänge bei Kühlmittelverluststörfällen einschließlich der Problematik der inhärenten Borverdünnung und des Wiederanlaufens des Naturumlaufs geeignet. Der originale Höhen- und Reibungsmaßstab gewährleistet eine direkte Übertragbarkeit der beobachteten Phänomene auf Reaktorbedingungen. Gemessene Naturumlaufmassenströme und Kondensatmengen werden im Verhältnis der thermischen Leistungen zwischen Referenzanlage und PKL (Skalierungsfaktor 145) auf Reaktorbedingungen übertragen.

Die Borverdünnung bei kleinem Leck im Primärkreislauf für DWR-Anlagen mit kaltseitiger Sicherheitseinspeisung wurde in den Versuchen PKL III E2.2 und PKL III F1.4 untersucht. Gegenstand des Versuchs PKL III E2.3 war die heißseitige Einspeisung von Notkühlwasser bei bestehen bleibender Naturzirkulation in den bespeisten Schleifen.

Die Versuchsergebnisse bis zum Eintritt in den RDB können direkt unter Verwendung des Skalierungsfaktors auf Reaktorbedingungen übertragen werden. Auf Grund der nahezu eindimensionalen Darstellung des Downcomers und des unteren Plenums an der Versuchsanlage sind die Vermischungsprozesse innerhalb des RDB der Versuchsanlage nicht übertragbar.

Um Aussagen über die sich am Kerneintritt ergebende minimale Borkonzentration zu erhalten wurden Experimente an der Versuchsanlage ROCOM (**R**ossendorf **C**oolant **M**ixing Model) durchgeführt. Basierend auf aus den PKL-Experimenten abgeleiteten Randbedingungen wurden an ROCOM Experimente zur Quantifizierung der Vermischung innerhalb des RDB für beide relevanten Szenarien durchgeführt.

2 Versuchsanlage ROCOM

2.1 Reaktormodell

Das Reaktormodell aus Plexiglas ist in Abb. 2.1 im Längs- und im Querschnitt dargestellt. Es bildet den RDB eines Druckwasserreaktors vom Typ KONVOI nach. Zwecks Zugänglichkeit des Downcomers und des unteren Plenums ist es dreiteilig (Stutzenbereich, Downcomer, unteres Plenum) mit einem ebenen Deckel ausgeführt, wobei letzterer gegen einen sphärischen Deckel entsprechend den Originalverhältnissen austauschbar ist. In den Kernbehälter wurde ein Kerneinsatz, bestehend aus 193 Aluminiumrohren der Nennweite 30 mm und der Länge $L = 965$ mm eingebracht, der eine hydraulische Verbindung zwischen unterem und oberem Plenum darstellt. Der zylindrische Teil des Druckbehälter-Modells besteht aus zwei in den Längsfugen verklebten Halbschalen aus Plexiglas, 20 mm dick, die von den ebenfalls angeklebten Plexiglas-Flanschen zentriert werden. Daran schließt sich, ebenfalls angeflanscht, der kugelförmige Boden des unteren Plenums bzw. im oberen Plenum der Stutzenring an. Die Flanschverbindungen untereinander und die Deckelbefestigung erfolgten durch Stahlschrauben.

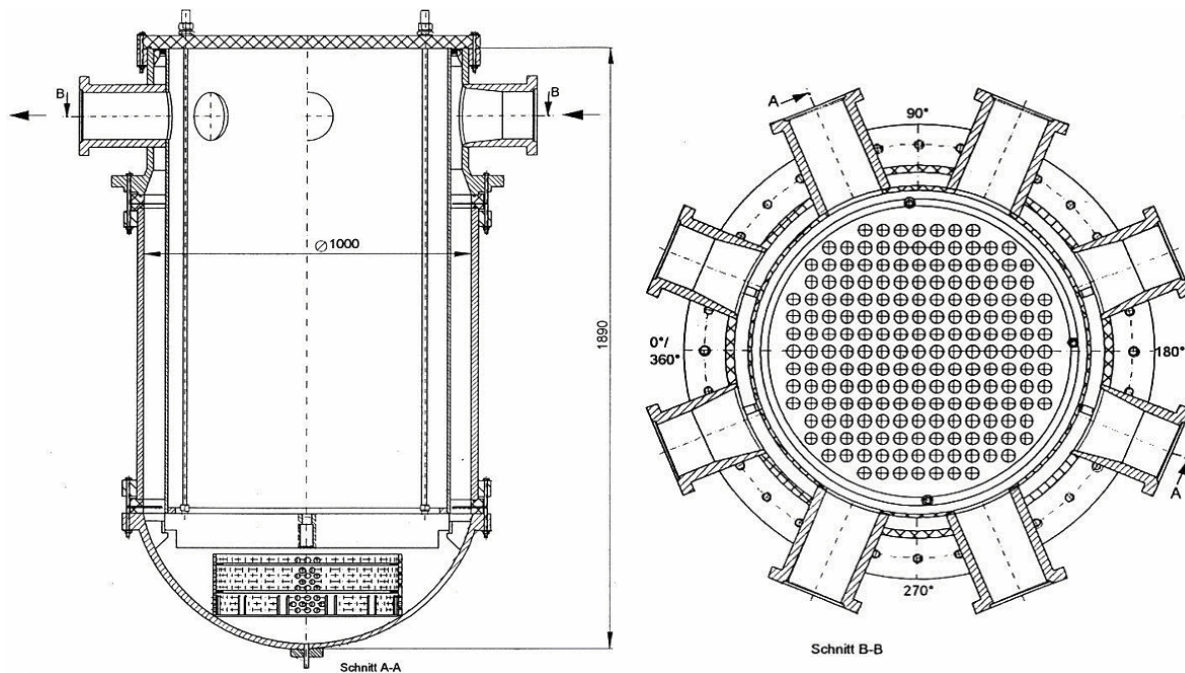


Abb. 2.1 Modell des Reaktors: Längsschnitt (links) Querschnitt im Stutzenbereich, Blick von oben (rechts)

In Abb. 2.1 ist im Schnitt A-A die Siebtone im unteren Plenum ersichtlich. Sie besteht aus einem demontierbaren Plexiglasring mit Bohrungen und Aussparungen entsprechend den Originalverhältnissen im Maßstab 1:5. Darüber befindet sich der so genannte Untere Rost, auf dem sich die 193 Brennelemente im Originalreaktor entsprechend der Anordnung nach Schnitt B-B (Abb. 2.1) abstützen.

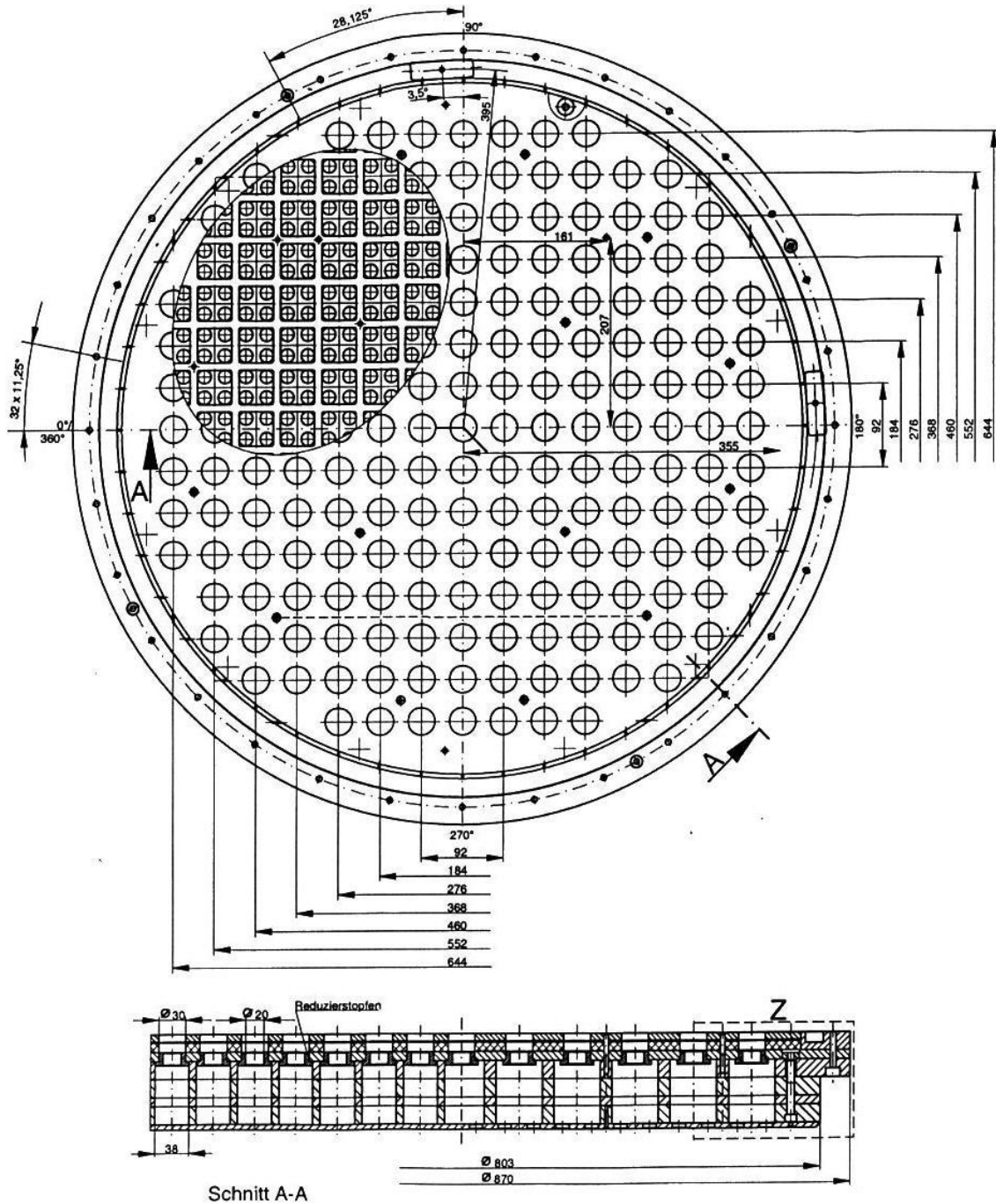


Abb. 2.2 Modell des Unteren Rosts

Das Modell des Unteren Rostes (Abb. 2.2) mit einer Gesamtdicke von 106 mm besteht aus mehreren geschichteten und verschraubten Plexiglas-Scheiben, in welche die Durchbrüche für die Kühlmittelströmung zu den Brennelementen entsprechend den Originalverhältnissen eingearbeitet sind (Abb. 2.3). Vor jedem Brennelement befindet sich eine Öffnung mit dem Durchmesser 30 mm, die jeweils eine Messposition des eingesetzten Gittersensors für den Kerneintritt enthält. An dieser Stelle wurden zusätzliche Blenden mit 20 mm Öffnung eingesetzt, um den hydraulischen Widerstand der Brennelemente entsprechend den Originalverhältnissen nachzubilden. In Abb. 2.3 erkennt man oberhalb der Blenden in der Zwischenplatte (6) die untere und die obere Drahtführung für die Gittersensordrähte, die so angeordnet sind, dass sich in der Mitte jedes Brennelementeintritts eine Leitfähigkeitsmessstelle befindet.

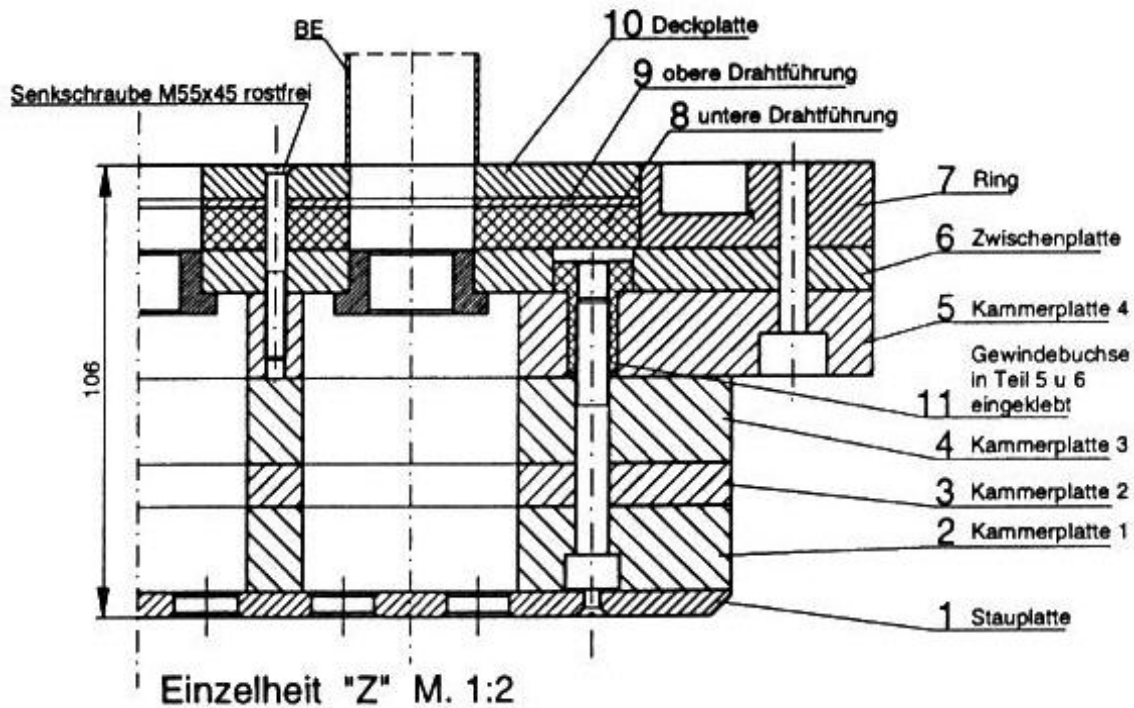


Abb. 2.3 Modell des Unteren Rosts, Detail: Kühlmittleintritt in das Brennelement

Zwischen den Flanschverbindungen (Abb. 2.1) zum unteren Plenum und zum Stützenring befinden sich Ringe in die der untere und der obere radiale Downcomer-Gittersensor oder die Halterungen für den axialen Gittersensor eingesetzt werden können, während die Eintrittssensoren noch vor den Eintrittsstützen aller vier Schleifen angeordnet sind. Im Schema des Reaktormodells (Abb. 2.4) sind die Hauptabmessungen mit Modelldeckel und die genannten Gittersensorpositionen nochmals dargestellt.

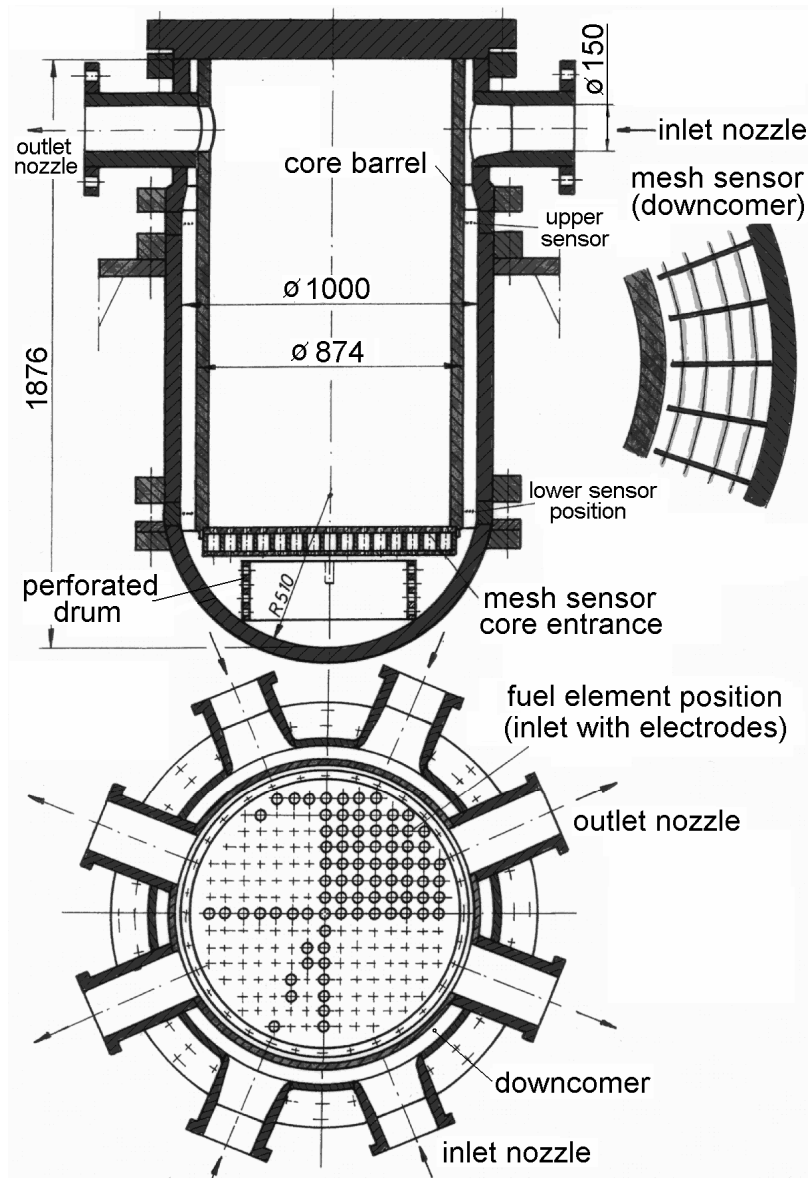


Abb. 2.4 Schema des Reaktormodells mit Einbauten und Gittersensorpositionen

2.2 Geometrische Ähnlichkeit und Skalierung

Bis zum Kerneintritt sind alle wesentlichen Komponenten geometrisch ähnlich ausgeführt. Für die Vermischungsuntersuchungen vom Reaktoreintritt bis zum Kerneintritt wurden folgende Details maßstabsgerecht berücksichtigt:

- Kühlmiteleintrittsstutzen
 - Innendurchmesser
 - konische Erweiterung im Flanschbereich
 - Krümmungsradius am Übergang zur Reaktorinnenwand
- Downcomer
 - Innen- und Außenradien, Höhe, Distanzhalter

- zylindrische Durchführungen zu den Austrittsstutzen
- diffusorartige Querschnittserweiterung unterhalb der Stutzenzone
- unteres Plenum
 - Krümmung der Innenwand der Bodenkalotte
 - perforierte Siebtonne
- Kerneintritt
 - Kerntageplatte mit Nachbildung der originalen Perforation

In die geometrisch ähnliche Nachbildung wurde noch der jeweils letzte vor dem Reaktoreintritt liegende Krümmer der Hauptkühlmittelleitung einbezogen. Der Rest der Schleifen einschließlich der Hauptumwälzpumpen ist nicht geometrisch ähnlich, sondern nur bezüglich des enthaltenen Wasservolumens maßstäblich gestaltet.

Die Versuchsanlage ROCOM ist gegenüber dem Originalreaktor im linearen Maßstab 1:5 verkleinert. Der Volumenmaßstab beträgt 1:125. Die Strömungsgeschwindigkeit bei Nennbedingungen wird im Maßstab 1:5 herabgesetzt, um die Transportzeiten im Modell dem Original anzugleichen. Bezüglich der Transportzeiten (z.B. der Kühlmittelumlaufzeit) gilt damit der Maßstab 1:1. Der Nennmassenstrom beträgt 185 m³/h, was einer Geschwindigkeit in der Hauptumwälzleitung von 2.9 m/s entspricht.

Der Versuchsstand wird mit Wasser bei einer Temperatur von ca. 20 °C betrieben. Bei den dabei vorliegenden Stoffwerten beträgt das Verhältnis der Reynolds-Zahlen zwischen Modell und Original ca. 1:190. Die Reynolds-Zahlen selbst erreichen bei Vierschleifenbetrieb Werte von $Re = 4.4 \cdot 10^5$ im Eintrittsstutzen und $Re = 1.4 \cdot 10^5$ im Downcomer. Bei Betrieb einer einzelnen Schleife beträgt die Reynolds-Zahl am Kerneintritt $Re = 3.4 \cdot 10^4$. Damit ist bei Nennbedingungen die Ausprägung einer hochturbulenten Strömung gewährleistet.

2.3 Gesamtanlage

ROCOM (Prasser, 2003 und Prasser, 2003a) ist eine Vierschleifenanlage (Abb. 2.5) mit vier separat über Frequenzumrichter steuerbaren Umwälzpumpen. Die Schleifen sind aus der geometrischen Ähnlichkeit ausgeklammert. Bei der Auslegung wurde auf die richtige Skalierung der Wasservolumina in den Schleifen geachtet. Der Innendurchmesser der Hauptkühlmittelleitungen beträgt 150 mm und entspricht dem Maßstab von 1:5.

In der Versuchsanlage sind jeweils zwei pneumatisch gesteuerte Schieber in die Schleifen 1 und 2 eingebaut, zwischen denen der deborierte Pfropfen vorgelegt wird (siehe Abb. 2.5). Die Öffnungszeit der Schieber wurde durch getrennte Ansteuerung der einzelnen Kammern mit Druckluft optimiert. Dadurch ist es möglich, eine Öffnungszeit der Schieber von 3 s zu realisieren. Die Öffnung der Schieber erfolgt aus dem Aufzeichnungsprogramm für die Gittersensoren, so dass eine zeitliche Synchronisation gewährleistet ist. Das zwischen den Schiebern eingeschlossene Pfropfenvolumen wurde durch Ausliterung bestimmt und beträgt nach Umrechnung auf die Originalanlage $2 \cdot 7.2 \text{ m}^3$. Der Wert von 7.2 m^3 ist erheblich größer als das Volumen des gesamten Pumpenbogens in der Originalanlage. Der Schieber auf der dem Reaktor zugewandten Seite befindet sich in einer Entfernung von 1.80 m (im Original 9.00 m), was einer Anfangsposition in der Originalanlage am Austritt aus dem Pumpenbogen an der Hauptkühlmittelpumpe entspricht.

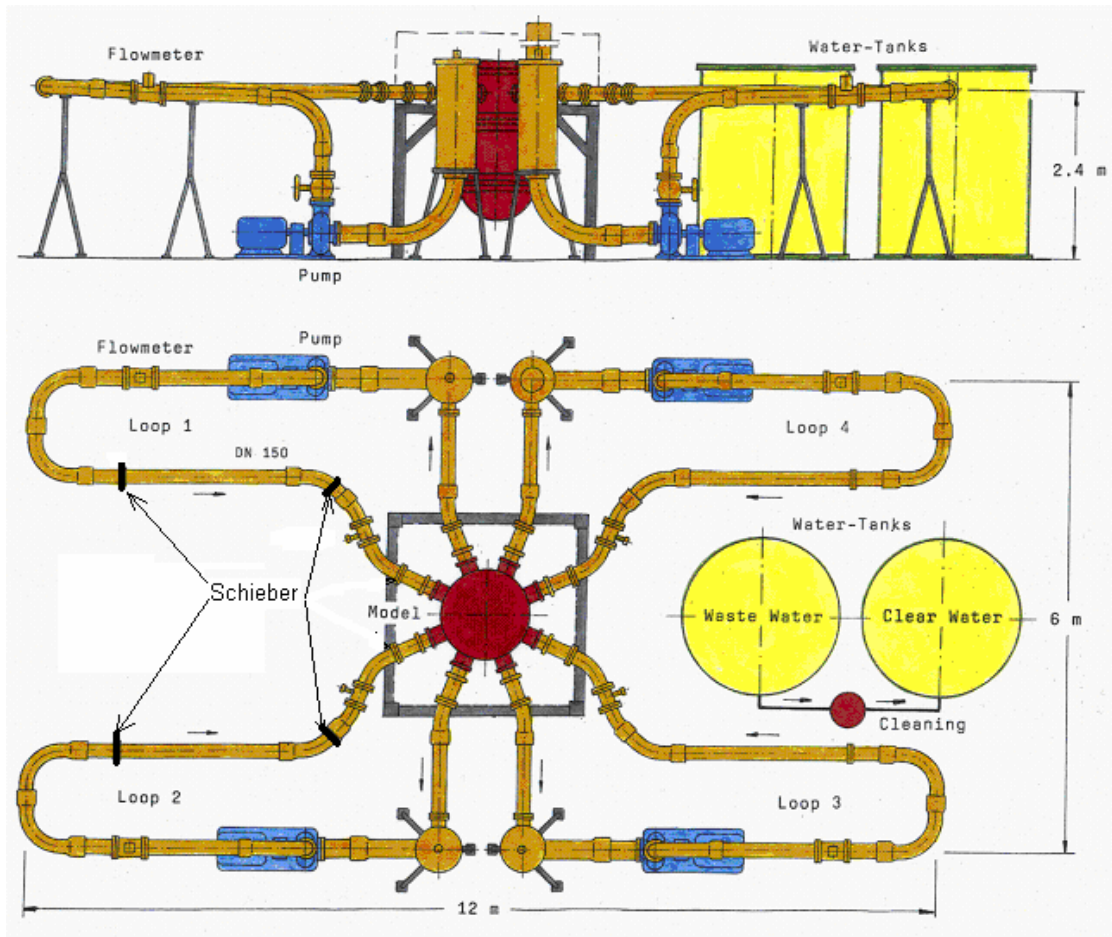


Abb. 2.5 Ansicht der Gesamtanlage ROCOM mit vier Umwälzschleifen einschließlich der Position der 4 Schieber für die Pfropfenvorlage

Die Anlage ist mit einem Dosierkreislauf ausgestattet, der an beide durch die Schieber eingeschlossene Abschnitte der Hauptkühlmittelleitung angeschlossen ist. Vor dem Beginn eines Experiments werden die Schieber geschlossen und das Wasser zwischen den Schiebern durch die Pfropfen mit geforderter Tracerkonzentration und Dichte ersetzt. Bis zum unmittelbaren Start des jeweiligen Experiments findet im Dosierkreislauf eine interne Zirkulation statt, in die die Volumina zwischen den Schiebern mit einbezogen sind, um eventuelle Separationseffekte auszuschließen.

Zwecks zuverlässiger Einstellung der geringen geforderten Volumenströme in den Schleifen der Versuchsanlage ROCOM wurden Drosselscheiben vorgesehen, die hinter den Umwälzpumpen in die Rohrleitungen aller vier Schleifen eingebaut wurden. Dadurch können die Pumpen auch bei geringen Volumenströmen in einem gut steuerbaren Drehzahlbereich betrieben werden. Ohne diese Drosselscheiben würde sich z.B. schon bei einer unteren Drehfrequenz der Pumpen von 2 Hz ein Massenstrom von fast 10 % des Nominaldurchsatzes einstellen. Außerdem wird eine zuverlässige Durchflussermittlung durch Messung des Druckabfalls über den Drosselscheiben möglich. Dies ist wichtig, da bei diesen geringen Volumenströmen (2 % entsprechen $3.7 \text{ m}^3/\text{h}$) die vorhandenen induktiven Durchflussmesser der Anlage zu große Fehler aufweisen. Die gemessenen Druckdifferenzen wurden mittels der an der ROCOM-Anlage vorhandenen Druckmesstechnik (Differenzdruckmesser) aufgenommen.

2.4 Steuerung

Die Drehzahlen der vier Umwälzpumpen werden über individuelle Frequenzumrichter vorgegeben. Die Frequenzumrichter erhalten ein 4 – 20 mA-Signal aus DA-Wandlern, die von einem Steuerungs-PC über eine serielle Schnittstelle mit 38.4 kBaud angesteuert werden. Sie setzen die Netzfrequenz in eine niedrigere Frequenz für die Spannungsversorgung der Pumpen um, wobei bei der verwendeten Konfigurierung der Frequenzumrichter ein Strom von 4 mA eine Frequenz von 0 Hz und der Wert von 20 mA der Frequenz von 25 Hz ergibt.

Nach Beendigung jedes Versuchs werden alle vier Pumpen für mindestens 300 s bei eingebauten Drosselscheiben und für mindestens 60 s ohne Drosselscheiben bei einer Drehzahl von 25 Hz betrieben, um den eingespeisten Tracer vor Beginn des nächsten Versuchs gleichmäßig in der Anlage zu verteilen.

2.5 Methodik der Vermischungsexperimente

Die Experimente an ROCOM haben das Ziel, zeitlich veränderliche Verteilungen der Transportgröße Borsäurekonzentration in der komplexen Geometrie des RDB mit seinen strömungsführenden Einbauten messtechnisch zu ermitteln. Die bestimmenden Eingangsgrößen sind die Zeitverläufe der Kühlmitteldurchsätze in den vier Schleifen der Versuchsanlage sowie die Borsäurekonzentration in den Kühlmittelleintrittsstutzen.

Die Volumenströme in den vier Schleifen werden durch die Steuerung der Umwälzpumpen vorgegeben. Hierbei können sowohl konstante als auch zeitlich veränderliche Durchsätze realisiert werden. Naturumlaufzustände lassen sich durch den Betrieb der Pumpen mit verminderter Drehzahl realisieren.

Die zu untersuchende Vermischungsgröße Borsäurekonzentration wird durch Natriumchlorid (NaCl) als Tracersubstanz ersetzt. Dieser Tracer wird in der Versuchsanlage in gleicher Weise vermischt, wie die mehr oder weniger borsäurehaltigen Kühlmittelanteile im Originalreaktor. Unterschiedliche Diffusionskoeffizienten des als Tracer verwendeten NaCl und der Borsäure spielen aufgrund der turbulenten Strömung in Reaktor und Versuchsanlage keine Rolle. Die Konzentration des Tracers wird über die Messung der elektrischen Leitfähigkeit bestimmt. Zur Übertragung der Verteilungen wird ein maßeinheitenloser Vermischungsskalar definiert. In den Experimenten liegt außerdem aufgrund der niedrigen verwendeten NaCl-Konzentrationen ein linearer Zusammenhang von Konzentration und elektrischer Leitfähigkeit vor. Deshalb kann der Vermischungsskalar direkt aus der gemessenen örtlichen momentanen Leitfähigkeit berechnet werden:

$$\theta_{\text{ROCOM}}(x, y, z, t) = \frac{C_{\text{NaCl}}(x, y, z, t) - C_{\text{NaCl},0}}{C_{\text{NaCl},P} - C_{\text{NaCl},0}} = \frac{\sigma(x, y, z, t) - \sigma_0}{\sigma_P - \sigma_0} \quad \text{Gl. 2.1}$$

Hierbei ist $C_{\text{NaCl}}(x, y, z, t)$ die momentane örtliche Tracerkonzentration in ROCOM, $C_{\text{NaCl},0}$ die Anfangskonzentration im Kreislauf vor Beginn des jeweiligen Experiments, $C_{\text{NaCl},P}$ die Tracerkonzentration im Pfropfen, der zwischen den Schiebern vorgelegt wurde. $\sigma(x, y, z, t)$, σ_0 sowie σ_P sind die entsprechenden Leitfähigkeiten, $\theta(x, y, z, t)$ ist der Vermischungsskalar im Koordinatensystem (x, y, z) der Versuchsanlage.

Während in der Versuchsanlage im Pfropfen eine erhöhte Tracerkonzentration vorliegt, ist die Borsäurekonzentration im teilweise deborierten Kühlmittelpfropfen abgesenkt. Durch die folgende Umrechnung erhält man jedoch wiederum einen positiven Vermischungsskalar:

$$\theta_{\text{DWR}}(X, Y, Z, t) = \frac{C_B(X, Y, Z, t) - C_{B,0}}{C_{B,P} - C_{B,0}} \quad \text{Gl. 2.2}$$

Hierbei ist $C_B(X, Y, Z, t)$ die momentane örtliche Borsäurekonzentration, $C_{B,0}$ der Sollwert der Konzentration im Kreislauf, $C_{B,P}$ die abgesenkte Borsäurekonzentration im Pfropfen. $\theta(X, Y, Z, t)$ ist der Vermischungsskalar im Koordinatensystem (X, Y, Z) des Originalreaktors.

Die Koordinaten lassen sich entsprechend der maßstäblichen Verkleinerung des Modells gegenüber dem Originalreaktor ineinander umrechnen. Durch die geometrische Ähnlichkeit und die Einhaltung der Durchlaufzeiten des Kühlmittels können die Verläufe des Vermischungsskalars an identischen charakteristischen Positionen, wie z.B. an den Positionen der Brennelemente und an den Kühlmiteleintrittsstutzen, direkt übernommen werden:

$$\theta_{\text{DWR}}(X_n, Y_n, Z_n, t) \equiv \theta_{\text{ROCOM}}(x_n, y_n, z_n, t) \quad \text{Gl. 2.3}$$

Hier symbolisiert n den Index der jeweiligen ausgewählten Position. Durch die Verwendung des Vermischungsskalars wird die lokale Absenkung der Borsäurekonzentration bezogen auf die Absenkung im Pfropfen der auf die Leitfähigkeit im Tracerpfropfen bezogenen Zunahme der lokalen Leitfähigkeit im Modell gleichgesetzt. Die im Weiteren ausgewiesenen prozentualen Werte des Vermischungsskalars stellen somit die relative Absenkung der Borsäurekonzentration dar. Im Fall eines Pfropfens, in dem die Borsäurekonzentration nicht auf Null abgesenkt ist, muss Gl. 2.3 zur Berechnung der örtlich auftretenden Konzentrationen nach C_B umgestellt werden:

$$C_B(X_n, Y_n, Z_n, t) \equiv \theta_{\text{ROCOM}}(x_n, y_n, z_n, t) \cdot (C_{B,P} - C_{B,0}) + C_{B,0} \quad \text{Gl. 2.4}$$

Das selbe Messprinzip kann auch für den Transport einer Temperaturstörung (z.B. Auskühlung einer Schleife nach einem Frischdampfleck) verwendet werden.

2.6 Messtechnik

2.6.1 Gittersensoren für Konzentrationsmessungen

Zur Messung der Leitfähigkeitsverteilungen werden spezielle Gittersensoren verwendet, die eigens für die Vermischungsuntersuchungen im FZR entwickelt wurden. Das Messverfahren wird zur Ermittlung der transienten Leitfähigkeitsverteilungen an verschiedenen Orten im Vermischungsmodell ROCOM genutzt. Die Gittersensoren sind das Kernstück der messtechnischen Ausstattung des Versuchstandes.

Der Gittersensor realisiert eine Messung der momentanen örtlichen elektrischen Leitfähigkeit des ihn umgebenden Mediums. Er wird aus zwei Ebenen von Elektroden

gebildet, die ein im Strömungsquerschnitt aufgespanntes Gitter bilden. Sie sind meist in Strömungsrichtung in einem kurzen Abstand hintereinander angeordnet, können aber auch anders gestaltet sein (siehe radialer Gittersensor für den Downcomer). Der Winkel zwischen den Elektroden der beiden Ebenen beträgt in der Regel 90° . Alle Elektroden sind gegeneinander und gegen etwaige leitfähige Wandungen der Versuchsanlage bzw. des Sensors selbst isoliert montiert. Die Elektroden der ersten Ebene (Senderebene) werden durch eine Multiplexschaltung zeitlich hintereinander mit kurzen Spannungsimpulsen versorgt. Dadurch tritt an jeder einzelnen Elektrode der zweiten Ebene (Empfängerebene) ein Strom auf, der zur mittleren Leitfähigkeit des Messmediums in der Umgebung des Kreuzungspunkts der beiden Elektroden proportional ist. Diese Ströme werden erfasst und die Werte an einen Datenerfassungsrechner geleitet und dort gespeichert. Durch geeignete Schaltungsmaßnahmen werden sowohl das Übersprechen zwischen den Elektroden als auch Elektrolyse- und Polarisationserscheinungen unterdrückt. Die gemessenen Werte repräsentieren direkt die elektrische Leitfähigkeit an jedem der Messpunkte, die durch einen Kreuzungspunkt zwischen Sender- und Empfängerelektrode gebildet werden.

Gittersensor für den Kühlmitelein- bzw. -austrittsstutzen

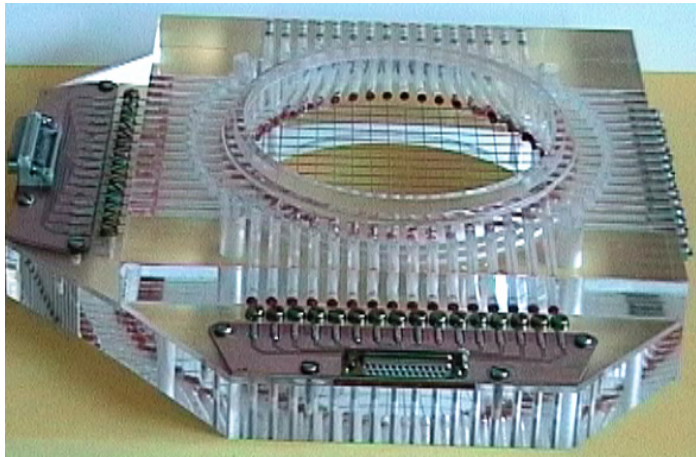


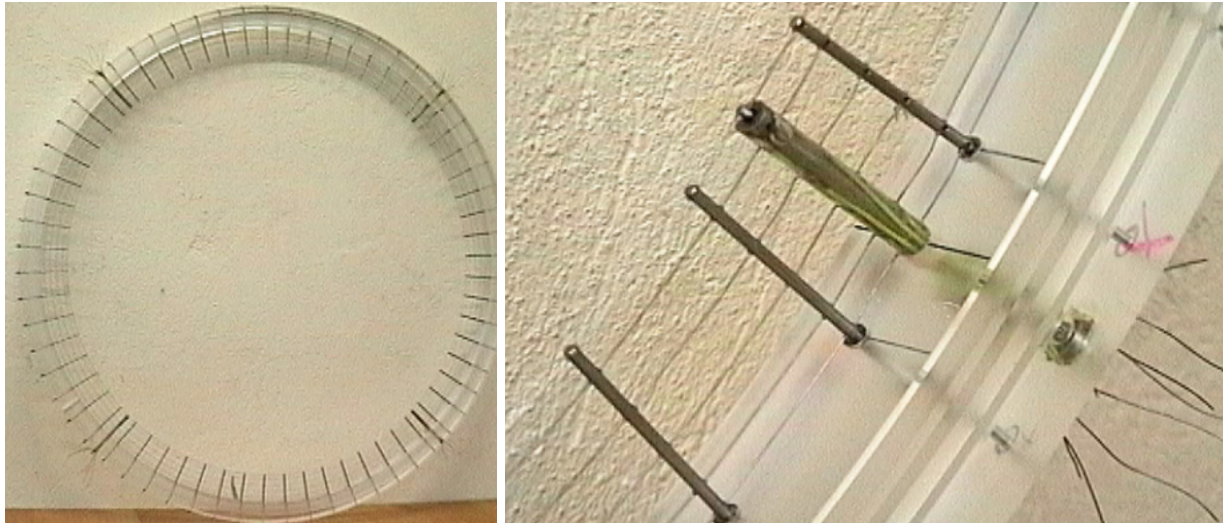
Abb. 2.6 Gittersensor für den Kühlmiteleintrittsstutzen (2 x 16 Elektrodendrähte)

Beim Sensor für die Ein- bzw. Austrittsstutzen handelt es sich um einen Drahtgittersensor, bei dem zwei senkrecht zueinander ausgerichtete Ebenen von Elektrodengittern mit je 16 Drähten von 0.5 mm Durchmesser in einem Abstand von 2.0 mm hintereinander angeordnet sind (Abb. 2.6). Der Abstand zwischen den parallelen Drähten beträgt 8.9 mm. Dieser Abstand bestimmt die örtliche Auflösung. Die Elektroden drähte bestehen aus Edelstahl 1.4550 und sind in einen Rahmen aus Plexiglas gespannt. Der Rahmen hat im Innern eine Öffnung von 150 mm Durchmesser, was dem Querschnitt der Hauptumwälzleitung von ROCOM entspricht.

Der Sensor wird zwischen zwei Flansche montiert, der die Kühlmittelschleife mit dem Stutzen am Reaktor verbindet. Dabei sind die Elektroden im Winkel von 45° gegen die Horizontale ausgerichtet. Der Sensor verfügt insgesamt über 256 Kreuzungspunkte zwischen den Elektroden drähten, die jedoch konstruktionsbedingt nicht alle für die Messung zur Verfügung stehen. In den Ecken der Matrix liegen einige Punkte außerhalb des kreisförmigen Strömungsquerschnitts. Insgesamt befinden sich 216 Messpunkte im freien Querschnitt.

Radialer Gittersensor im Downcomer

Im Downcomer sind zwei identische Gittersensoren angeordnet (Abb. 2.7). Sie befinden sich in den Positionen, an denen das Modell des Reaktor Druckgefäßes geflanscht ist (siehe Abb. 2.1). Der Grundkörper der Gittersensoren wird von einem Plexiglasring gebildet, dessen Innendurchmesser mit dem Innendurchmesser des Reaktorgefäßes übereinstimmt. Diese Ringe passen in die Flansche des Druckbehältermodells.



A) Gesamtansicht eines Downcomersensors

B) Detailansicht der Elektrodendrähte bzw. -stäbchen

Abb. 2.7 Fotos vom radialen Gittersensor für den Downcomer

Die Senderelektroden werden durch 64 radiale Stifte mit einem Durchmesser von 3 mm gebildet, die im Plexiglasring im gleichen Winkelabstand montiert sind. Diese Stifte stellen gleichzeitig die Halterung für die vier kreissegmentförmigen Empfängerdrähte (Durchmesser 0.5 mm) und die ebenfalls kreissegmentförmige Masseelektrode dar. Letztere wurde durch Bohrungen in den Elektrodenstiften isoliert geführt. Zum Zweck der elektrischen Isolation wurden Röhrchen ($\varnothing 1.4 \times 0.4$, 4 mm lang) aus Aluminiumoxid-Sinterkeramik in die Bohrungen der Halterungsstifte eingeklebt. Der einzelne Messpunkt befindet sich am jeweiligen Kreuzungspunkt zwischen den radialen Stiften und den kreissegmentförmigen Empfängerdrähten. Jeweils vier Empfängererelektroden erstrecken sich über einen Winkel von 90° . Durch die insgesamt 16 Empfängererelektroden wird der gesamte Umfang erfasst. Bei den Senderelektroden werden die in den vier Sektoren auf gleicher relativer Winkelposition befindlichen vier Senderelektroden elektrisch verbunden und von einem Sendertreiber der Signalerfassungseinheit angesteuert, dadurch bilden auch die Ringspaltsensoren mit ihren 4×64 Messpunkten elektrisch eine Messmatrix mit 16×16 Kreuzungspunkten. Als Kreuzungspunkt wird dabei die Umgebung der jeweiligen Durchführung der kreissegmentförmigen Empfängerdrähte durch die Senderelektroden definiert. Die Schrittweite in azimuthaler Richtung beträgt dabei 5.625° . In radialer Richtung stehen vier Messpositionen zur Verfügung, der radiale Abstand beträgt 13 mm.

Axialer Gittersensor im Downcomer

Für eine verbesserte Visualisierung und Quantifizierung der Vermischung im Downcomer der Versuchsanlage wurde ein neuer Gittersensor entwickelt, der an Stelle der

beiden radialen Sensoren eingebaut werden kann. Dieser Gittersensor bildet ein Netz aus 64 radialen und 32 axialen Messpunkten. Dazu wurden am Eintritt und am Austritt aus dem Downcomer jeweils 64 Befestigungsschrauben eingebracht, zwischen die senkrecht ein Draht gespannt wird (Abb. 2.8). Diese Drähte bilden die Senderelektroden. Die Empfängerelektroden sind Flachstähle mit einer Breite von 3 mm, die im Abstand von 31 mm auf die Innenwand des RDB aufgeklebt wurden. Die senkrechten Drähte befinden sich nahe der Kernbehälterwand. Damit liefert das Messsignal die integral über die Breite des Downcomers gemessene Leitfähigkeit.

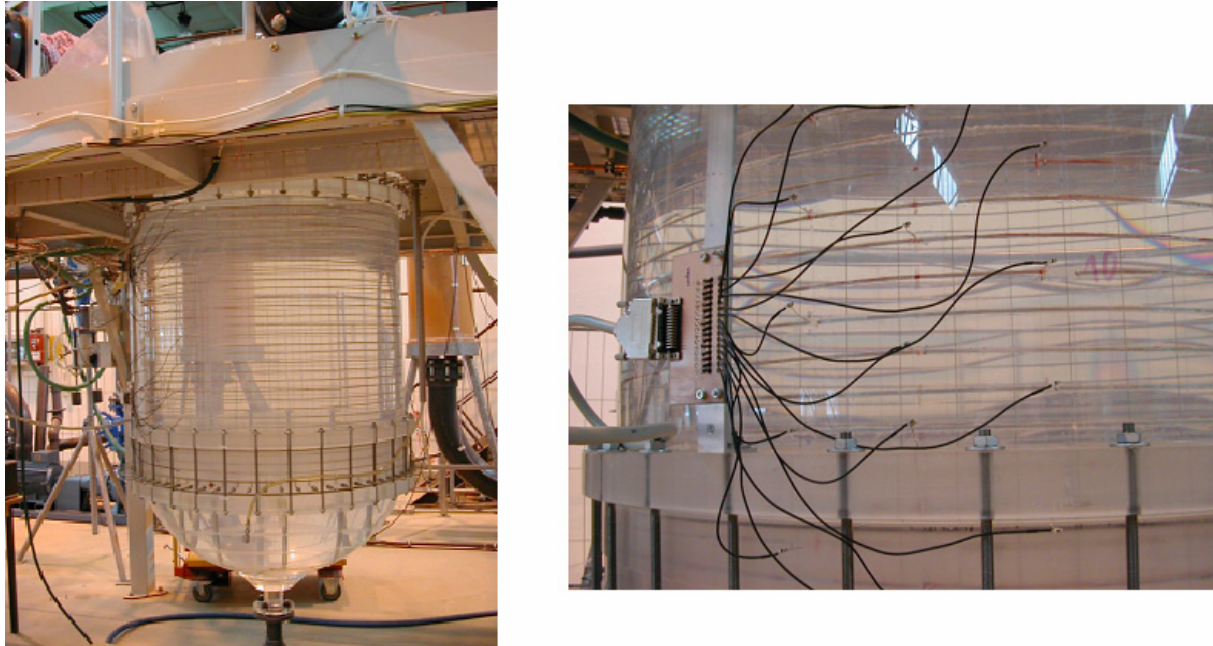
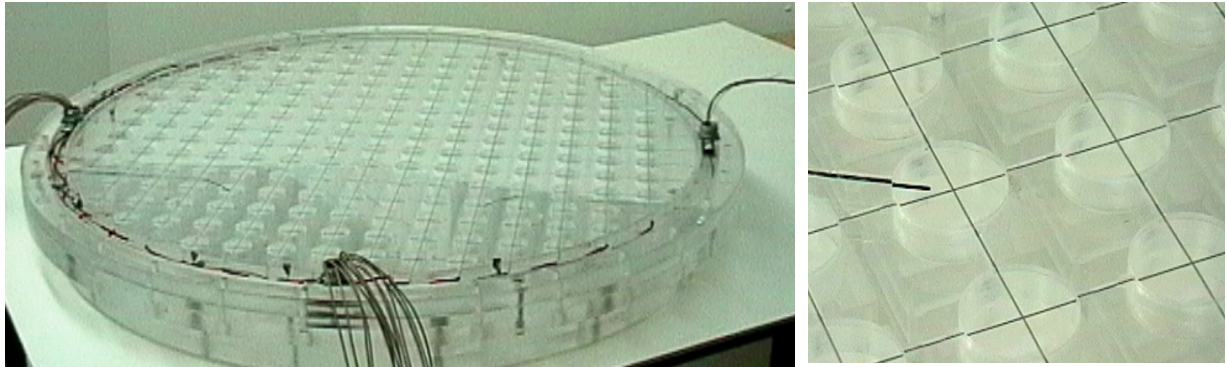


Abb. 2.8 Ansicht der Versuchsanlage mit dem axialen Gittersensor im Downcomer

Gittersensor am Kerneintritt

Der Gittersensor für den Kerneintritt ist in die Kerneintrittsplatte integriert (Abb. 2.9). Der DWR Konvoi verfügt über insgesamt 193 Brennelemente, die in einer quadratischen Matrix von 15 x 15 Positionen angeordnet sind. In den Ecken der Matrix sind Positionen freigelassen, um den Reaktorkern der Zylindergestalt möglichst weit anzunähern. Die Kerntirageplatte verfügt je Brennelement über eine kreisförmige Öffnung, durch die das Kühlmittel in das Brennelement gelangen kann. Die Platte wurde aus Plexiglas maßstabsgetreu nachgebildet, wobei die Sender- und Empfängerdrähte derart in der Konstruktion angeordnet wurden, dass der Kreuzungspunkt zweier Elektroden sich jeweils genau im Zentrum dieser Öffnungen befindet. Der Sensor hat insgesamt 15 Sender- und 15 Empfängerelektroden, so dass von den zur Verfügung stehenden 16 x 16 Messpunkten je eine Zeile und eine Spalte ungenutzt bleiben. Abzüglich der ungenutzten Eckpositionen verfügt der Kerneintrittssensor über genau 193 Messpositionen. Für jedes Brennelement steht somit eine individuelle Leitfähigkeitsmessung zur Verfügung. Der Drahtdurchmesser der Elektroden beträgt 0.5 mm, der axiale Abstand 2.0 mm.



A) Gesamtansicht

B) Elektroden

Abb. 2.9 Kerneintrittsplatte mit integriertem Gittersensor

2.6.2 Weitere Instrumentierung von ROCOM

Die bei den Experimenten verwendete Messtechnik umfasst weiterhin:

- vier magneto-induktive Durchflussgeber in den vier Schleifen und vier Blendenmessungen für den Bereich kleiner Volumenströme, Messfrequenz 10 Hz, wahlweise anschließbar;
- Leitfähigkeitsmessgeräte für das Inhaltswasser der Versuchsanlage sowie für die Tracerlösung, einmaliges Ablesen vor Beginn des jeweiligen Experiments bei gleichmäßiger Leitfähigkeitsverteilung in der Versuchsanlage und im Dosiersystem;

Die Messwerte der Durchflussgeber und der Differenzdruckgeber der Blenden werden über AD-Einheiten und die oben beschriebene serielle Schnittstelle dem Rechner zur Pumpensteuerung zugeführt und von diesem aufgezeichnet. Für die Gittersensoren ist ein eigener Datenerfassungs-PC zuständig.

3 Kühlmittelvermischung im RDB auf Basis des Versuchs PKL III E2.3 (Szenario: „heiß/heiß“)

3.1 Einleitung

An der Versuchsanlage PKL wurde ein Experiment zur inhärenten Borverdünnung bei kleinem heißseitigen Leck im Primärkreislauf mit heißseitiger Sicherheitseinseinspeisung durchgeführt. Spezielle Einstellungen in Verbindung mit konservativen Annahmen wurden gewählt, um die Möglichkeit der Produktion und Akkumulation minderborierten Kühlmittels in den unbespeisten Schleifen bei bestehendem Naturumlauf in den bespeisten Schleifen zu erhalten und zu untersuchen.

Im Auftrag der VGB wurden auf Basis dieses PKL-Versuchs Experimente zur Kühlmittelvermischung im RDB an der Versuchsanlage ROCOM durchgeführt. Diese sind ausführlich in (Kliem, 2004) dokumentiert. In der vorliegenden Arbeit werden die Ergebnisse eines Experiments vorgestellt.

3.2 Relevante Ergebnisse des Versuchs PKL III E2.3

Die wesentlichen Ergebnisse des Versuchs können wie folgt zusammengefasst werden (Mull, 2003):

- Es konnte ein Systemverhalten derart eingestellt werden, dass der Naturumlauf in den mit Notkühlwasser bespeisten Schleifen während der gesamten Transiente erhalten blieb.
- Der Notkühlwasserstrom wird dabei in Richtung des Naturumlafs (in Richtung Dampferzeuger) umgelenkt.
- In den beiden nicht bespeisten Schleifen reißt der Naturumlauf bei Inventarabsenkung ab und es kommt zur Wärmeabfuhr im Reflux-Condenser Betrieb.
- Bei Wiederauffüllen des Primärkreislaufes setzt der Naturumlauf in den beiden nicht bespeisten Schleifen zeitlich versetzt wieder ein.
- Die in diesen Schleifen akkumulierten Kondensatmengen werden in Richtung RDB transportiert.
- Die maximal mögliche akkumulierte Kondensatmenge bleibt auf das Volumen des Pumpenbogens beschränkt.
- Die Anfangsposition der Kondensatpfropfen bei Start des Naturumlafes ist der Austritt aus dem Pumpenbogen.
- Innerhalb der Pfropfen herrscht eine inhomogene Verteilung der Borkonzentration zwischen 50 und 400 ppm vor, wobei die geringste Konzentration am Ende des Pfropfen (bezogen auf den Reaktoreintritt) gemessen wurde.

Abb. 3.1 zeigt die während des Versuchs PKL III E2.3 gemessenen Massenströme nach der Umrechnung auf Reaktorbedingungen. Die Werte wurden auf den Nominalmassenstrom normiert. Der Zeitpunkt $t = 0$ s wurde auf den Startzeitpunkt des Naturumlafs in Schleife 2 gesetzt.

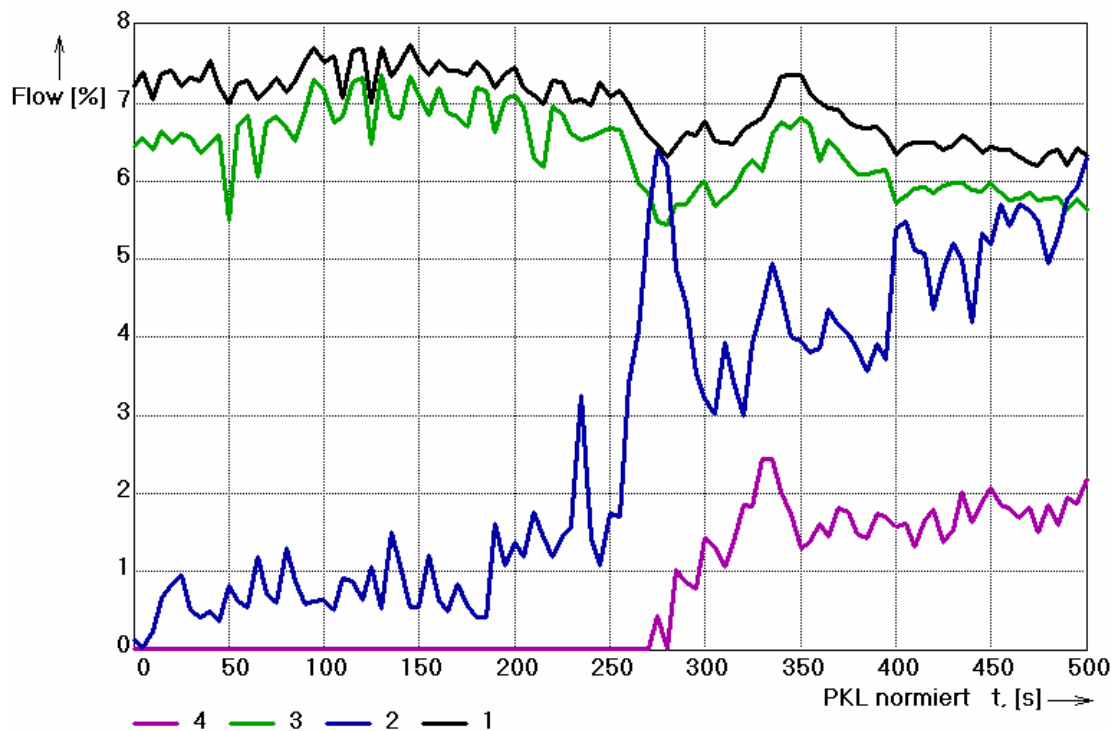


Abb. 3.1 Gemessene Schleifenmassenströme im Versuch PKL III E2.3 (auf Originalreaktor und Nominalbedingungen normiert)

3.3 Randbedingungen für die Versuche an der Versuchsanlage ROCOM

Aufgabe für ein entsprechendes Experiment an der Anlage ROCOM war, wie oben beschrieben, die Untersuchung der Vermischung der deborierten Pfropfen innerhalb des RDB. Dazu waren die Ergebnisse des oben beschriebenen Versuchs PKL III E2.3 adäquat umzusetzen. Die folgenden Punkte sind dabei für die Vermischung im RDB von entscheidender Bedeutung:

- Zeitabhängige Volumenströme in den vier Schleifen
- Anfängliches Pfropfenvolumen
- Anfangsentfernung der Pfropfen vom Eintritt in den RDB

Zu allen drei Punkten wurden durch den PKL-Versuch eindeutige Aussagen geliefert:

Die gemessenen Massenströme wurden auf den Originalreaktor umgerechnet und dann mit dem Skalierungsfaktor zwischen Originalreaktor und ROCOM (1:125, siehe Abschnitt 2) auf die Versuchsanlage übertragen. Das anfängliche Pfropfenvolumen von 7.2 m^3 (bzw. 57.6 l) in einer Schleife entspricht dem Volumen des Pumpenbogens und eines Teils der Dampferzeugeraustrittskammer, der aus Konservativitätsgründen hinzugenommen wurde. Der Austritt aus dem Pumpenbogen ist 9.00 m vom Eintritt in den RDB entfernt. Das ergibt für ROCOM eine Entfernung von 1.80 m .

Für die Versuche an ROCOM wurde angenommen, dass sich die Pfropfen in zwei benachbarten Schleifen befinden. Weiterhin wurde unterstellt, dass die Borkonzentration in den Pfropfen konstant ist, d.h. die bei PKL beobachteten Konzentrationsprofile innerhalb der Pfropfen wurden durch den kleinsten beobachteten Wert ersetzt. Damit sind die ROCOM-Versuche auch hinsichtlich dieser Randbedingung konservativ. Der Wert selbst ist für die Versuche unerheblich, da experimentell maß-

einheitenlose Vermischungsskalare erhalten werden, die im Nachgang zu den Experimenten unter Verwendung von Gl. 2.4 in Borkonzentrationen umgerechnet wurden.

Der Versuch PKL III E2.3 hat klar gezeigt, dass der Naturumlauf in den beiden unbespeisten Schleifen zeitlich versetzt startet. Trotzdem wurden für das hier vorgestellte ROCOM-Experiment folgende Annahmen getroffen:

1. Postulat: Gleichzeitiges Anlaufen des Naturumlaufs in den zwei unbespeisten Schleifen
2. Postulat: Gleichzeitiger Pfropfeneintritt in den RDB

Weiterhin wurden die im PKL-Versuch gemessenen Temperaturunterschiede zwischen Pfropfen und RDB-Inventar aus konservativen Gründen vernachlässigt.

Die beiden während des PKL-Versuchs durchlaufenden Schleifen (1 und 3) zeigen einen nahezu identischen Zeitverlauf, sie unterscheiden sich nur durch einen geringen Versatz im absoluten Wert. Für das ROCOM-Experiment wurden die zeitabhängigen Volumenstromkurven in den Schleifen 3 und 4 durch einen konstanten Wert von 7.3 % des Nominalwertes ersetzt, da der Einfluss der geringen Variationen im Volumenstrom als vernachlässigbar eingeschätzt wird.

Aus den während des PKL-Versuchs in den anlaufenden Schleifen gemessenen Massenstromkurven wurden Stützstellen abgeleitet, die nach Umrechnung auf ROCOM-Bedingungen als Zielfunktion der Frequenzsteuerung der einzelnen Pumpen eingegeben wurden. Abb. 3.2 zeigt die an der ROCOM-Anlage aufgezeichneten Volumenströme in den einzelnen Schleifen. Es ist deutlich zu sehen, dass die PKL-Vorgaben mit hoher Genauigkeit umgesetzt wurden.

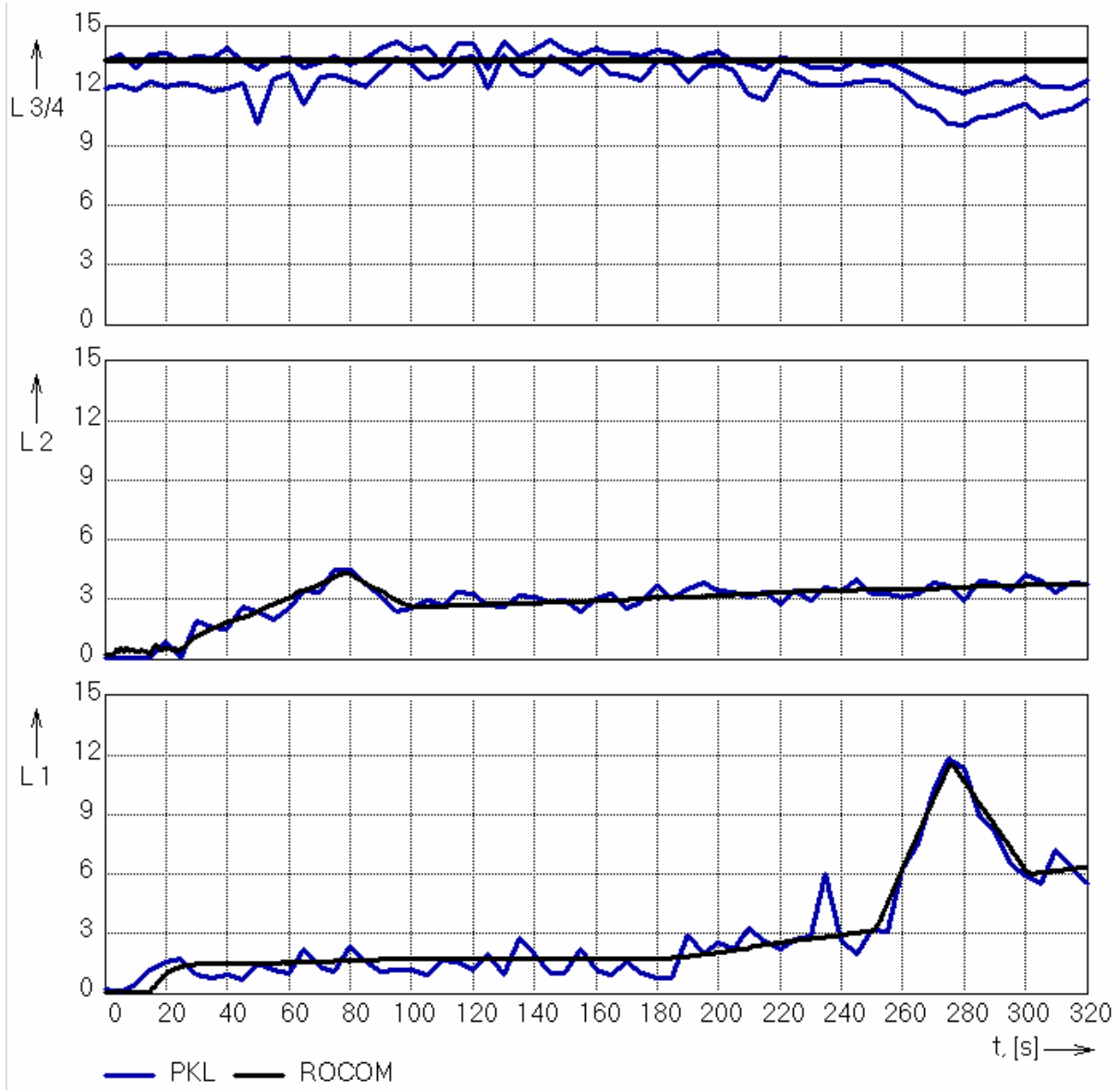


Abb. 3.2 Gemessener Volumenstrom in m^3/h in den Schleifen an der ROCOM-Anlage im Vergleich zu den PKL-Messungen (umgerechnet)

3.4 Vermischung im Ringraum und unterem Plenum der Versuchsanlage

Im hier beschriebenen Experiment waren Sensoren in den Eintrittsstutzen der zwei anlaufenden Schleifen installiert. Im Downcomer waren die beiden radialen Sensoren installiert und die Tracerkonzentration in der Kerneintrittsebene wurde mit dem dort installierten Sensor gemessen.

Abb. 3.3 zeigt den Zeitverlauf der mittleren und der minimalen Borkonzentration in den Sensorebenen am RDB-Eintritt. Deutlich ist zu erkennen, dass die Deborierungsfront in beiden Schleifen gleichzeitig die Sensorebene erreicht. Die minimale Borkonzentration fällt bis auf 50 ppm ab. Auf Grund der höheren Kühlmittelgeschwindigkeit verlässt das deborierte Kühlmittel in Schleife 2 schneller die Sensorebene. In Schleife 1 geht die Borkonzentration deutlich später auf den Ausgangswert von 2500 ppm zurück.

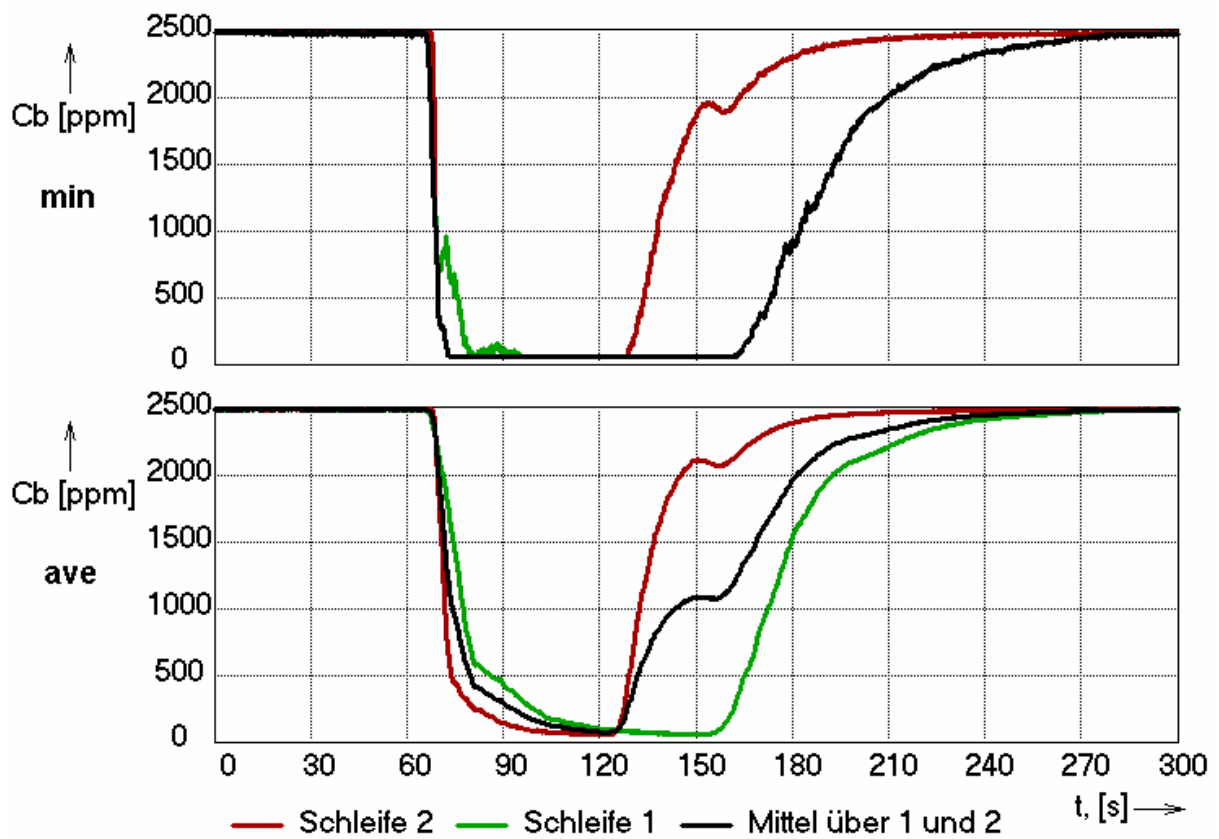


Abb. 3.3 Zeitverlauf der mittleren und minimalen Borkonzentration an den Sensoren im kalten Strang



Abb. 3.4 Zeitverlauf der mittleren und minimalen Borkonzentration an den Sensoren im Downcomer

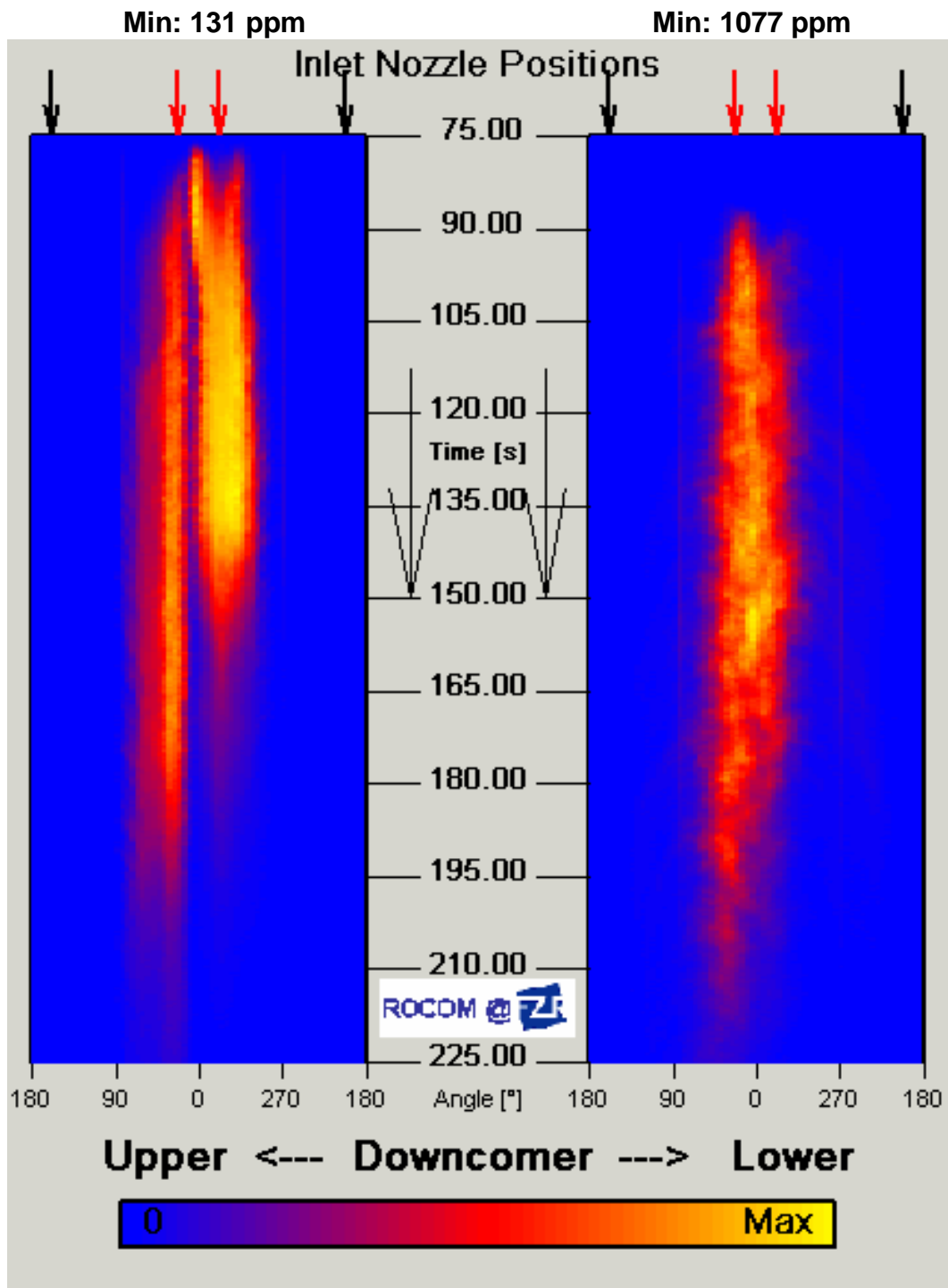


Abb. 3.5 Zeitverlauf der Borkonzentration an den beiden Sensoren im Downcomer (rote Pfeile: Winkelposition der Schleifen mit Pfropfen)

Die obere Sensorebene im Downcomer befindet sich wenige cm unterhalb der Stutzebene. Das minderborierte Kühlmittel erreicht diese Sensorebene 9 s nach der Sensorebene im kalten Strang. Wie aus Abb. 3.4 zu erkennen ist, fällt der Minimalwert der Borkonzentration bis auf 131 ppm, die Störung erreicht damit nicht mehr den Ausgangswert. Der Mittelwert der Borkonzentration erreicht in dieser Sensorebene einen Minimalwert von 1900 ppm. Dieser hohe Wert hängt damit zusammen, dass große Teile des Strömungsquerschnittes durch die beiden nicht mit der Störung beaufschlagten Schleifen 3 und 4 eingenommen werden. Dies wird besonders auf Abb.

3.5 deutlich, die den Zeitverlauf der Störung an beiden Sensoren im Downcomer zeigt. Dargestellt ist der abgewinkelte Downcomer, die Winkelpositionen der vier Schleifen sind eingezeichnet. Unterhalb von Schleife 2 (-22.5°) tritt der deborierte Pfropfen zuerst ein, im weiteren Zeitverlauf nimmt er auch eine größere Fläche ein. Dies hängt mit der höheren Geschwindigkeit in dieser Schleife zusammen. Der Pfropfen aus Schleife 1 ($+22.5^\circ$) ist noch deutlich separiert vom anderen Pfropfen. Auf Grund der geringeren Geschwindigkeit ist die Durchlaufzeit auch hier länger. In der unteren Sensorebene haben sich beide Pfropfen vereinigt, die Strömungsverhältnisse im Downcomer sind dafür verantwortlich. Auf dem Weg durch den Downcomer hat ein deutlicher Abbau der Störung stattgefunden, die minimale Borkonzentration erreicht nur noch einen Wert von 1077 ppm.

Ein weiterer Abbau der Störung erfolgt auf dem Weg durch das untere Plenum. In der Kerneintrittsebene wird ein Minimalwert von 1239 ppm erreicht. Dieser Wert wird 160 s nach Start der Transiente erreicht (Abb. 3.6). Das sind noch 51.4 % der anfänglichen Störung. Der Wert wird für kurze Zeit an einer einzelnen Brennelementposition im Außenbereich des Kerns gemessen.

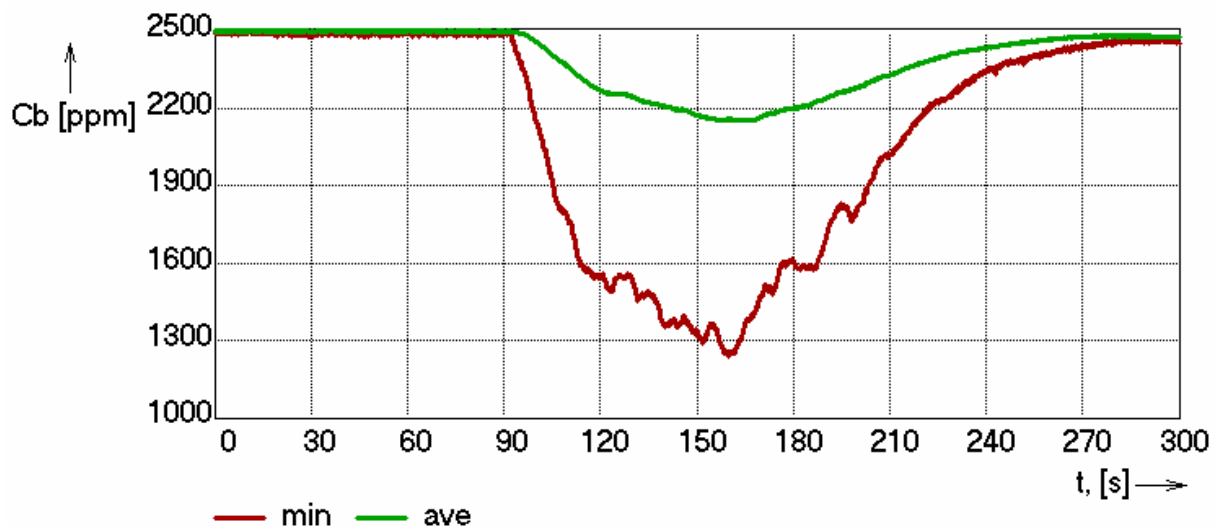


Abb. 3.6 Zeitverlauf der mittleren und minimalen Borkonzentration am Sensor in der Kerneintrittsebene

Die zeitabhängige Verteilung der Borkonzentration in der Kerneintrittsebene ist in Form von Höhenlinien in Abb. 3.7 dargestellt. Das minderborierte Kühlmittel erreicht die Kerneintrittsebene genau unterhalb der beiden mit den Pfropfen beaufschlagten Schleifen. Mit fortschreitender Zeit füllt sich der Bereich unterhalb dieser Schleifen mit minderboriertem Kühlmittel. Die räumliche Verteilung der Borkonzentration ist dabei sehr heterogen. Zum Zeitpunkt des Auftretens der minimalen Borkonzentration ($t = 160$ s) wird eine Absenkung der Borkonzentration auf 1400 ppm nur an sechs Brennelementen in der Umgebung des Minimums angezeigt. Die mittlere Borkonzentration in der Kerneintrittsebene beträgt zu diesem Zeitpunkt 2156 ppm (86.2 % des Anfangswertes).

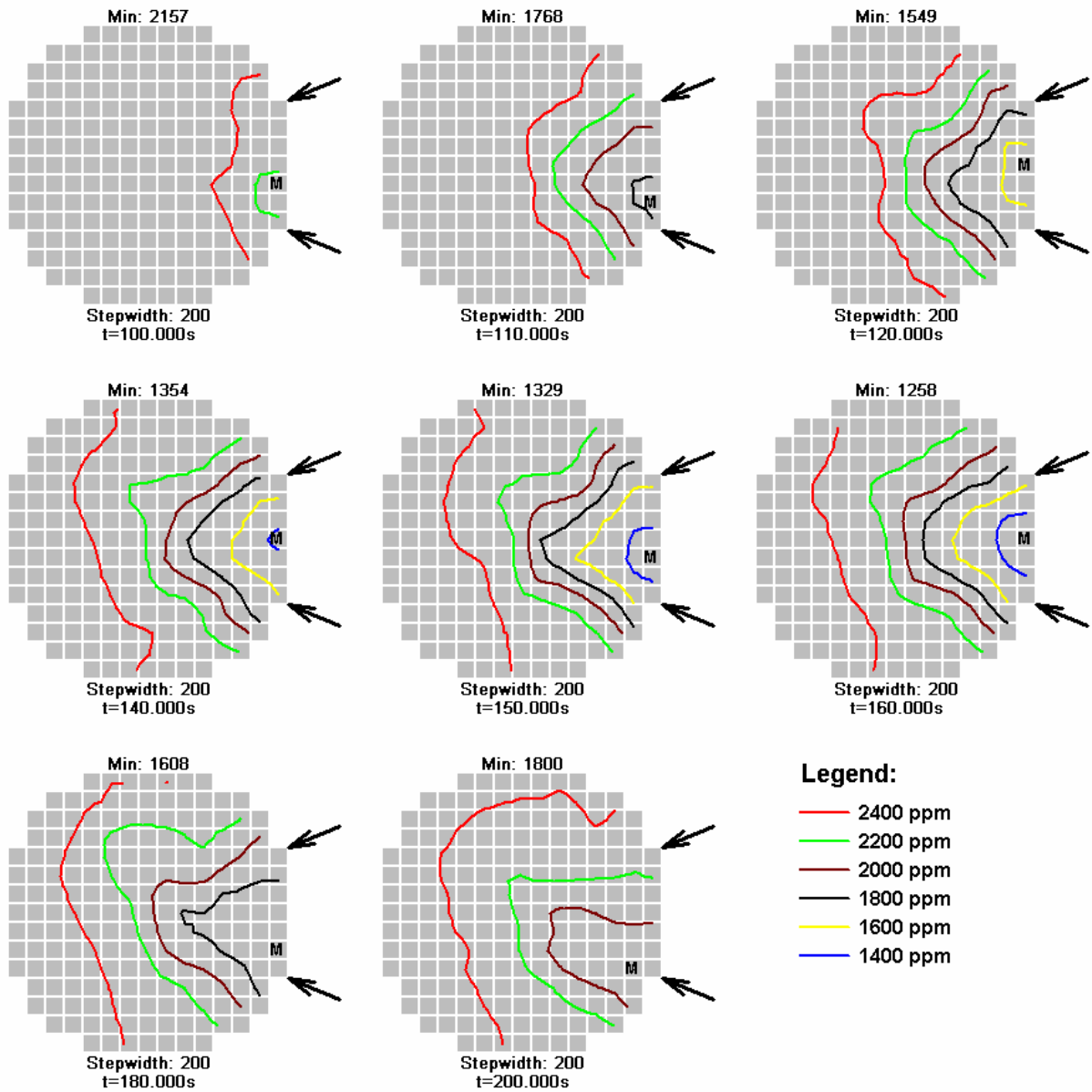


Abb. 3.7 Zeitsequenzen der Borkonzentration in der Kerneintrittsebene „M“ im Brennelementspiegel: Brennelement-Position der minimalen Borkonzentration; Minimalwert in ppm; Pfeile: Winkelposition der Schleifen mit Pfropfen

4 Kühlmittelvermischung im RDB auf Basis des Versuchs PKL III E2.2 (Szenario: „kalt/kalt“)

4.1 Einleitung

In zwei der an der Versuchsanlage PKL durchgeführten Versuche zur inhärenten Borverdünnung bei kleinem Leck im Primärkreislauf (PKL III E2.2; PKL III F1.4) wurden konservativ abdeckende Szenarien hinsichtlich der Borverdünnung für DWR-Anlagen mit kaltseitiger Sicherheitseinseinspeisung untersucht. Das betrifft die Anlagen Biblis A/B, KKW und GKN1.

Es sollten Aussagen über

- Ansammlung von Kondensat während der Reflux-Condenser Phase
- Verlagerung von minderboriertem Kühlmittel in Richtung RDB-Eintritt
- Vermischung von unterschiedlich boriertem Kühlmittel vor und nach Einsetzen des Naturumlaufs bis vor den Eintritt in den RDB
- Art und Intensität des wieder einsetzenden Naturumlaufs

erhalten werden.

Beide Versuche behandeln zwar dasselbe Szenario, weisen aber in den konkreten Randbedingungen Unterschiede auf.

Im Auftrag der VGB wurden auf Basis beider PKL-Versuche Experimente zur Kühlmittelvermischung im RDB an der Versuchsanlage ROCOM durchgeführt. Diese sind ausführlich in (Kliem, 2005) dokumentiert. In der vorliegenden Arbeit werden die Ergebnisse, die auf Basis der Randbedingungen aus PKL III E2.2 erhalten wurden, vorgestellt. Unter Verwendung der genannten PKL-Randbedingungen war eine Rechnung mit dem Strömungsberechnungsprogramm PHOENICS durchgeführt worden. Der hier vorgestellte ROCOM-Versuch dient der Validierung der durch PHOENICS berechneten Vermischung im RDB.

Wie in Abschnitt 2 ausgeführt, bildet die Versuchsanlage ROCOM einen Reaktor vom Typ KONVOI nach. Alle oben genannten Anlagen mit kaltseitiger Sicherheitseinseinspeisung besitzen einen Schemel (keine Siebtonne) im unteren Plenum und Biblis A/B und KKW haben gegenüber KONVOI/VorKONVOI ein deutlich größeres unteres Plenum. Auf Basis von Unterlagen für das KKW Biblis wurden Veränderungen an der Versuchsanlage ROCOM vorgenommen, um die für die Vermischung relevanten Unterschiede zu berücksichtigen. Neben der schon erwähnten Vergrößerung des unteren Plenums betraf das vor allem die Fertigung und den Einbau eines Schemels (Abb. 4.1).

Der in Abschnitt 2 beschriebene axiale Gittersensor für den Downcomer wurde speziell im Hinblick auf die „kalt/kalt“-Experimente entwickelt und hier erstmals eingesetzt.

Im Folgenden werden kurz die Ergebnisse des PKL-Versuchs zusammengefasst, danach wird ausführlich auf die Übertragung der Randbedingungen auf die ROCOM-Anlage eingegangen, ehe die Ergebnisse des Experiments präsentiert werden.



Abb. 4.1 Schemel für das untere Plenum der Versuchsanlage ROCOM

4.2 Relevante Ergebnisse des Versuchs PKL III E2.2

Die wesentlichen Ergebnisse des Versuchs können wie folgt zusammengefasst werden (Mull, 2003):

- Die akkumulierte Kondensatmenge (=Pfropfenvolumen) ist immer kleiner als die produzierte Kondensatmenge und damit erheblich kleiner als die in früheren Analysen unterstellten Mengen. Sie bleibt auf das Volumen des Pumpenbogens und eines Teils der DE-Austrittskammer beschränkt.
- Es gibt einen Anstieg der Borkonzentration im Pfropfen in Folge von Wassermittress auf der heißen Seite und Übertrag auf die kalte DE-Seite.
- Es erfolgt ein weiterer Anstieg der Borkonzentration auf dem Weg zum RDB durch Beimischung von Notkühlwasser.
- Der einphasige Naturumlauf beginnt in den verschiedenen Loops zu unterschiedlichen Zeiten, zuerst in den unbespeisten Loops. Beim Start des Naturumlaufs in den unbespeisten Loops gibt es darüberhinaus einen Zeitversatz von rd. 160 s, beide Loops starten mit deutlich unterschiedlichen Rampen (Abb. 4.2).
- Die Anfangsposition der Kondensatpfropfen bei Start des Naturumlaufs ist der Austritt aus dem Pumpenbogen.

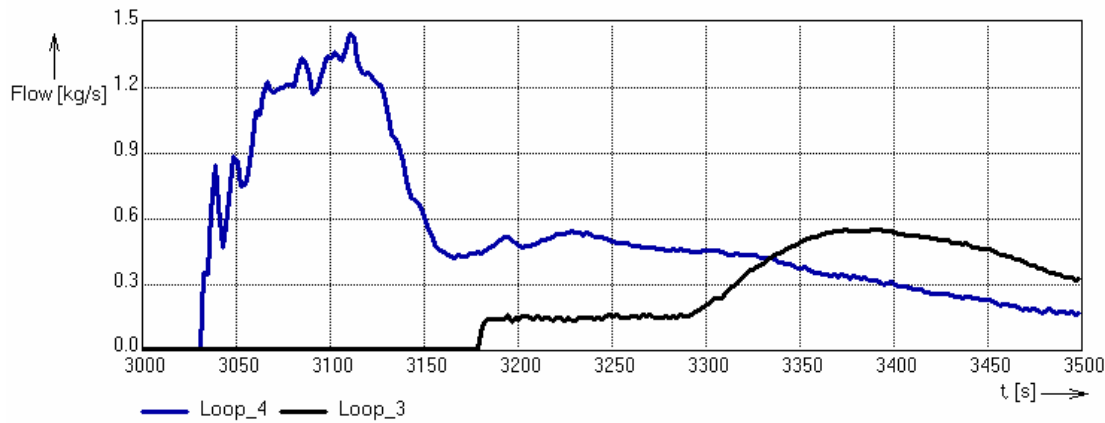


Abb. 4.2 Massenströme in den anlaufenden Schleifen im Experiment PKL III E2.2

4.3 Übertragung auf ROCOM-Bedingungen

Die Versuchsanlage ROCOM ist eine gegenüber dem Originalreaktor im Maßstab 1:5 linear verkleinerte Anlage. Um die Ergebnisse der ROCOM-Experimente auf den Originalreaktor übertragen zu können, war eine Skalierung zu wählen, die gewährleistet, dass die für die Vermischung wichtigen Phänomene in adäquater Art und Weise abgebildet werden. Bei den vorliegenden Experimenten sind dies

- das Aufsichten der minderborierten Pfropfen auf das zuvor im Downcomer befindliche Kühlmittel
- das Herausbilden der Mischwassersträhne in der bespeisten Schleife von der Einspeisestelle des Notkühlwassers bis zum Eintritt in den RDB
- das Vordringen der Strähne in den Downcomer bei Vorliegen von Dichtedifferenzen (nach Verlagerung der minderborierten Pfropfen aus den Schleifen in den Downcomer)

Das oben beschriebene Experiment (Abschnitt 3) wurde bei isothermen Bedingungen durchgeführt. Im vorliegenden Fall spielen bei den genannten Phänomenen die Dichteunterschiede eine entscheidende Rolle für die Vermischung. Die Froude-Zahl ist die Ähnlichkeitskennzahl, die bei Vorliegen von Dichtedifferenzen die Art der Strömung charakterisiert. Sie ist folgendermaßen definiert:

$$Fr = \sqrt{\frac{\rho \cdot v^2}{\Delta\rho \cdot g \cdot L}} \quad (\text{Gl. 4.1})$$

Sie stellt das Verhältnis zwischen den Trägheitskräften (im Zähler) und dem Einfluss der Schwerkraft (im Nenner) dar. In strömenden Medien wird die Trägheit durch die Dichte, der Einfluss der Gravitation jedoch durch den Dichteunterschied charakterisiert. Deshalb ist der Quotient $\Delta\rho/\rho$ - mithin der relative Dichteunterschied - bestimmend.

Im Rahmen früherer Arbeiten (Grunwald, 2003a) war nachgewiesen worden, dass sich bei Veränderung der Randbedingungen unter Einhaltung der Froude-Zahl gleiche Vermischungsbilder ergeben. Eine generische Experimentalserie zur Vermi-

schung von Notkühlwasser bei Veränderung von Dichteunterschied und Strömungsgeschwindigkeit ergab das gleiche Ergebnis (Grunwald, 2003).

Somit kommt bei den Experimenten der Einhaltung der Froude-Zahl erste Priorität zu. Die für Reaktorbedingungen bestimmte Froude-Zahl kann an der Versuchsanlage auf zwei unterschiedliche Arten eingehalten werden:

- Die Geschwindigkeit wird zur Beibehaltung eines Zeitmaßstabs von 1:1 entsprechend dem Längenmaßstab mit 1:5 skaliert und die Dichtedifferenz wird ebenfalls um den Faktor 1:5 verkleinert.
- Die Dichtedifferenz wird beibehalten bei gleichzeitiger Verringerung der für Reaktorbedingungen bestimmten Geschwindigkeit um den Faktor $\sqrt{5}$.

Für die aktuellen ROCOM-Experimente wurde die zweite Skalierungsmöglichkeit angewandt: Bei gleicher Dichte wird die Geschwindigkeit um den Faktor $\sqrt{5}$ reduziert. Das bedeutet, dass die Strähne um den Faktor 5 weniger tief vordringt als im Originalreaktor, was genau dem geometrischen Maßstabsverhältnis beider Anlagen entspricht. Damit ist bei Einhaltung der Froude-Zahl das Konzentrations-, das Geschwindigkeits- und das Dichtefeld zu jedem Zeitpunkt ähnlich im Sinne der Ähnlichkeitstheorie und die an ROCOM ermittelten Daten können direkt auf die Originalanlage übertragen werden.

Dass das Verhältnis der Penetrationstiefen der geometrischen Skalierung zwischen ROCOM und Originalanlage entspricht, wurde unabhängig überprüft (Hertlein, 2003). Unter Verwendung von auf Basis von UPTF-Experimenten entwickelten Modellen (Hertlein, 2003a) wurde außerdem der Nachweis geführt, dass sich unter den genannten Bedingungen die Mischwassersträhne in der bespeisten Schleife an der ROCOM-Anlage in identischer Weise herausbildet.

Bei der gewählten Skalierung laufen die Vermischungsprozesse in der Versuchsanlage schneller als im Originalreaktor ab. Für die Übertragbarkeit der Experimentalergebnisse ist die Strouhal-Zahl einzuhalten. Die Strouhal-Zahl ist die Ähnlichkeitskennzahl, die die Instationarität einer Strömung charakterisiert. Sie beschreibt das Verhältnis der Kräfte, die auf Grund der lokalen Beschleunigung $\frac{dv}{dt}$ (zeitliche Geschwindigkeitsänderung an einem bestimmten Punkt) und der konvektiven Beschleunigung $v \cdot \frac{dv}{ds}$ (Geschwindigkeitsänderung infolge der Ortsveränderung) auf ein Fluidelement in der Strömung wirken:

$$Sr = \frac{\frac{dv}{dt}}{v \cdot \frac{dv}{ds}} \quad (\text{Gl. 4.2})$$

Die Strouhal-Zahl kann folgendermaßen umgeschrieben werden:

$$Sr = \frac{L}{v \cdot \tau} \quad (\text{Gl. 4.3})$$

L ist hier die charakteristische Länge, v die Geschwindigkeit und τ die Zeit. Die charakteristische Länge beträgt an der ROCOM-Anlage 1/5 des entsprechenden Wertes der Originalanlage. Wie oben beschrieben, wird die Geschwindigkeit der Originalanlage um den Faktor $\sqrt{5}$ reduziert. Unter diesen Bedingungen wird die Einhaltung der Strouhal-Zahl durch Skalierung der Zeitachse mit dem Faktor $\sqrt{5}$ gewährleistet. Bei Prozessen mit zeitlich veränderlicher Geschwindigkeit, wie sie im Fall des einsetzenden Naturumlaufs vorliegen, bezieht sich die Skalierung der Zeitachse auf die Dauer der Rampe. Dadurch wird die Ähnlichkeit der Prozesse eingehalten. Diese Art der Skalierung wurde im Rahmen der experimentellen Arbeiten zum Auftrag SA: „AT“ 33/03 (Kliem, 2004) ausführlich validiert.

4.4 Randbedingungen für den Versuch an der Versuchsanlage ROCOM

Die minderborierten Pfropfen befinden sich in den Schleifen 1 und 2, in Schleife 3 wird über einen maßstabsgetreuen Stutzen das Notkühlwasser eingespeist. Schleife 4 ist im Experiment inaktiv und abgesperrt, das sich dort befindliche Leck wird nicht modelliert. Die Pfropfen werden mit geringer Geschwindigkeit zum RDB transportiert. Dann startet die Rampe in den beiden Schleifen mit den Pfropfen. Für das Experiment werden unterschiedliche Rampen in den Schleifen 1 und 2 vorgegeben, sie entsprechen den im Versuch PKL III E2.2 gemessenen Kurven, wurden aber zur konservativen Abdeckung des DWR-Anlaufszenarios zeitlich so angepasst, dass die Rampen gleichzeitig starten.

Der Massenstrom der aktiven Notkühlein speisung (Schleife 3) entspricht den in den PKL-Versuchen gemessenen Werten.

Im ROCOM-Experiment werden die Dichten entsprechend den in PKL gemessenen Temperaturen eingestellt. Im Downcomer gibt es kein axiales Dichteprofil, der Downcomer wird von unten bis zur Mitte der Kaltstränge mit dem Medium der vorgegebenen Dichte gefüllt. Zur Erhöhung der Dichte wird dem Wasser der Versuchsanlage Zucker zugesetzt.

Die Pfropfen zwischen den Schiebern haben im Anfangszustand eine Borkonzentration von 50 ppm. Dies entspricht dem im PKL-Versuch im Pumpenbogen gemessenen Minimalwert. Die Borkonzentration im RDB und in der Notkühlein speisung wird mit 2500 ppm festgelegt. Diese Werte werden verwendet, um die dimensionslosen Vermischungsskalare nach Gl. 2.4 in Borkonzentrationen umzurechnen. Bei der Umrechnung wird der Einfluss der erhöhten Viskosität auf die Leitfähigkeit berücksichtigt.

Die Randbedingungen für den Versuch sind in Tab. 4.1 zusammengefasst.

Tab. 4.1 Randbedingungen für das ROCOM-Experiment

Position	Temperatur [°C]	Dichte [kg/m ³]	Normierte Dichte [-]	Borgehalt
Pfropfen im Pumpenbogen	170	897.3	0.995	50
Heißer Strang/ DE	170	897.3	1.000	2500
RDB	70	978.0	1.090	2500
Notkühlwasser	35	994.5	1.108	2500

(P=1.00 MPa)

4.5 Einstellung der Versuchsbedingungen vor Beginn der Experimente

Vor dem Experiment wurden die Randbedingungen nach folgender Prozedur eingestellt. Die Versuchsanlage wird vollständig mit deionisiertem Wasser gefüllt. In zwei externen Behältern (Notkühlwasser und RDB-Wasser) wird durch Zugabe von Zucker die Dichte auf das erforderliche Niveau (siehe Tab. 4.1) erhöht. Beide Behälter sind mit einer internen Zirkulation ausgestattet um den Zucker gleichmäßig zu verteilen. In der Versuchsanlage werden die Schieber für die Pfropfenvorlage geschlossen und eine Zirkulation mit dem Vorlagebehälter für die Pfropfen in Gang gesetzt. In diesem Vorlagebehälter wird die für die Experimente benötigte Dichteabsenkung durch Zugabe von Alkohol realisiert. Gleichzeitig wird der Salztracer zur Markierung der Pfropfen zugesetzt. Die Zirkulation zwischen Vorlagebehälter und Volumen zwischen den Schiebern wird bis kurz vor Beginn des Experiments aufrechterhalten, um eine gleichmäßige Dichte- und Salztracerverteilung zu gewährleisten. Durch einen Stutzen am Boden des RDB wird mit sehr geringer Volumenstromrate das Wasser mit erhöhter Dichte aus dem RDB-Vorratsbehälter in den RDB eingebracht. Es verdrängt das im RDB befindliche Wasser nach oben. Dabei bildet sich eine deutlich sichtbare scharfe Trennschicht aus. Über einen Überlauf am Ausgleichsbehälter der Schleife 4 und Entlüftungsstutzen am RDB-Deckel wird das überschüssige Wasser in den Abwassertank abgeleitet. Der RDB wird bis in Höhe Mitte der kalten Stränge gefüllt. Dieser Vorgang dauert ungefähr 60 min. Bei dieser Art der Befüllung ist es unvermeidlich, dass Wasser höherer Dichte in den Reaktorkern eingebracht wird. Das stellt natürlich gegenüber den Bedingungen im Originalreaktor eine Abweichung dar. Dort befindet sich im Reaktorkern gesättigtes Wasser. Somit ist die hydrostatische Druck in der Versuchsanlage geringfügig größer. Da sich die Massenströme in den einzelnen Schleifen der Versuchsanlage nicht aufgrund von Dichtedifferenzen einstellen, sondern von außen aufgeprägt werden, hat dieser Unterschied in den Randbedingungen keinen Einfluss auf die Vermischungsprozesse im RDB.

4.6 Experimentelle Ergebnisse

4.6.1 Einleitung

Aus den in Abschnitt 4.2 beschriebenen hydraulischen Kurven wurden nach Umrechnung auf Reaktorbedingungen Stützstellen abgeleitet, die als Zielfunktion der Frequenzsteuerung der einzelnen Pumpen eingegeben wurden. Die Länge der Vorlauframpe wurde dabei so angepasst, dass die eigentliche Rampe startet, wenn die

Vorderfront des Pfropfens den Eintritt in den RDB erreicht. Es sei noch einmal darauf hingewiesen, dass der Startzeitpunkt des Naturumlaufs in beiden Schleifen, abweichend vom PKL-Ergebnis, in Übereinstimmung gebracht wurde, damit konservativ beide Pfropfen gleichzeitig in den RDB eintreten.

Wie oben beschrieben, wurden die ROCOM-Experimente mit einem Skalierungsfaktor von $\sqrt{5}$ zur Einhaltung der Froude-Zahl durchgeführt. Die in den folgenden Abschnitten dargestellten Abbildungen und alle Zeitangaben beziehen sich auf die Verhältnisse nach Rückrechnung auf die originale Zeitachse.

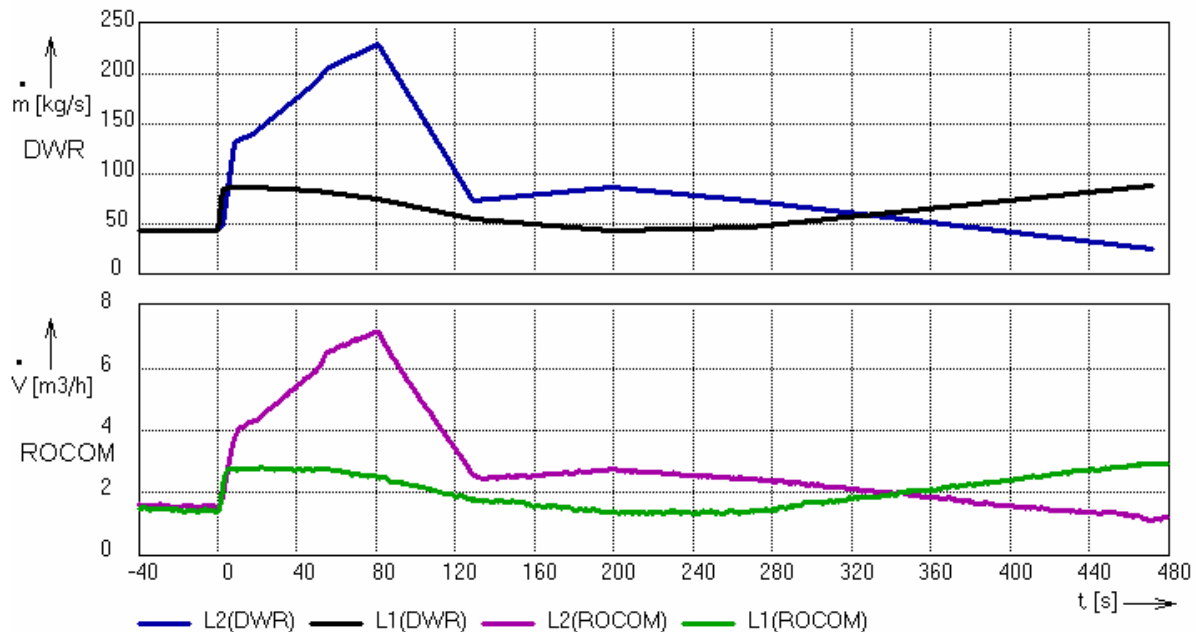


Abb. 4.3 Vergleich der Stützstellen (nach Hochrechnung auf Biblis/KKU-Werte) und der realisierten Volumenstromkurven für das ROCOM -Experiment

Tab. 4.2 Ablauf des ROCOM-Experiments

Zeit [s]	Aktion
-78	Start der Vorlauftrampe/Start der Aufzeichnung
-18	Start der Notkühleinseisung in Schleife 3
0	Start der Rampen in Schleife 1 und 2
500	Ende der Messung

4.6.2 Vermischung im kalten Strang der anlaufenden Schleifen

Nach Öffnung der Schieber in den Schleifen 1 und 2 werden die Pfropfen mit geringer Geschwindigkeit zum RDB transportiert. Während des Transports der Pfropfen in der Rohrleitung findet eine Separation der Pfropfen statt. Die leichteren Pfropfen (die Pfropfen haben eine um 0.5 % geringere Dichte) schichten sich auf das in der Rohrleitung befindliche Medium auf und erreichen die Sensorebene am Reaktoreintritt zuerst im oberen Bereich (Abb. 4.4). Dabei ist auch deutlich der Einfluss der sich kurz vor dem Sensor befindenden Krümmung der Rohrleitung zu sehen. Mit fortschreitender Zeit füllt sich die gesamte Sensorebene mit Tracer. Zum Zeitpunkt

$t = 0$ s beträgt der über den Rohrquerschnitt gemittelte Wert 50 % der Störung (Abb. 4.5). Zu diesem Zeitpunkt wird die Volumenstromrampe gestartet. Der in der Sensorebene gemessene Minimalwert wird mit 181 ppm ausgewiesen, das Minimum des Mittelwerts erreicht 353 ppm. Somit hat während des Transports durch die Rohrleitung ein geringer Abbau der Störung stattgefunden.

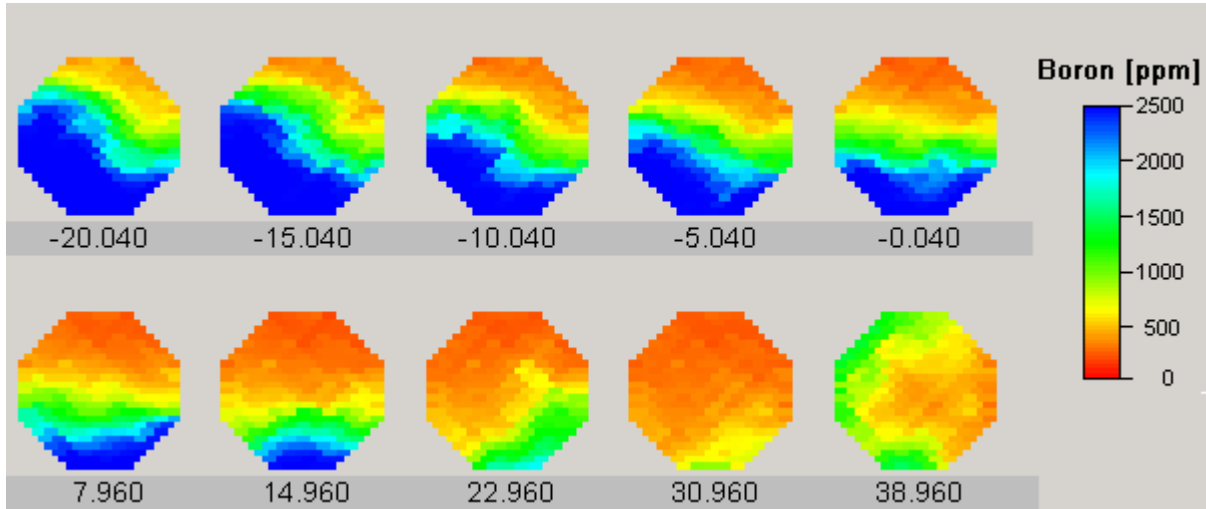


Abb. 4.4 Zeitabhängige Verteilungen der Borkonzentration im Eintrittsstutzen der Schleife 2 (Zeit in s)

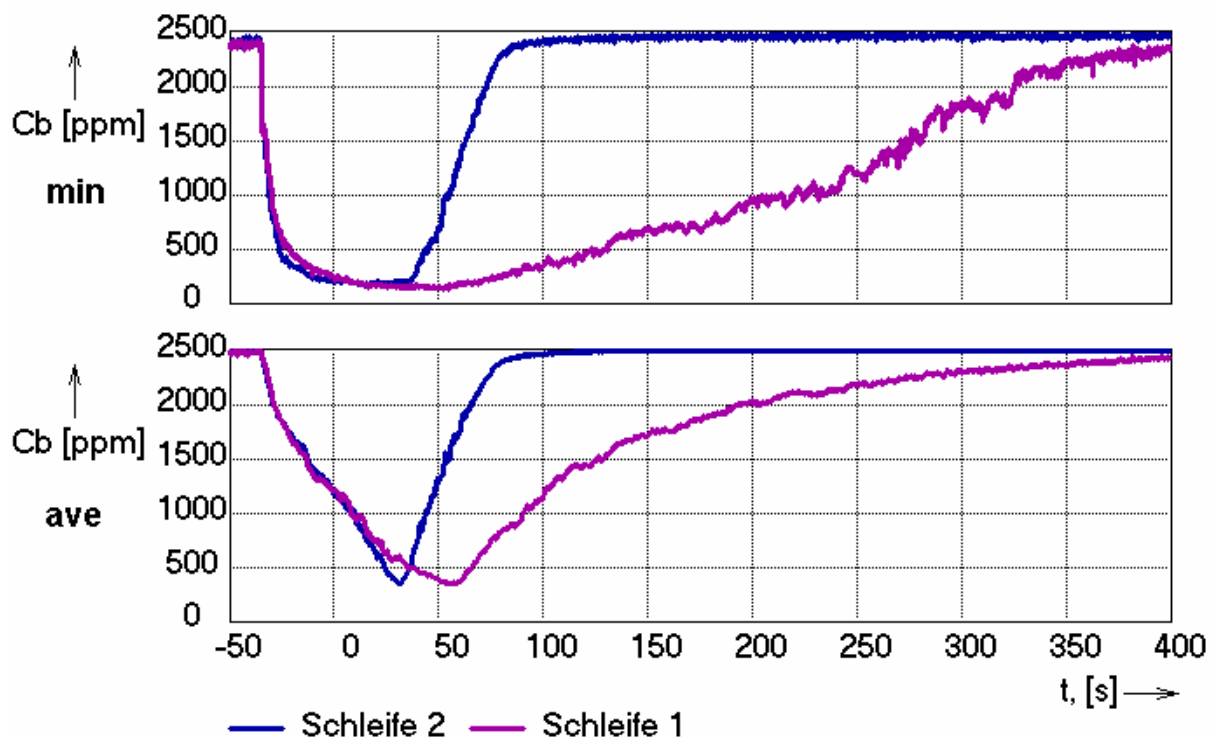


Abb. 4.5 Zeitverlauf der mittleren und minimalen Borkonzentration an den Sensoren im kalten Strang

Eine Separation findet auch im hinteren Bereich der Pfpfen statt, wie aus Abb. 4.6 geschlossen werden kann. Hier sind Zeitsequenzen des Sensors im Pfpfenbereich von Schleife 1 dargestellt. Bis zum Öffnen der Schieber ist die Konzentrationsverteilung gleichmäßig. Mit Beginn der Zirkulation beginnen auch die Separationsvorgänge an dieser Position.

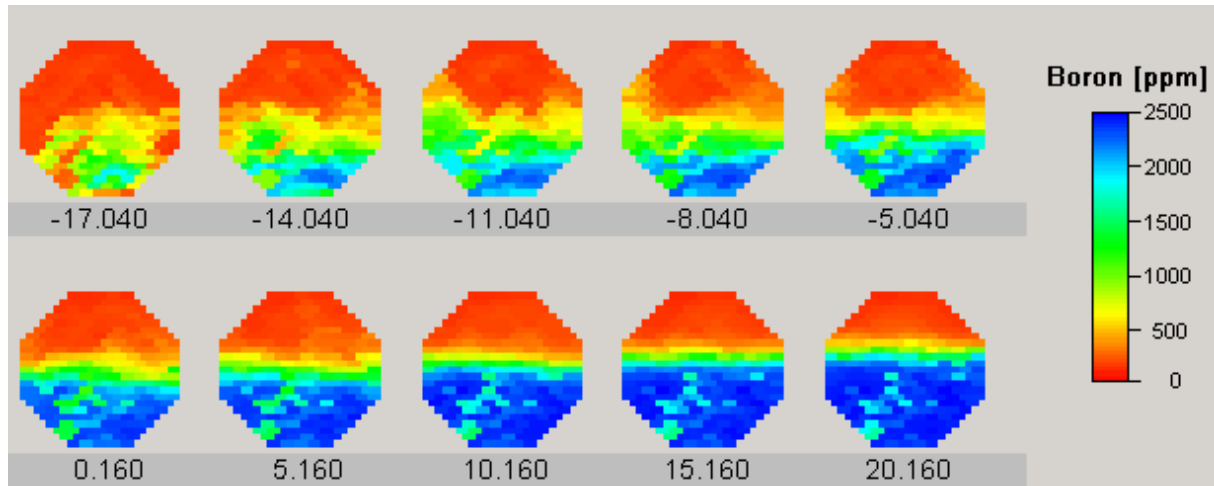


Abb. 4.6 Zeitabhängige Verteilungen der Borkonzentration im Pfpfenbereich der Schleife 1 (Zeit in s)

4.6.3 Vermischungsprozesse im RDB

Das Experiment wurde zweimal durchgeführt, im ersten Durchlauf wurde den Pfpfen Salztracer zugegeben. Mit identischen hydraulischen Randbedingungen wurde ein zweiter Durchlauf durchgeführt. In diesem wurde an Stelle der Pfpfen das über Schleife 3 eingespeiste Notkühlwasser mit Salztracer versehen. Das erlaubt es, die im RDB stattfindenden Vermischungsprozesse besser zu analysieren.

In Tab. 4.3 sind Zeitsequenzen des abgewickelten Sensors im Downcomer dargestellt, auf der linken Seite die Borkonzentration zu einem bestimmten Zeitpunkt, rechts jeweils die Verteilung des Notkühlwassers zum selben Zeitpunkt.

20 s nach Start der Rampe tritt die Vorderfront der Pfpfen direkt unterhalb der Position der beiden anlaufenden Schleifen in die oberste Messebene des Sensors ein. Das Notkühlwasser, das entsprechend den Vorgaben kurz vor Eintreffen der Pfpfen aktiviert wurde, strömt zu diesem Zeitpunkt schon in den Downcomer. Auf der linken Seite der Abbildungen sind Höhenangaben in m angetragen. Sie beziehen sich auf den Originalreaktor und zeigen den Abstand der jeweiligen Messebene von der Mitte des Kaltstrangs an. In den nächsten Sekunden breitet sich das leichtere minderborierte Pfpfenwasser ringförmig im oberen Bereich des Downcomers aus. Erstes Pfpfenwasser erreicht noch oberhalb der obersten Sensorebene bei $t = 40$ s die Winkelposition der Schleife mit dem Notkühlwasser. Bei $t = 45$ s werden geringe Mengen Pfpfenwassers unterhalb von Schleife 3 detektiert. Dieses minderborierte Kühlmittel befindet sich genau innerhalb der Notkühlwassersträhne, die aus Schleife 3 in den Downcomer eindringt. In den weiteren Zeitsequenzen ($t = 50$ s bis $t = 100$ s) ist deutlich zu sehen, wie sich das weiter in den Downcomer eintretende Pfpfenwasser im oberen Bereich anlagert. Das eingespeiste schwerere Notkühlwasser schichtet sich von unten im Downcomer auf. Bis zum Zeitpunkt $t = 100$ s hat sich ein quasistationäres Gleichgewicht zwischen Pfpfenwasser und Notkühlwasser eingestellt. Bis auf den durch die Pfpfen eingenommenen Teil ist der Downco-

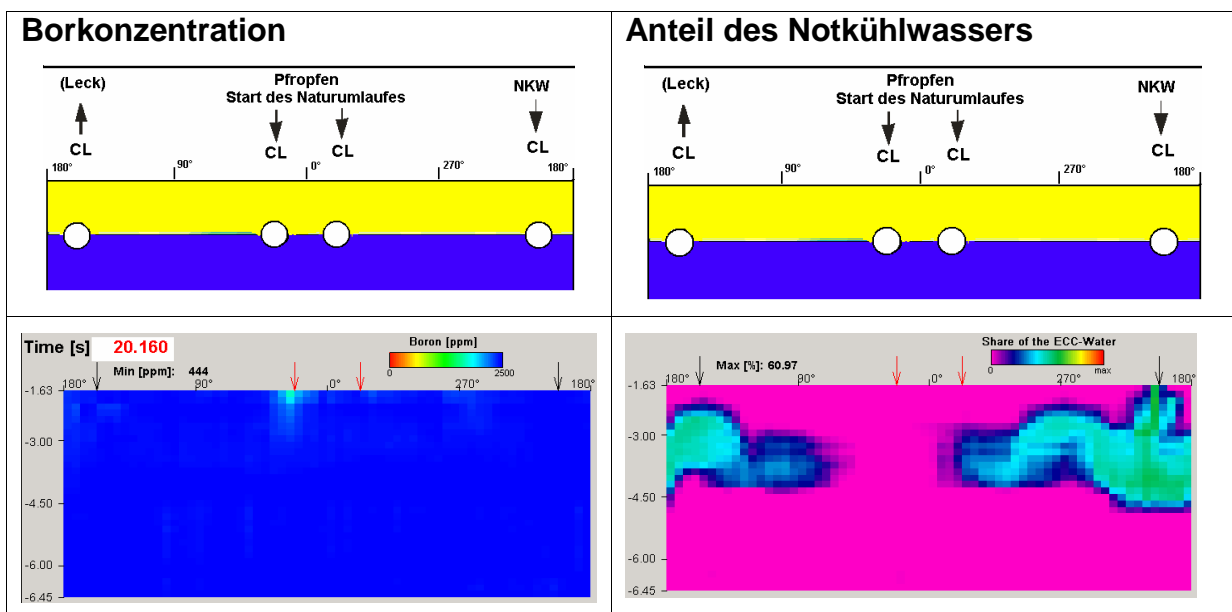
mer vollständig mit Notkühlwasser gefüllt. Minderboriertes Kühlmittel aus den Pfropfen wird ausschließlich über die Notkühlwassersträhne in Richtung unteres Plenum abtransportiert. Das Notkühlwasser bricht dabei in Form einer Strähne durch das leichtere Pflropfenwasser. Es kommt zu einer Beschleunigung und zur Beimischung von minderboriertem Kühlmittel. In allen genannten Zeitsequenzen ist deutlich zu sehen, dass der Bereich unterhalb der Stutzen, über die die Pflropfen in den Downcomer eingetreten sind, vollständig frei von minderboriertem Kühlmittel ist.

Ab etwa $t = 100$ s ändern sich die Strömungsverhältnisse im Downcomer. Ausgehend von der Notkühlwassersträhne bildet sich ein großräumiger Wirbel, an dessen Außenseiten das minderborierte Kühlmittel erst in Querrichtung und dann auch nach oben (!) transportiert wird. Das sich zu diesem Zeitpunkt im oberen Bereich des Downcomers befindliche hochborierte Kühlmittel wird durch minderboriertes von unten verdrängt. Die Trennschicht zwischen Pflropfen- und Notkühlwasser verschiebt sich nach oben. Der genannte Zeitbereich fällt mit der Verringerung des in den Schleifen mit den Pflropfen vorgegebenen Volumenstroms zusammen (vergleiche Abb. 4.3).

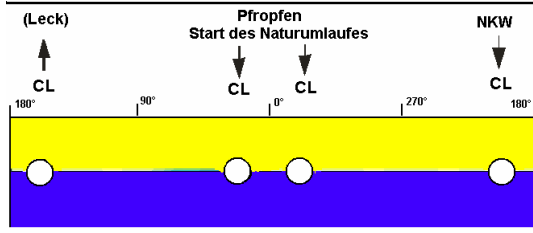
Aus den weiteren Zeitsequenzen wird deutlich, dass sich das minderborierte Kühlmittel inzwischen vollständig im Downcomer ausgebreitet und dabei auch eine deutliche Aufborierung erfahren hat. Inzwischen wird auch aus den Schleifen 1 und 2 hochboriertes Kühlmittel nachgefördert.

Abb. 4.7 zeigt radiale Verteilungen der Borkonzentration in drei verschiedenen Höhenschichten im Downcomer. Auch hier ist deutlich zu sehen, wie die Borkonzentration im mittleren und unteren Bereich des Downcomers zuerst unterhalb des Notkühlwasserstutzens sinkt. Die Verteilungen zum Zeitpunkt $t = 75$ s und $t = 110$ s bestätigen, dass der Bereich in der Mitte des Downcomers über einen langen Zeitraum frei von minderboriertem Kühlmittel bleibt.

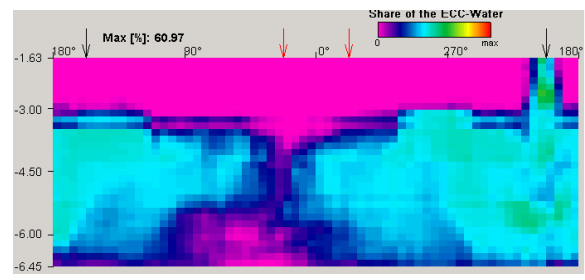
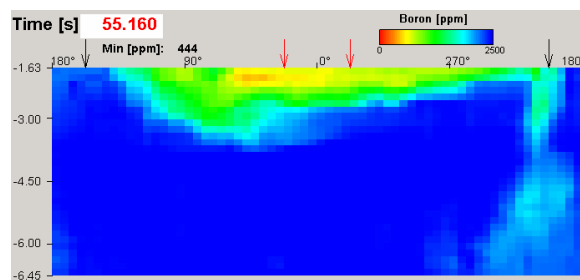
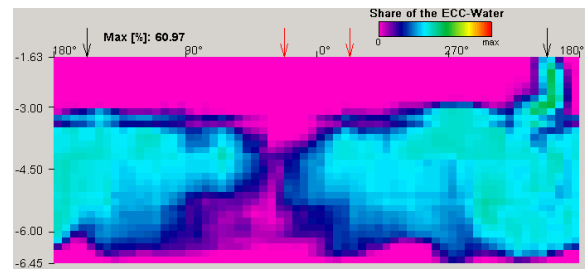
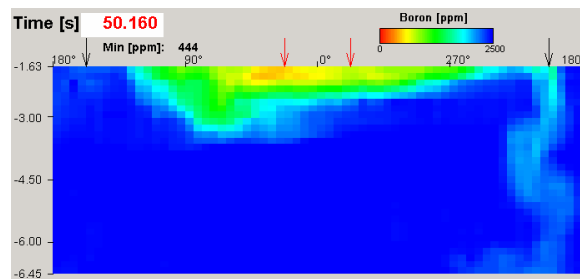
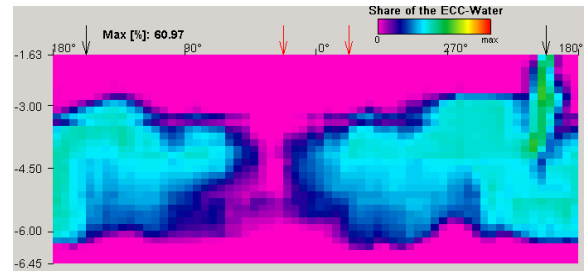
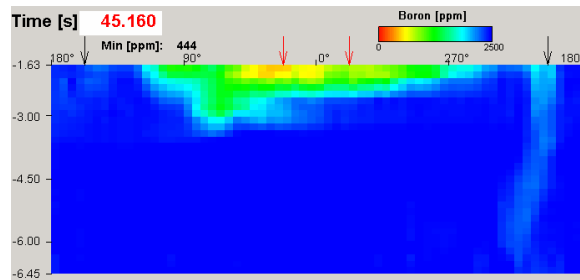
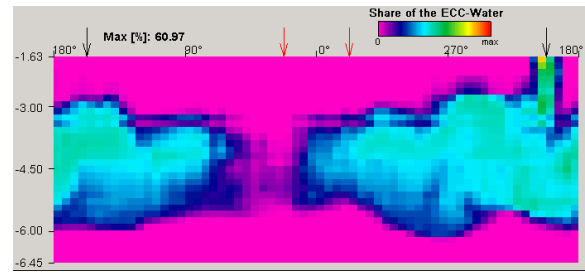
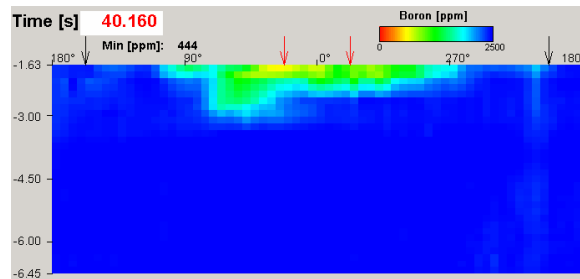
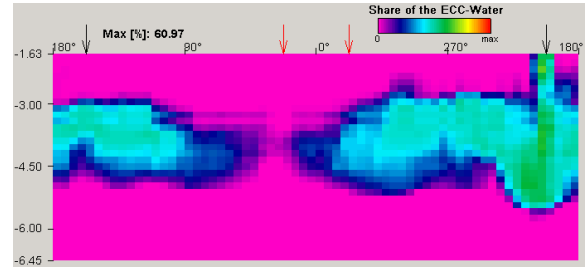
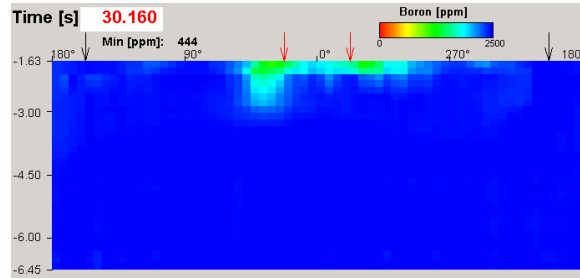
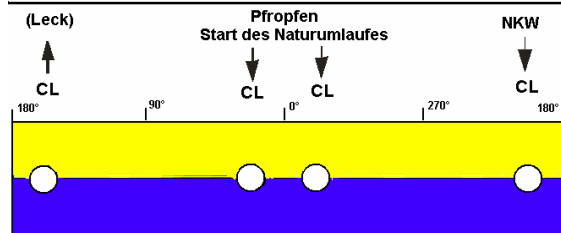
Tab. 4.3 Zeitabhängige Verteilungen der Borkonzentration und des Notkühlwassers im Downcomer



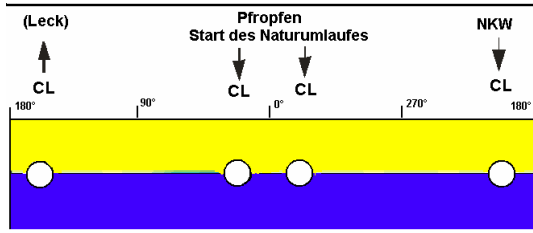
Borkonzentration



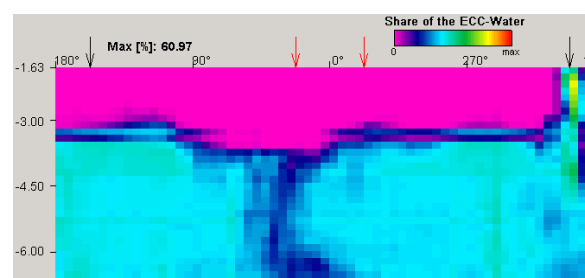
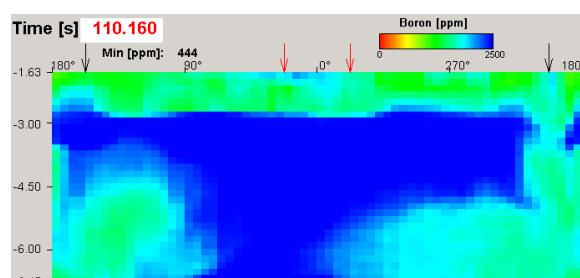
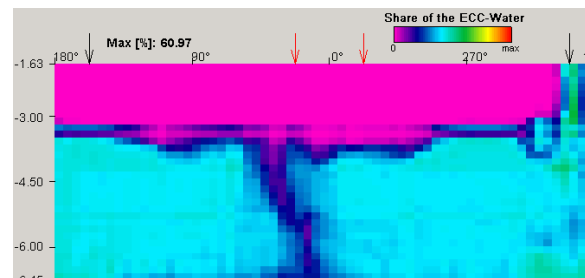
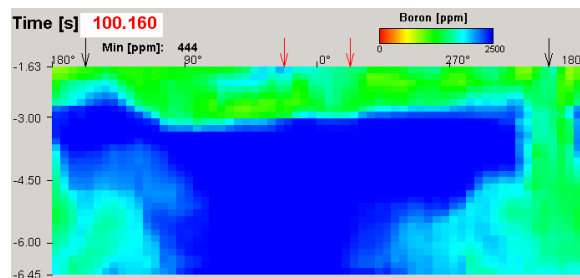
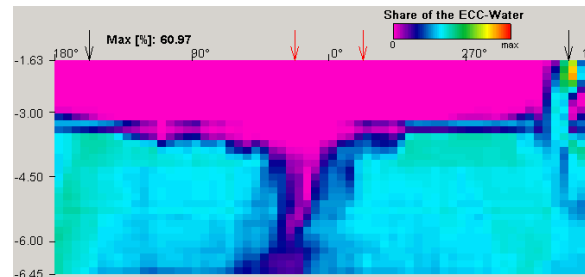
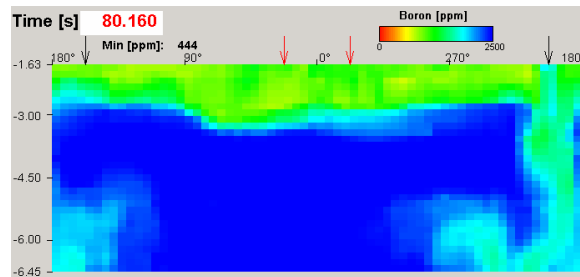
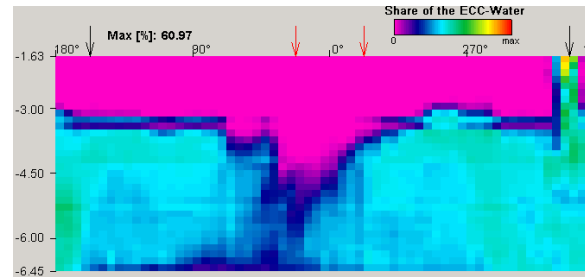
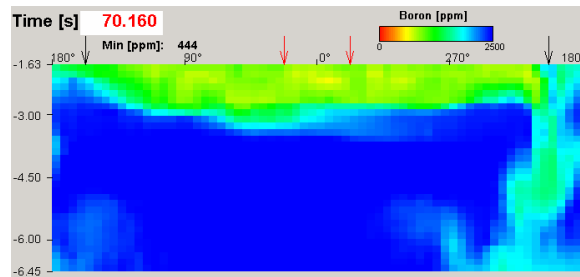
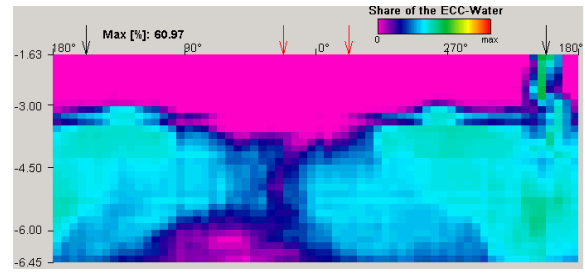
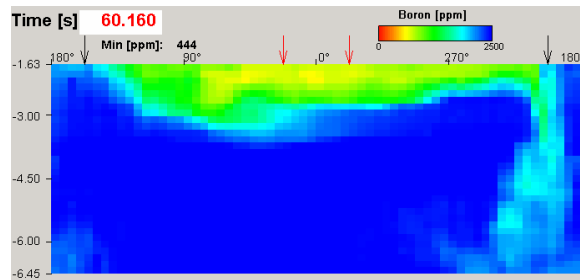
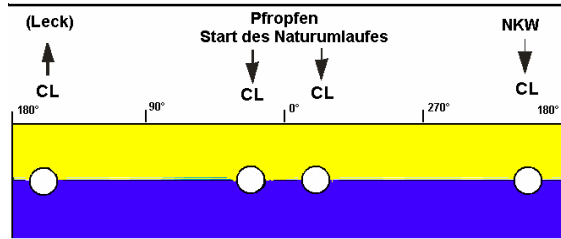
Anteil des Notkühlwassers



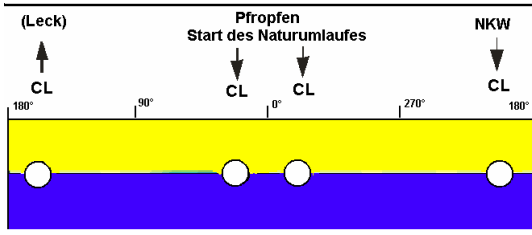
Borkonzentration



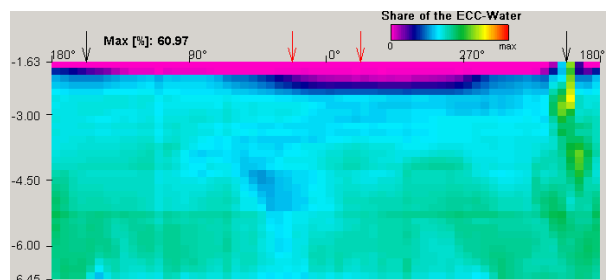
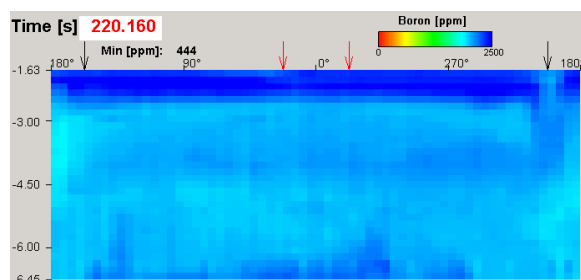
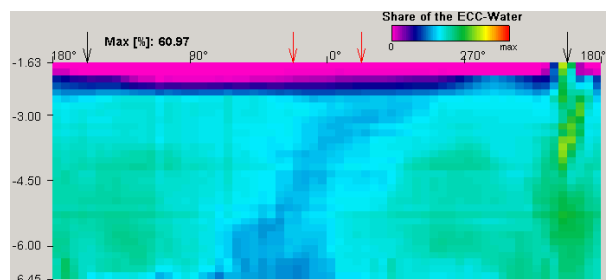
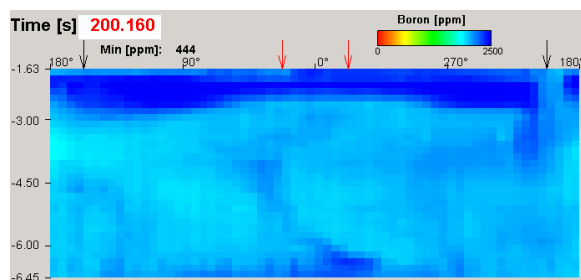
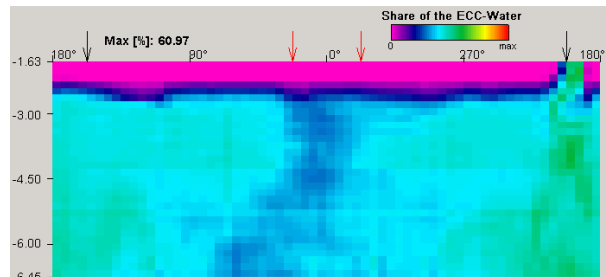
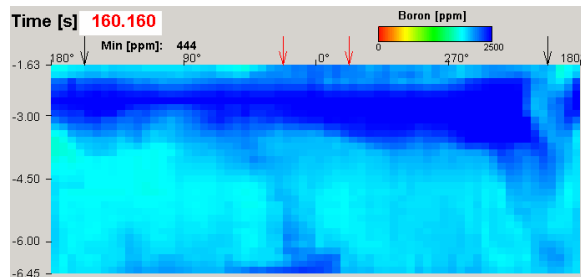
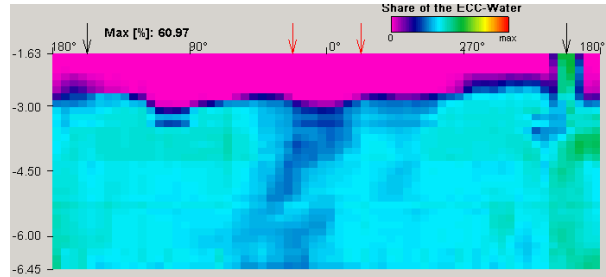
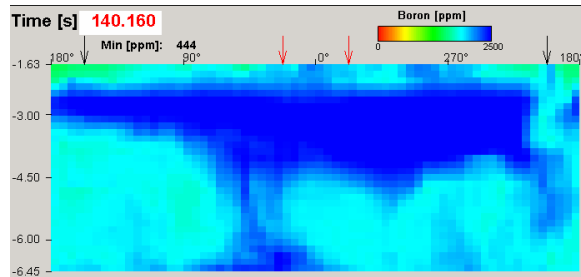
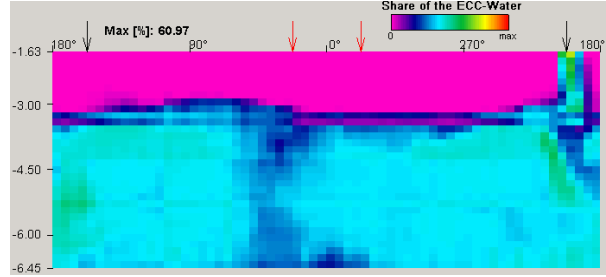
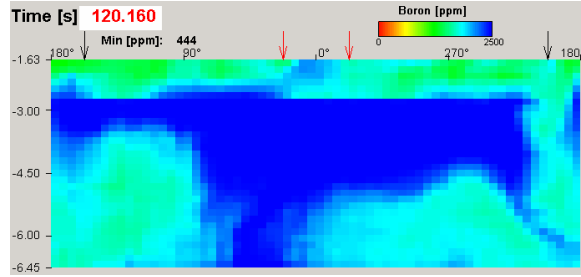
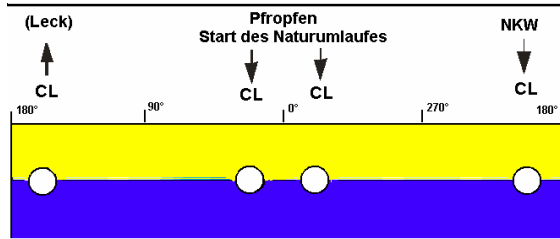
Anteil des Notkühlwassers



Borkonzentration



Anteil des Notkühlwassers



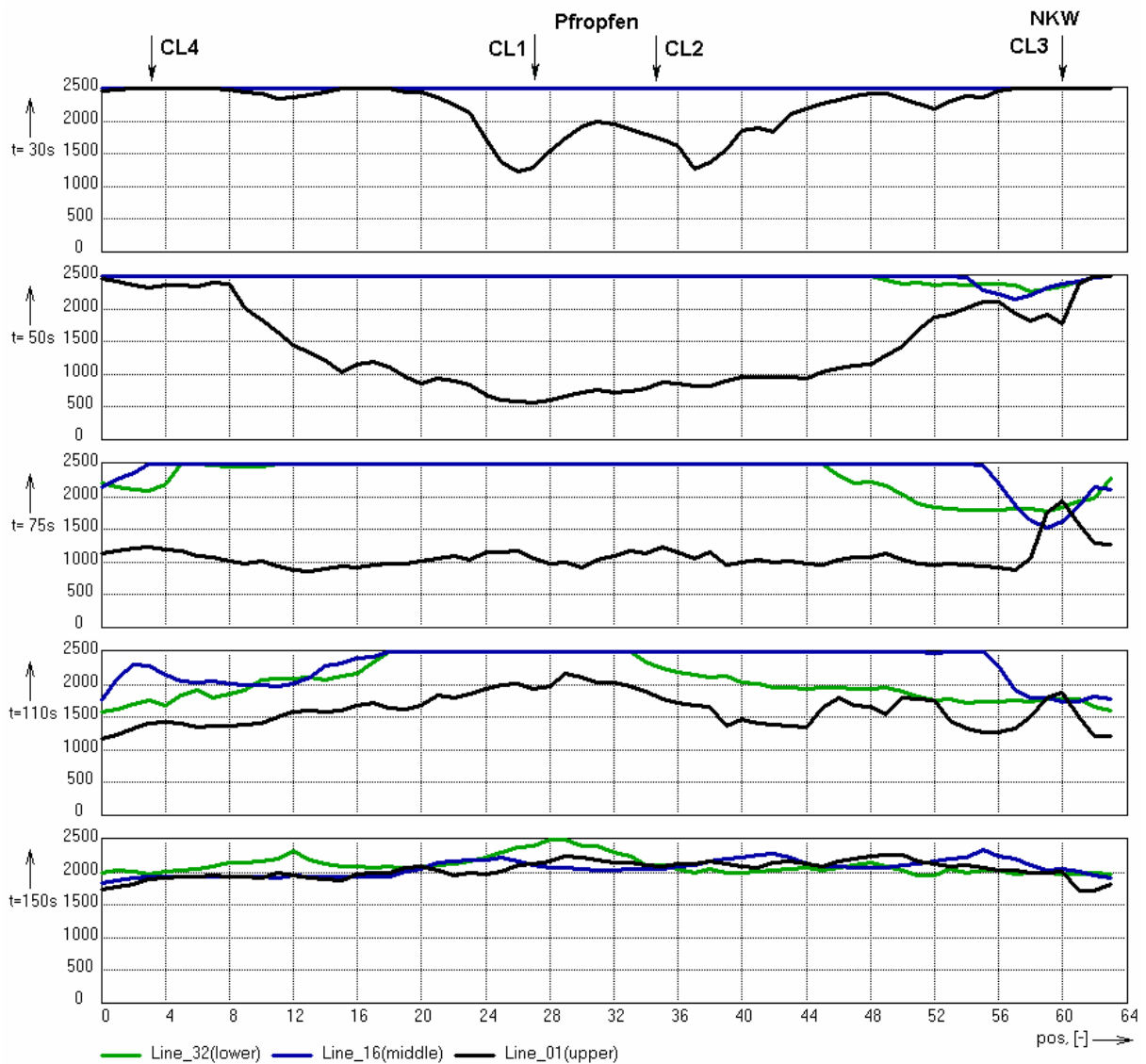


Abb. 4.7 Radiale Verteilung der Borkonzentration (in ppm) in drei Höhenebenen des Sensors im Downcomer zu verschiedenen Zeitpunkten

Ungefähr 60 s nach Start der Transiente erreicht erstes minderboriertes Kühlmittel die Kerneintrittsebene. Innerhalb der nächsten 50 s fällt die minimale Borkonzentration in der Kerneintrittsebene ab (Abb. 4.8). Das Minimum wird bei $t = 112$ s mit 1785 ppm erreicht. Danach steigt die mittlere Borkonzentration in der Kerneintrittsebene langsam wieder an. Die mittlere Borkonzentration in dieser Messebene zeigt nur einen sehr geringen Abfall an. Sie fällt nicht unter 2300 ppm. Die Verteilung der Borkonzentration in der Kerneintrittsebene ist wiederum sehr heterogen. Ein Absinken der Borkonzentration unterhalb von 2400 ppm (d.h. eine Absenkung von mehr als 100 ppm) wird nur im Außenbereich der Kerneintrittsebene registriert (Abb. 4.9). Die Absenkung der Borkonzentration erfolgt nur auf der den beiden mit den Pfropfen beaufschlagten Schleifen gegenüberliegenden Seite. Das bestätigt die oben gemachten Aussagen, dass minderboriertes Kühlmittel nur über die Notkühlwassersträhne in Richtung unteres Plenum transportiert wird. Das erste minderborierte Kühlmittel ($t = 60$ s) wird genau unter der Winkelposition der Schleife mit dem Notkühlwasser registriert. Die Position des absoluten Maximums ist ein Brennelement in der äußersten Reihe.

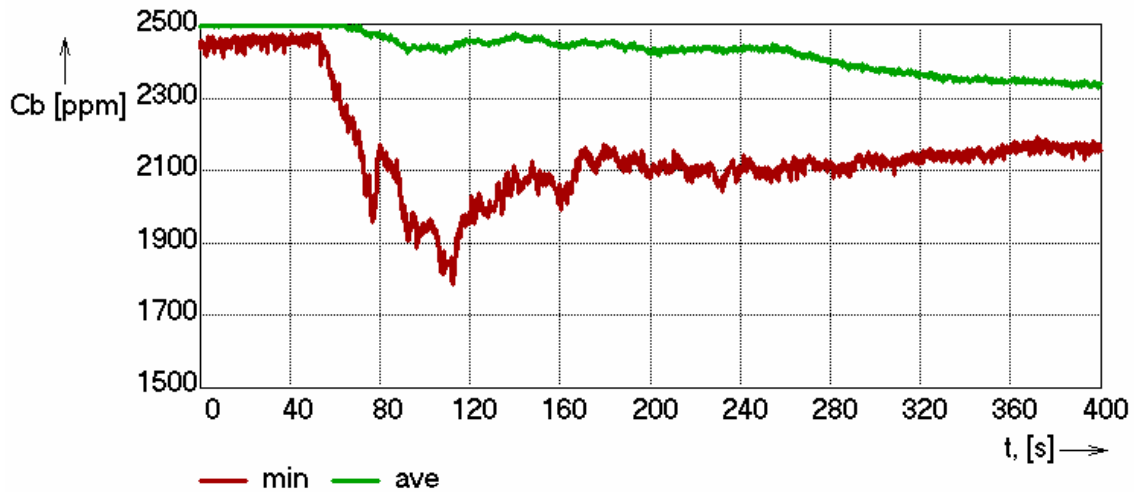


Abb. 4.8 Zeitverlauf der mittleren und minimalen Borkonzentration am Sensor in der Kerneintrittsebene

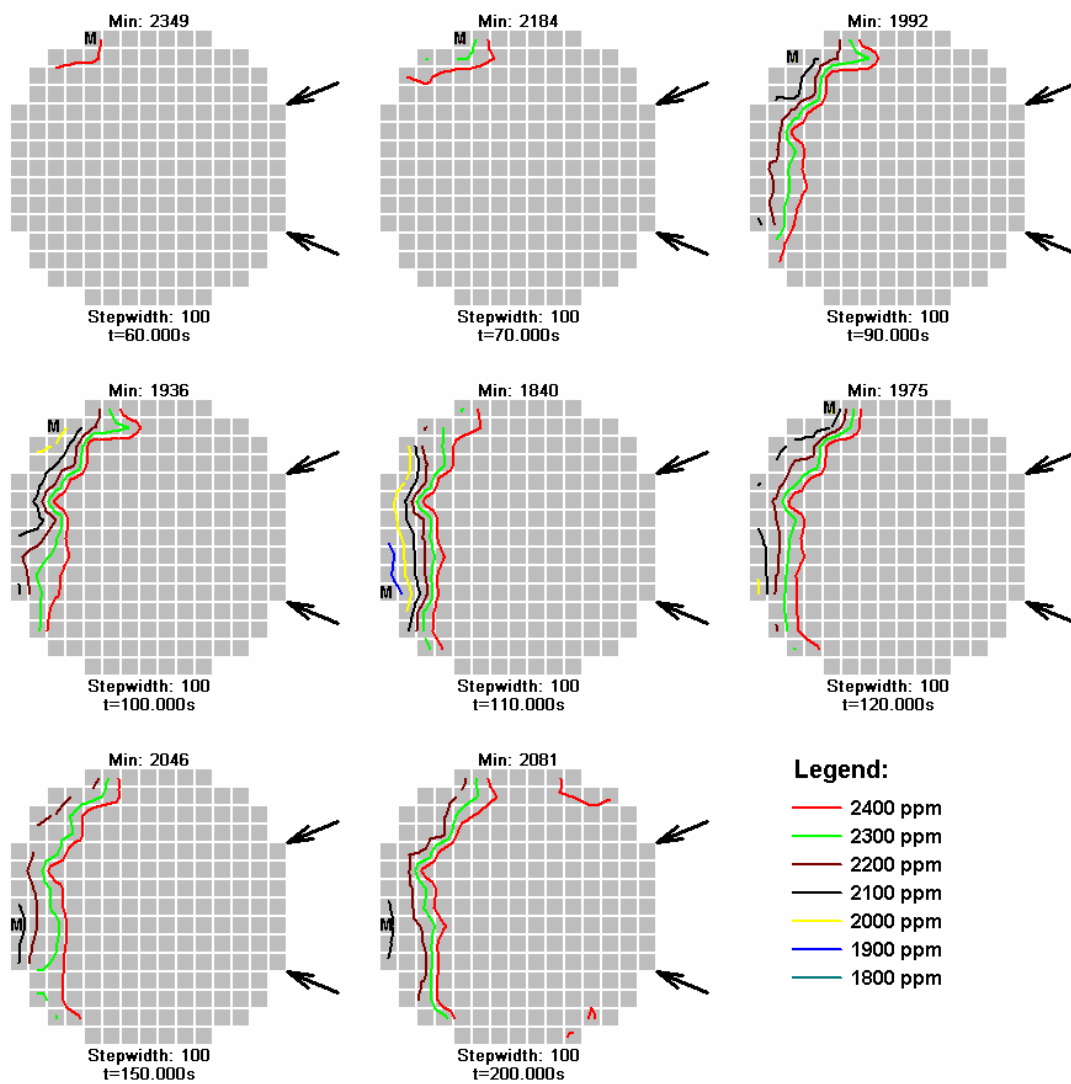


Abb. 4.9 Zeitsequenzen der Borkonzentration in der Kerneintrittsebene „M“ im Brennelementspiegel: Brennelement-Position der minimalen Borkonzentration; Minimalwert in ppm; Pfeile: Winkelposition der Schleifen mit Pfropfen

4.6.4 Vermischungsphänomene in Schleife 3

Tab. 4.4 Zeitabhängige Verteilungen der Borkonzentration und des Anteils des Notkühlwassers an den Sensoren im Kaltstrang von Schleife 3

Position	Zeitsequenzen [s]
<p><u>Einspeisestelle:</u> Visualisierung des Notkühlwassers</p>	
<p><u>Einspeisestelle:</u> Visualisierung der Borkonzentration</p>	
<p><u>RDB-Eintritt:</u> Visualisierung des Notkühlwassers</p>	
<p><u>RDB-Eintritt:</u> Visualisierung der Borkonzentration</p>	

Im kalten Strang von Schleife 3 befindet sich die Einspeisestelle für das Notkühlwasser. Stromabwärts hinter dieser Stelle befindet sich ein Gittersensor. Tab. 4.4 zeigt in der ersten Zeile zeitabhängige Verteilungen des Anteils des Notkühlwassers an dieser Position. Das über den maßstabsgetreuen Stutzen eingespeiste Wasser verteilt sich über den gesamten Rohrquerschnitt.

Bis zum RDB-Eintritt bildet sich eine für diese Einspeisekonfiguration und Randbedingungen typische Verteilung heraus. Das eingespeiste kältere Notkühlwasser vermischt sich mit dem in der Schleife befindlichen Inventar, das eine höhere Temperatur besitzt. Es kommt zur Ausbildung einer stabilen Schichtung, wie die Zeitsequenzen des Notkühlwasseranteils am Sensor im Eintrittsstutzen von Schleife 3 verdeutlichen (Zeile 3 in Tab. 4.4). Die deutlich sichtbare Trennschicht befindet sich kurz oberhalb der Rohrmitte. Oberhalb der Trennschicht ist der Notkühlwasseranteil nahezu Null, unterhalb liegt er stabil bei ungefähr 75 % der Konzentration (entspricht der Dichte des von unten in den RDB eingeschichteten Wassers) des eingespeisten Wassers.

Nachdem sich das minderborierte Kühlmittel im oberen Bereich des Downcomers angelagert hat, wird ein Teil des Pfropfens im Gegenstrom oberhalb der Trennschicht in den Kaltstrang von Schleife 3 gezogen. Dieser Prozess beginnt zwischen 10 und 20 s nach Start der Rampe, wie man deutlich an den Zeitsequenzen der Borkonzentration im Eintrittsstutzen (Zeile 4 in Tab. 4.4) sieht. Das borhaltige Kühlmittel wird bis zur Einspeisestelle des Notkühlwassers transportiert, es erreicht diese Sensorposition bei $t = 50$ s. Dort wird es in den Notkühlwasserstrom gemischt und strömt im unteren Teil der Rohrleitung wieder in Richtung RDB. Das verdeutlichen die Schnittbilder der Borkonzentration am RDB-Eintritt ab $t = 70$ s, die Borkonzentration fällt bis auf rund 2000 ppm.

5 Zusammenfassung

Die Versuchsanlage ROCOM mit variablen RDB-Einbauten dient der Untersuchung der Kühlmittelvermischung im RDB großer Druckwasserreaktoren. In der vorliegenden Arbeit wurden zwei Experimente zur Kühlmittelvermischung in der Spätphase eines Störfalls mit kleinem Leck beschrieben.

Die Randbedingungen des ersten Experiments für die Vorkonvoi-/Konvoianlagen wurden aus dem Versuch PKL III E 2.3 der Versuchsanlage PKL abgeleitet. In diesem PKL-Versuch zum Szenario kleines Leck im heißen Strang bei heißseitiger Notkühleinspeisung waren die Bedingungen so eingestellt worden, dass der Naturumlauf in zwei Schleifen, in denen sich im Verlauf der Reflux-Condenser-Phase deboriertes Kühlmittel angesammelt hat, wieder anlief, während der Naturumlauf in den anderen beiden Schleifen auf deutlich höherem Niveau während der gesamten Transiente bestanden hat. Die in diesem PKL-Experiment bestimmten Massenströme wurden als Randbedingungen für die ROCOM-Anlage vorgegeben. In zwei benachbarten Schleifen der ROCOM-Anlage wurden Pfropfen vorgelegt, die Pfropfen in der Realanlage der Größe 7.2 m^3 mit einer Anfangsborkonzentration von 50 ppm in einer Entfernung, die dem Abstand des Austritts aus dem Pumpenbogen entspricht, repräsentieren. Der Start der Rampen wurde so angepasst, dass beide Pfropfen gleichzeitig den RDB-Eintritt erreichen. Alle diese Randbedingungen basieren zwar auf dem PKL-Versuch, wurden jedoch überlagert und mit zusätzlichen Konservativitäten versehen, die dieser Versuch nicht zeigte. Die minimale Borkonzentration wird mit 1239 ppm für kurze Zeit an einer einzelnen Brennelementposition im Außenbereich des Kerns gemessen. Die mittlere Borkonzentration in der gesamten Kerneintrittsebene senkte sich im Minimum bis auf 2156 ppm ab.

Auf Basis des Versuchs PKL III E 2.2 wurde die Kühlmittelvermischung im RDB nach einem Störfall mit kleinem Leck im kalten Strang bei kaltseitiger Notkühleinspeisung untersucht. Auch für dieses Experiment wurden die PKL-Massenströme als Randbedingungen für die ROCOM-Anlage vorgegeben. Wiederum wurden in zwei benachbarten Schleifen Pfropfen derselben Größe, Abstand und Anfangsborkonzentration vorgelegt. Weiterhin wurden die gemessenen Temperaturen des Kühlmittels in verschiedenen Bereichen des Primärkreislaufs und der Anschlusssysteme übernommen. Auch diese Randbedingungen basieren auf dem PKL-Versuch, wurden aber wiederum überlagert und mit zusätzlichen Konservativitäten versehen. Nach Start des Experiments lagern sich die minderborierten Pfropfen ringförmig im oberen Bereich des Downcomers an und werden an der nach unten durchdringenden Notkühlwassersträhne beigemischt und aufboriert. Eine weitere Aufborierung erfolgt beim Transport durch das untere Plenum. In der Kerneintrittsebene wird minderboriertes Kühlmittel nur im Außenbereich registriert. Der an einer bestimmten Brennelementposition zu einem bestimmten Zeitpunkt gemessene Minimalwert (örtliches und zeitliches Minimum) beträgt 1785 ppm. Diese geringe Absenkung der Borkonzentration bleibt auf die äußeren drei Brennelementreihen beschränkt. Im inneren Bereich der Kerneintrittsebene kommt es zu keiner Veränderung der anfänglichen Borkonzentration von 2500 ppm. Für dieses Experiment wurde ein neuartiger Sensor, der ein Gitternetz aus 64×32 Messpunkten über einen großen Teil des Downcomers spannt, entwickelt und eingesetzt. Mit Hilfe dieses Sensors war es möglich, die Vermischungsphänomene im Downcomer aufzuklären, die für die beobachteten Ergebnisse verantwortlich sind. Dieser und die weiteren in der Versuchsanlage installierten Gittersensoren lieferten ein nahezu vollständiges Bild der verschiedenen Vermischungsprozesse. So konnte gezeigt werden, dass die Vermischung des Notkühl-

wassers bis zum Eintritt in den RDB den auf Basis von UPTF-Experimenten entwickelten Modellen entspricht. Ein Teil der Pfropfen wird in den Ansaugstrom oberhalb der Notkühlwassersträhne gezogen. Er wird bis zum Einspeisestutzen transportiert, dem Einspeisestrom dort beigemischt und gelangt so wieder zum RDB. In der Spätphase des Experiments werden im Downcomer großflächige Rezirkulationsgebiete im Außenbereich der Notkühlwassersträhne angezeigt. In diesen Rezirkulationsgebieten strömt ein Teil des minderborierten Kühlmittels wieder nach oben. Das verlängert die Verweilzeit des minderborierten Kühlmittels im Downcomer.

Danksagung

Die hier vorgestellten Arbeiten wurden im Rahmen von zwei durch den Sonderausschuss „Anlagentechnik“ der VGB finanzierten Projekten durchgeführt.

6 Literatur

- Grunwald, G., Höhne, T., Kliem, S., Prasser, H.-M., Richter, K.-H., Rohde, U., Weiß, F.-P. (2003): „Kühlmittelvermischung in Druckwasserreaktoren - Teil 2, Experimentelle Ausrüstung und Simulation der Vermischung“, Report FZR-367, ISSN 1437-322X, 164S., Rossendorf
- Grunwald, G., Höhne, T., Kliem, S., Prasser, H.-M., Rohde, U. (2003a): „Experimentelle Untersuchung der Kühlmittelvermischung unter den Bedingungen wiederanlaufenden Naturumlafs“, Abschlussbericht zum Auftrag: SA“AT“ 29/01, 44 S., Rossendorf
- Hertlein, R. (2003): „Vermischung der entborierten Pfropfen im RDB-Ringraum und im unteren Plenum beim Wiederanlaufen NC (HD kaltseitig/Leck kaltseitig)“, E-Mail vom 22.12.2003
- Hertlein, R. (2003a): „Mixing and condensation models based on UPTF-TRAM test results“, Jahrestagung Kerntechnik 2003; Fachsitzung: Experimentelle und theoretische Untersuchungen zu Borverdünnungstransienten in DWR, Berichtsheft, S. 97-133
- Kliem, S., Prasser, H.-M., Sühnel, T. (2004): „Experimente an der Versuchsanlage ROCOM zur Untersuchung der Kühlmittelvermischung auf Grundlage des Versuchs PKL III E 2.3“, Abschlussbericht zum Auftrag: SA“AT“ 33/03, 47 S., Rossendorf
- Kliem, S., Prasser, H.-M., Sühnel, T. (2005): „Experimente an der Versuchsanlage ROCOM zur Untersuchung der Kühlmittelvermischung auf Grundlage der Versuche PKL III E 2.2 und F 1.4“, Bericht zum Auftrag: SA“AT“ 23/04, 77 S., Rossendorf
- Mull, Th. und Umminger, K. (2003): „Aktuelle PKL-Experimente zur Borverdünnung in DWR“, Jahrestagung Kerntechnik 2003; Fachsitzung: Experimentelle und theoretische Untersuchungen zu Borverdünnungstransienten in DWR, Berichtsheft, S. 23-56
- Pointner, W. und Wohlstein, R. (2003): „Auslösende Ereignisse und Ablaufszenarien bei Borverdünnungstransienten“, Jahrestagung Kerntechnik 2003; Fachsitzung: Experimentelle und theoretische Untersuchungen zu Borverdünnungstransienten in DWR, Berichtsheft, S. 5-22
- Prasser, H.-M.; Grunwald, G.; Höhne, T.; Kliem, S.; Rohde, U.; Weiss, F.-P. (2003): „Coolant mixing in a PWR - deboration transients, steam line breaks and emergency core cooling injection - experiments and analyses“, Nucl. Techn., vol. 143 (1), pp. 37-56
- Prasser, H.-M.; Höhne, T.; Kliem, S.; Rohde, U.; Weiss, F.-P. (2003a): „Untersuchung der Kühlmittelvermischung an der Versuchsanlage ROCOM – Experimente und Modellierung“, Jahrestagung Kerntechnik 2003; Fachsitzung: Experimentelle und theoretische Untersuchungen zu Borverdünnungstransienten in DWR, Berichtsheft, S. 57-84

Experimente an der Versuchsanlage ROCOM zur Kühlmittelvermischung bei Wiederanlauf der Naturzirkulation

S. Kliem, T. Sühnel, H.-M. Prasser, F.-P. Weiß

*Fachtagung: Aktuelle Themen der
Reaktorsicherheitsforschung in Deutschland
Rossendorf, 03./04.04.2006*



Einleitung

Kleiner Leckstörfall im DWR bei teilweiseem Ausfall der Hochdruckeinspeisung

- **Prinzipieller Ablauf**

- Inventarverlust
- zweiphasiger Naturumlauf im Reflux-Condenser Mode
- Produktion und Ansammlung gering borierten Kühlmittels im Primärkreislauf
- Druckabsenkung/Wiederauffüllen des Primärkreislaufes
- Wiederanlaufen des Naturumlaufes
- Transport der minderborierten Pfropfen in Richtung Reaktorkern



Einleitung

- **Deutsche DWR: heißseitige oder kaltseitige
Vorzugslage der Notkühleinspeisung**
- **Zwei abdeckende Szenarien**
 - Heißseitiges Leck mit heißseitiger Notkühleinspeisung
 - Kaltseitiges Leck mit kaltseitiger Notkühleinspeisung
- **Experimente an ROCOM: Vermischung im RDB für
beide Szenarien**
 - **Ermittlung der Borkonzentration am Kerneintritt**

Randbedingungen

- PKL III E2.3 (Szenario: "heiß/heiß")
- PKL III E2.2 (Szenario: "kalt/kalt")



Versuchsanlage ROCOM



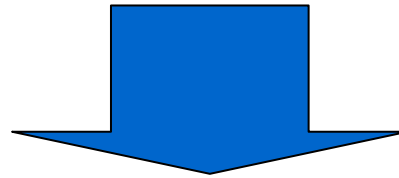
- 1300 MWe KONVOI: 1:5
- Umlaufzeiten 1:1 eingehalten
 - ➔ $v_{\text{ROCOM}} = 2.9 \text{ m/s}$ in Kaltstrang
- $\text{Re}(\text{KONVOI}) / \text{Re}(\text{ROCOM}) \sim 200$
aber in jedem Falle hochturbulent

Kühlmittelvermischung an ROCOM

- **Experimentiermethode:**

Unterborierung durch Salztracer simuliert: verändert elektrische Leitfähigkeit σ

- **Turbulente Vermischung dominiert**

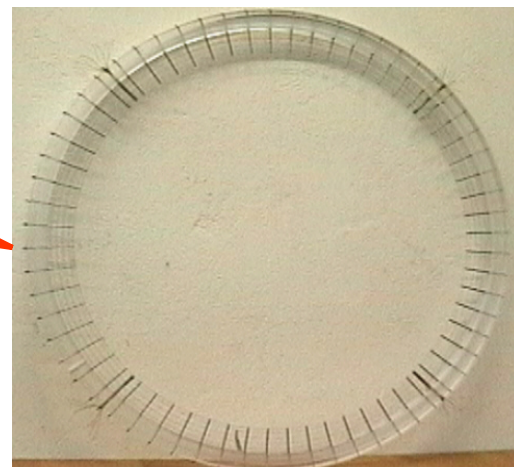
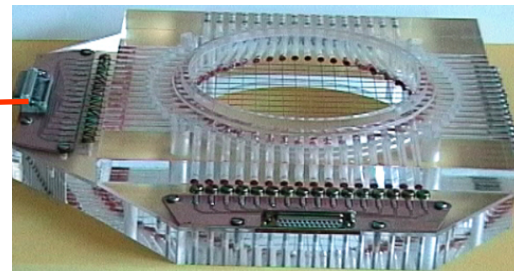
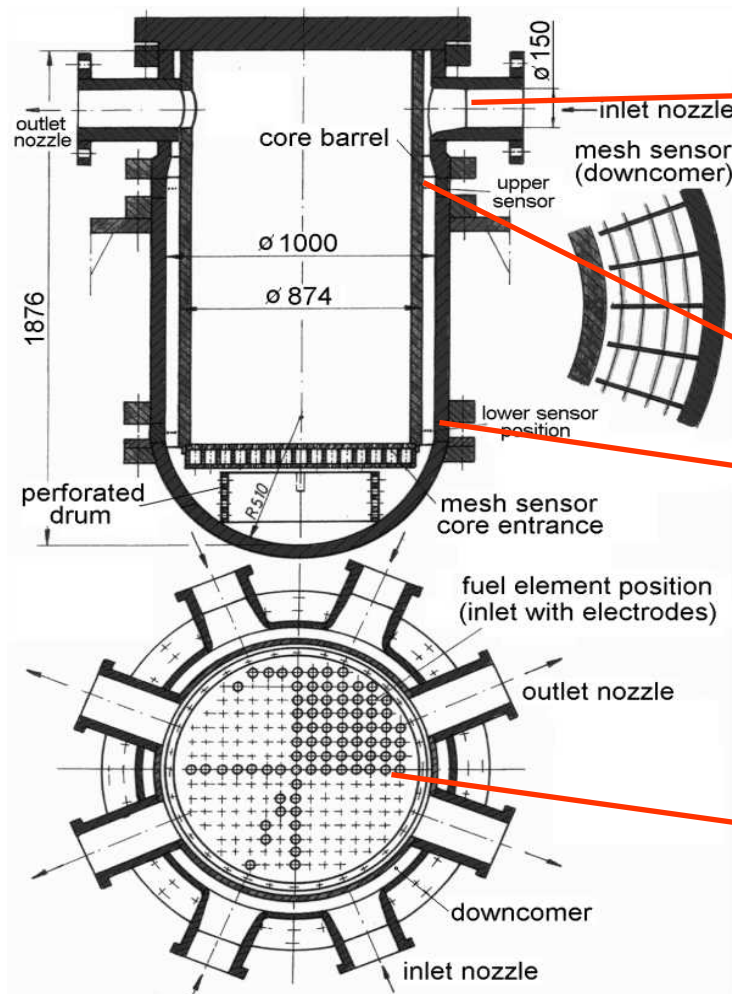


- **Borkonzentration und Tracerkonzentration verhalten sich ähnlich**

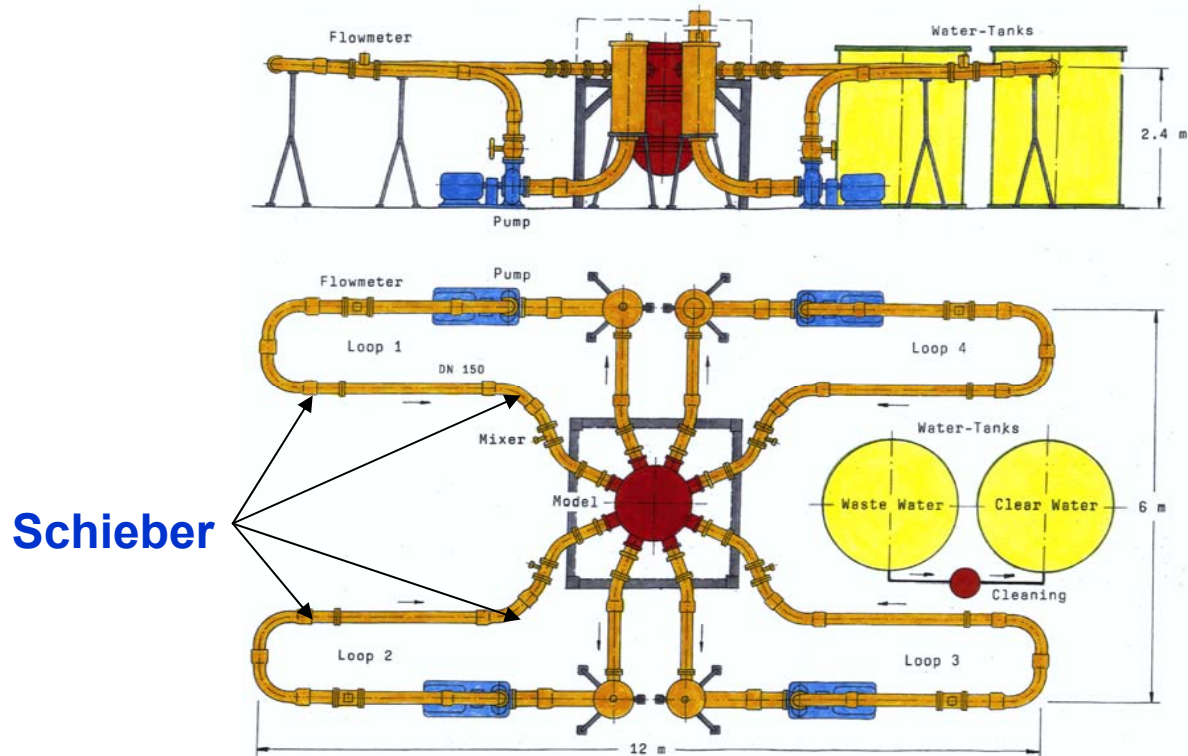
$$\theta_{x,y,z,t} = \frac{\sigma_{x,y,z,t} - \sigma_0}{\sigma_1 - \sigma_0} \approx \frac{C_{B,x,y,z,t} - C_{B,0}}{C_{B,1} - C_{B,0}}$$

Quantifizierung der Vermischung im RDB

Gittersensoren: ≈ 1000 Messpositionen, $f_{\text{image}} = 200\text{Hz}$

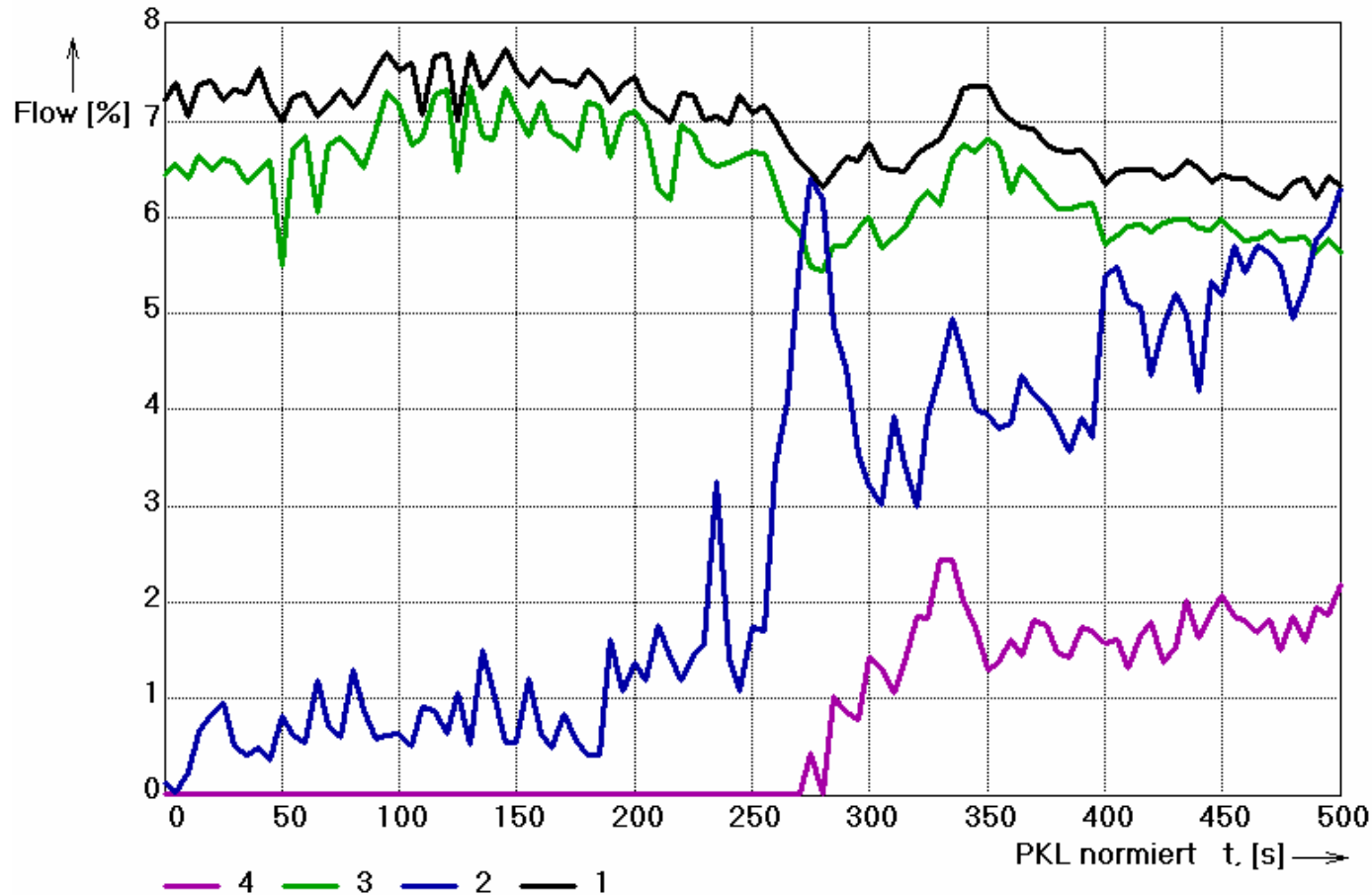


Versuchsanlage ROCOM - Anlagenschema



- 4 Schieber für die Pfropfenvorlage ($2 \times 7.2 \text{ m}^3$) in Schleifen 1 und 2 im Abstand von 9.0 m vom RDB

ROCOM-Versuch "heiß/heiß"



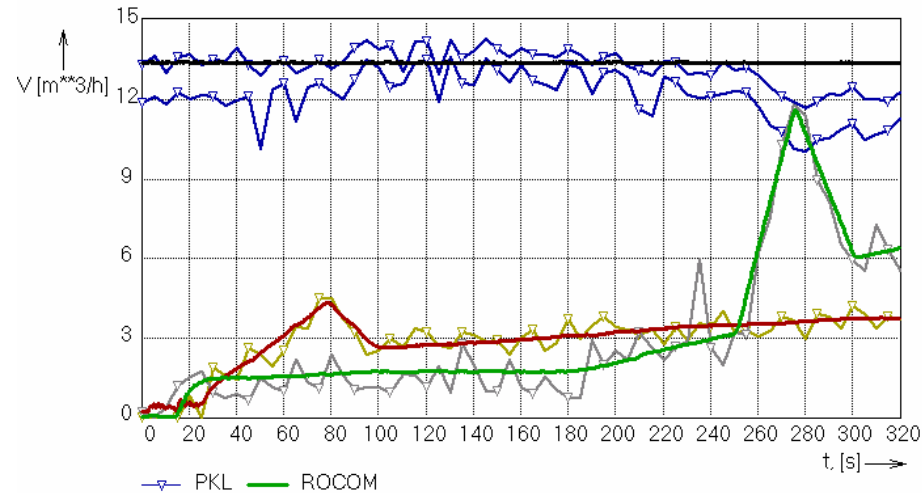
- **PKL: Loop-Massenströme umgerechnet auf Reaktor-Bedingungen**

ROCOM-Versuch Szenario: "heiß/heiß"



Randbedingungen für ROCOM

- **Ergebnisse des PKL-Versuchs**
 - Zeitabhängige Volumenströme in den vier Schleifen
 - Anfängliches Pfropfvolumen
 - Anfangsentfernung der Pfropfen vom RDB-Eintritt
- **Zusätzliche konservative Annahmen**
 - Pfropfen in benachbarten Schleifen
 - Gleichzeitiger Pfropfeneintritt in den RDB
 - Kein Borkonzentrationsprofil im Pfropfen

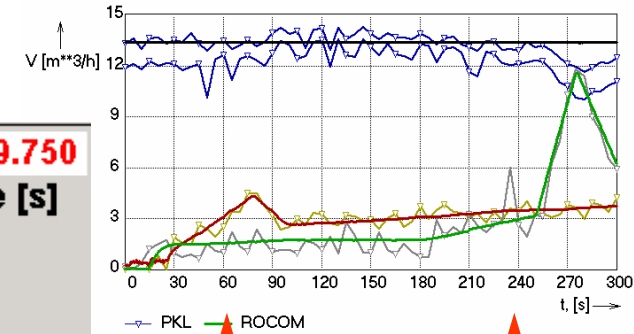
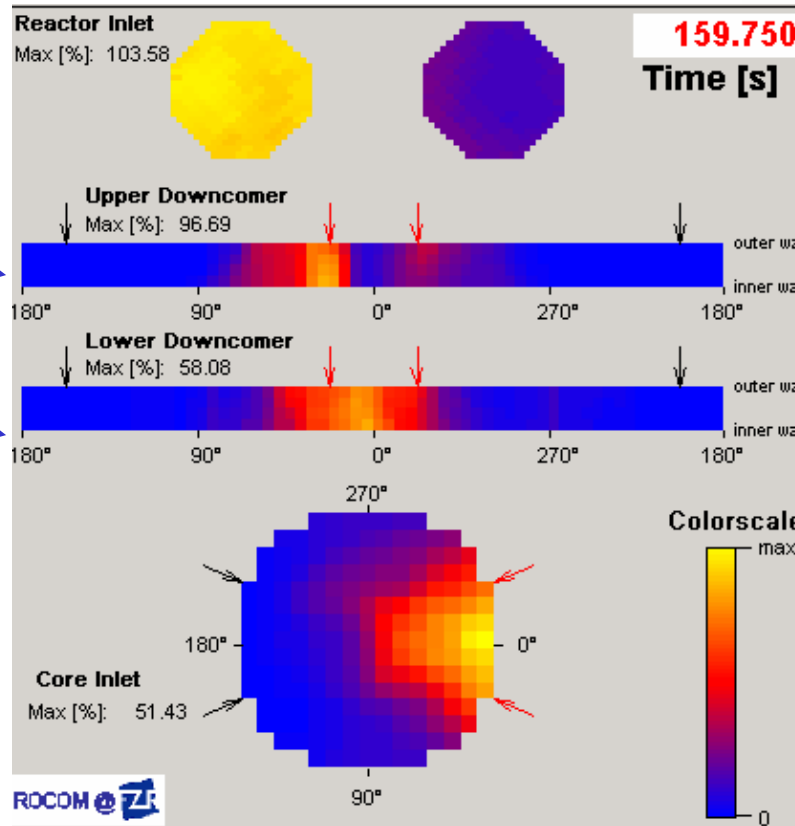
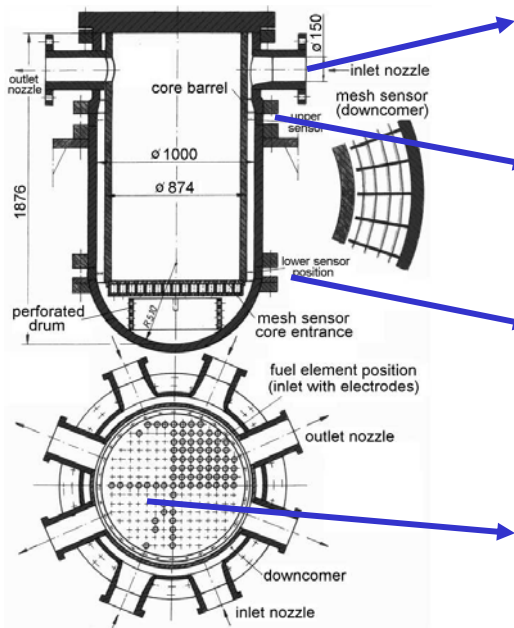


- **Volumenströme in den Schleifen (im Vergleich zu PKL)**

ROCOM-Versuch Szenario: "heiß/heiß"



Ergebnisse

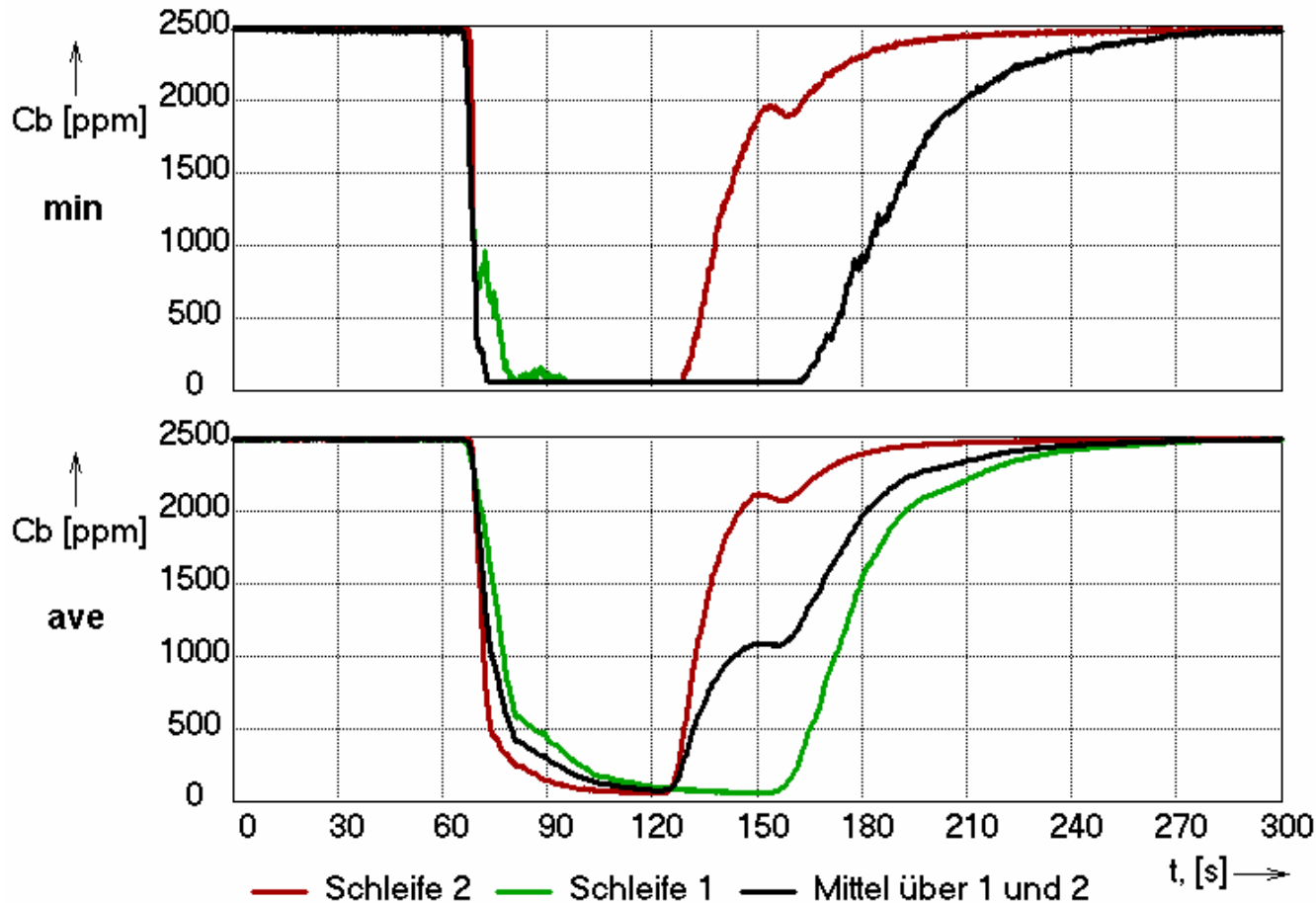


• **t = 60 s**

t = 240 s

ROCOM-Versuch Szenario: "heiß/heiß"

Ergebnisse

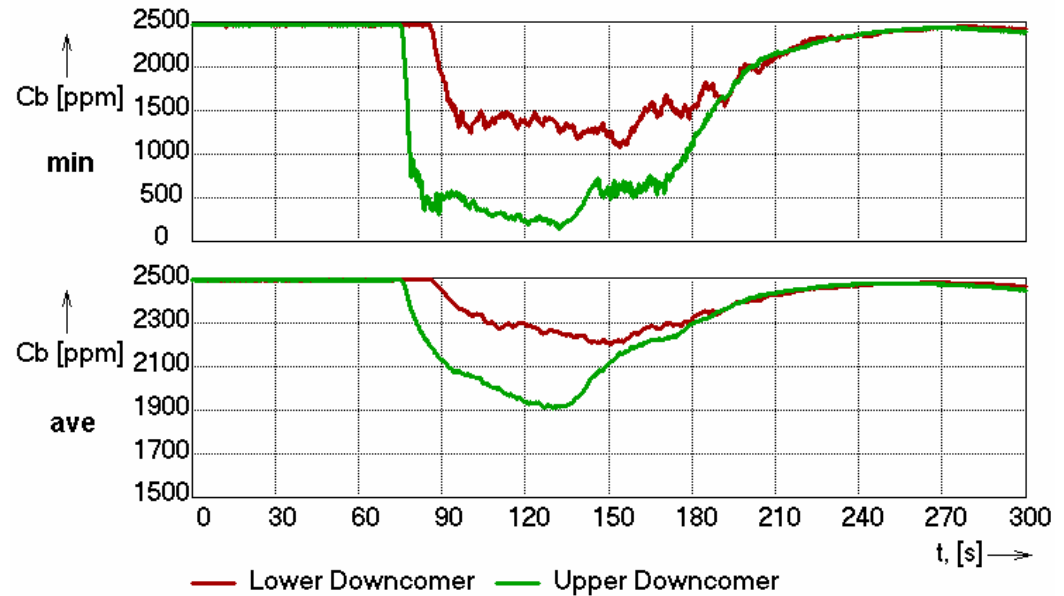
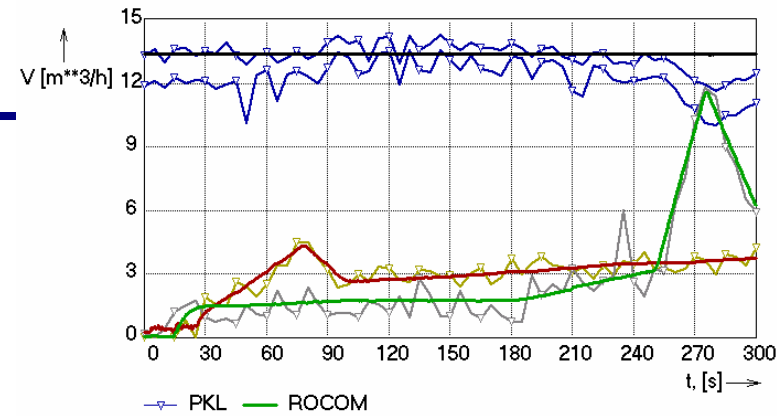
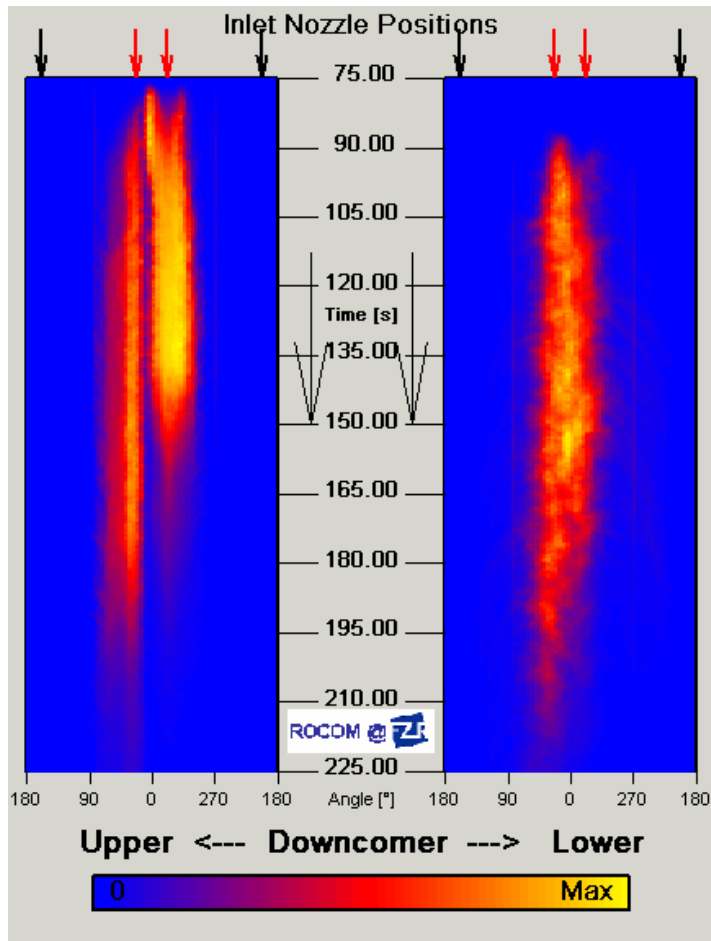


- **Mittlere und minimale Borkonzentration im kalten Strang (RDB-Eintritt)**

ROCOM-Versuch Szenario: "heiß/heiß"



Ergebnisse



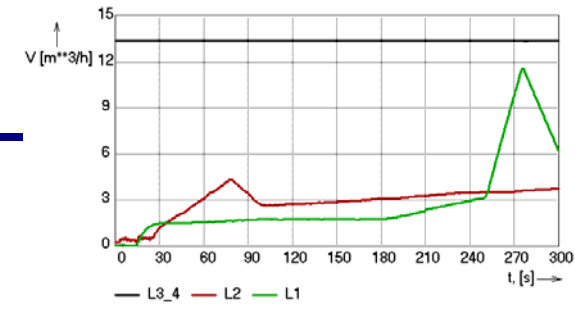
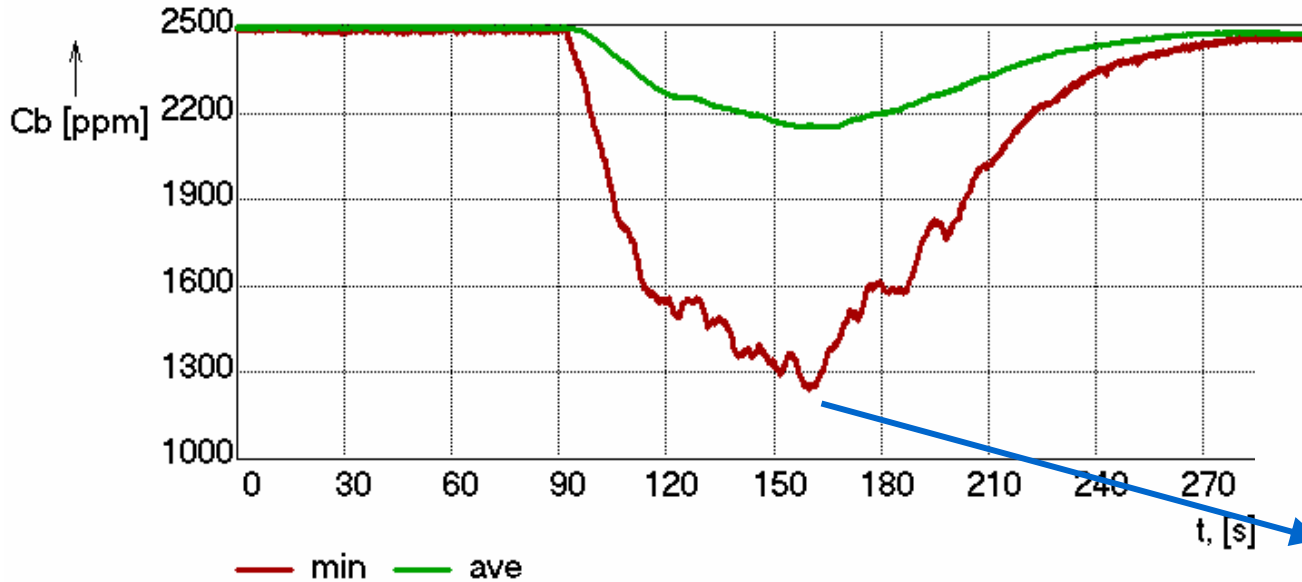
Borkkonzentration im Downcomer

- **Mittlere und minimale Borkkonzentration im Downcomer**

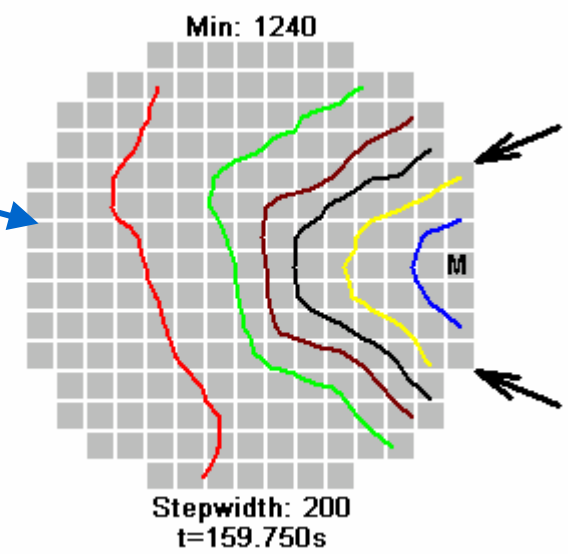
ROCOM-Versuch Szenario: "heiß/heiß"



Ergebnisse



- **Mittlere und minimale Borkonzentration am Kerneintritt**



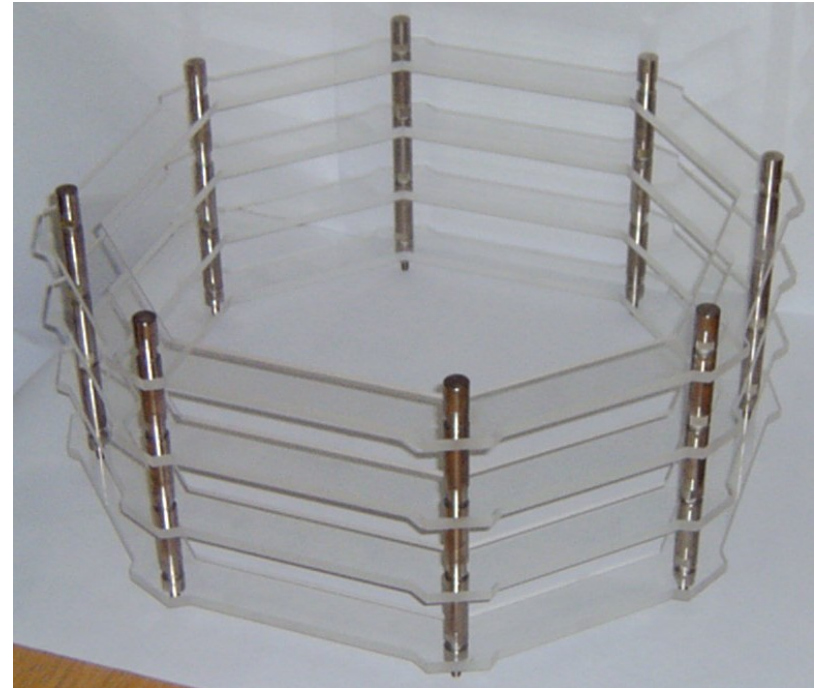
- 2400 ppm
- 2200 ppm
- 2000 ppm
- 1800 ppm
- 1600 ppm
- 1400 ppm

Borkonzentration am Kerneintritt ($t = t_{max}$)

ROCOM-Versuch Szenario: "heiß/heiß"

ROCOM-Versuch "kalt/kalt"

- **Umbauten zur Anpassung des RDB**
 - Vergrößerung des unteren Plenums
 - Ersatz der Siebtonne (Konvoi) durch einen Schemel

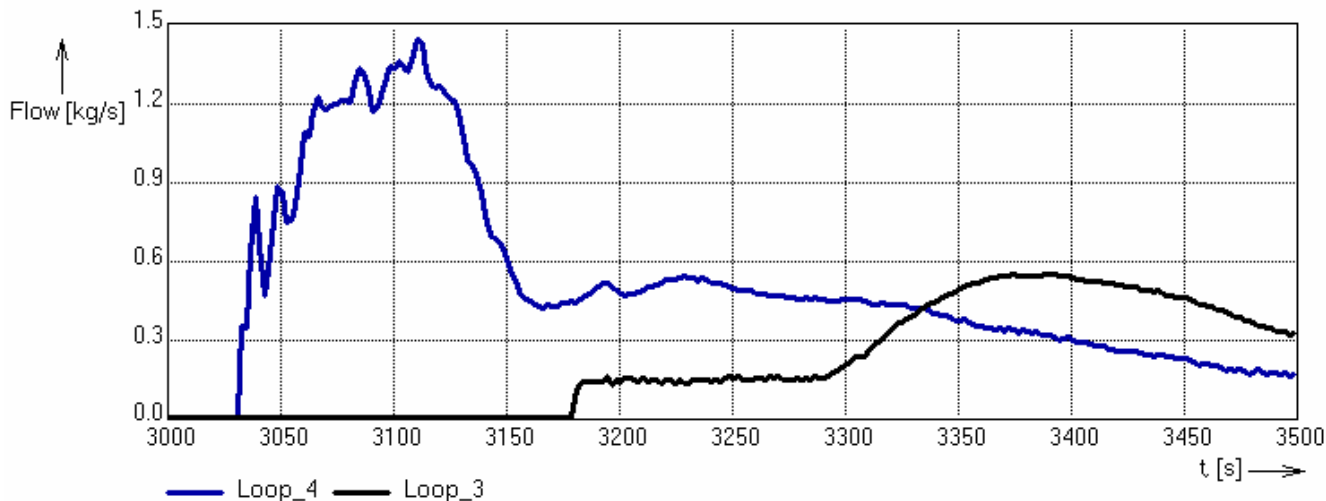


ROCOM-Versuch Szenario: "kalt/kalt"



ROCOM-Versuch "kalt/kalt"

- **Bedingungen beim kalt / kalt Szenarium:**
 - nur 1 NK-Strang voll wirksam
 - alle Schleifen gehen in zweiphasigen Naturumlauf
 - in allen Schleifen sammelt sich Kondensat an
 - unbespeiste Schleifen kehren zuerst zu einphasigem Naturumlauf zurück



- **PKL III E2.2:
Massenströme
in den
Schleifen**

ROCOM-Versuch Szenario: "kalt/kalt"



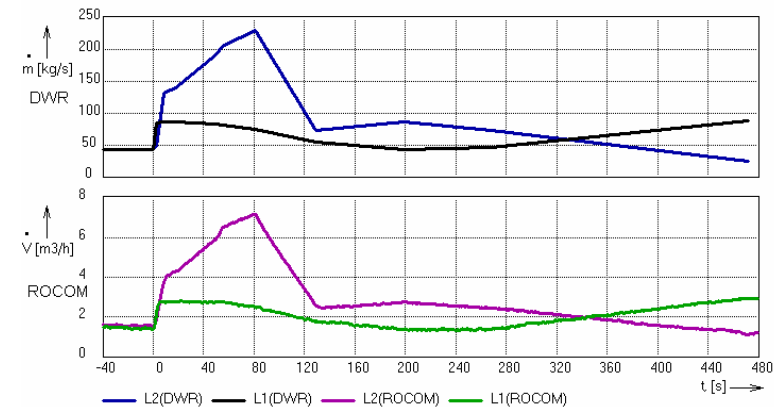
Randbedingungen für ROCOM

- **Ergebnisse des PKL-Versuchs**

- Zeitabhängige Volumenströme in den zwei anlaufenden Schleifen und der NK-Einspeisung
- Anfängliches Pfropfenvolumen
- Anfangsentfernung der Pfropfen vom RDB-Eintritt

- **Zusätzliche konservative Annahmen**

- Pfropfen in benachbarten Schleifen
- Gleichzeitiger Pfropfeneintritt in den RDB
- Kein Borkonzentrationsprofil im Pfropfen
- Transport der Pfropfen mit geringer Geschwindigkeit zum RDB

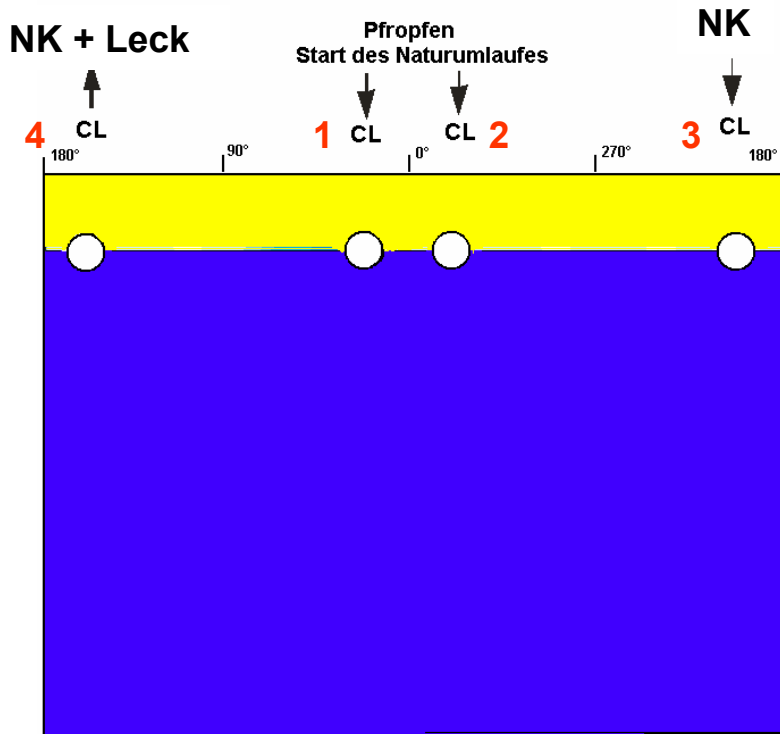


- **Volumenströme in den Schleifen (im Vergleich zu PKL)**

ROCOM-Versuch Szenario: "kalt/kalt"



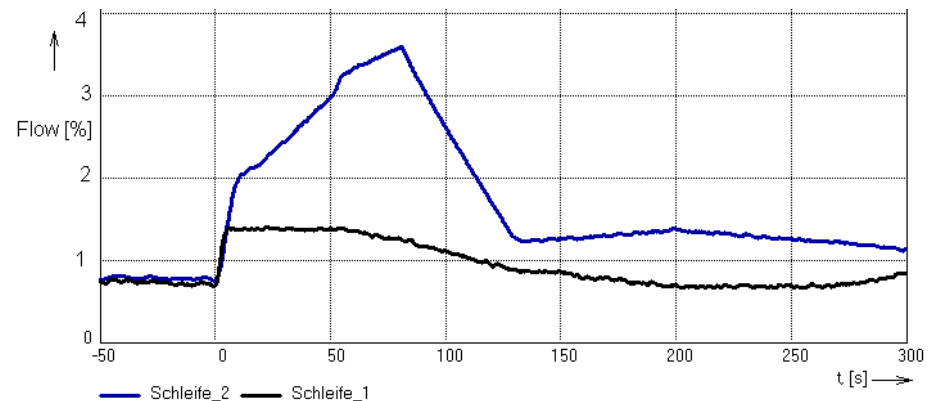
Randbedingungen für ROCOM



Downcomer abgewickelt

Temperaturschichtung im Downcomer

Position	T [°C]	ρ [kg/m ³]	$\Delta\rho/\rho_0$	C_B [ppm]
Pfropfen (Pumpenbogen)	170	892.8	0.995	50
Heisser Strang / DE / DC-oben	170	897.3	1.000	2500
RDB / DC-unten	70	978.0	1.090	2500
NK-Wasser	35	994.5	1.108	2500



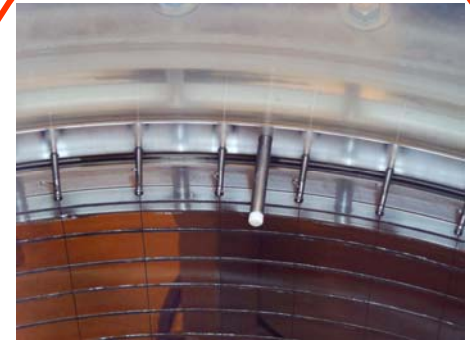
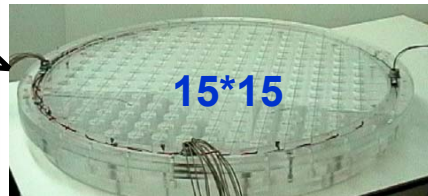
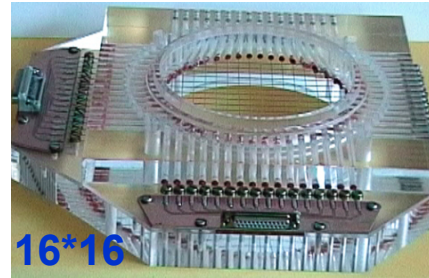
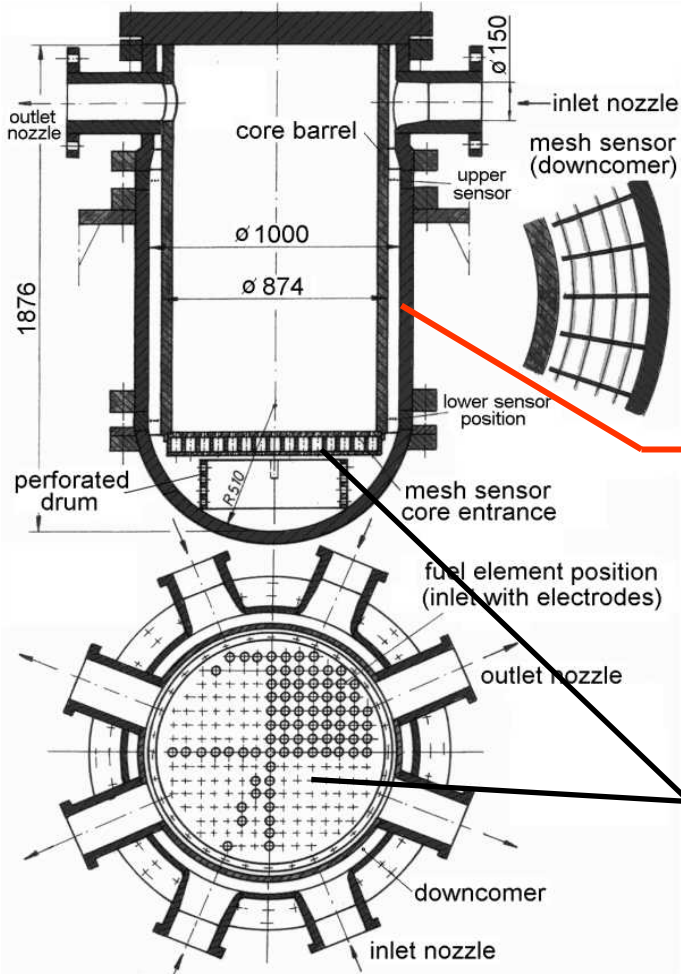
Volumenströme in Schleifen 1+2

ROCOM-Versuch Szenario: "kalt/kalt"



Erweiterung der Messtechnik

Neuer Sensor im Ringraum



ROCOM-Versuch Szenario: "kalt/kalt"

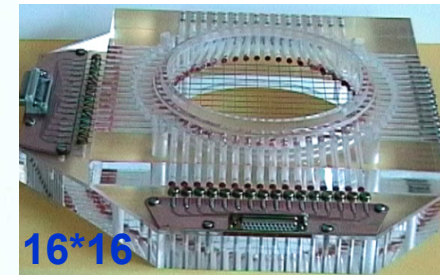
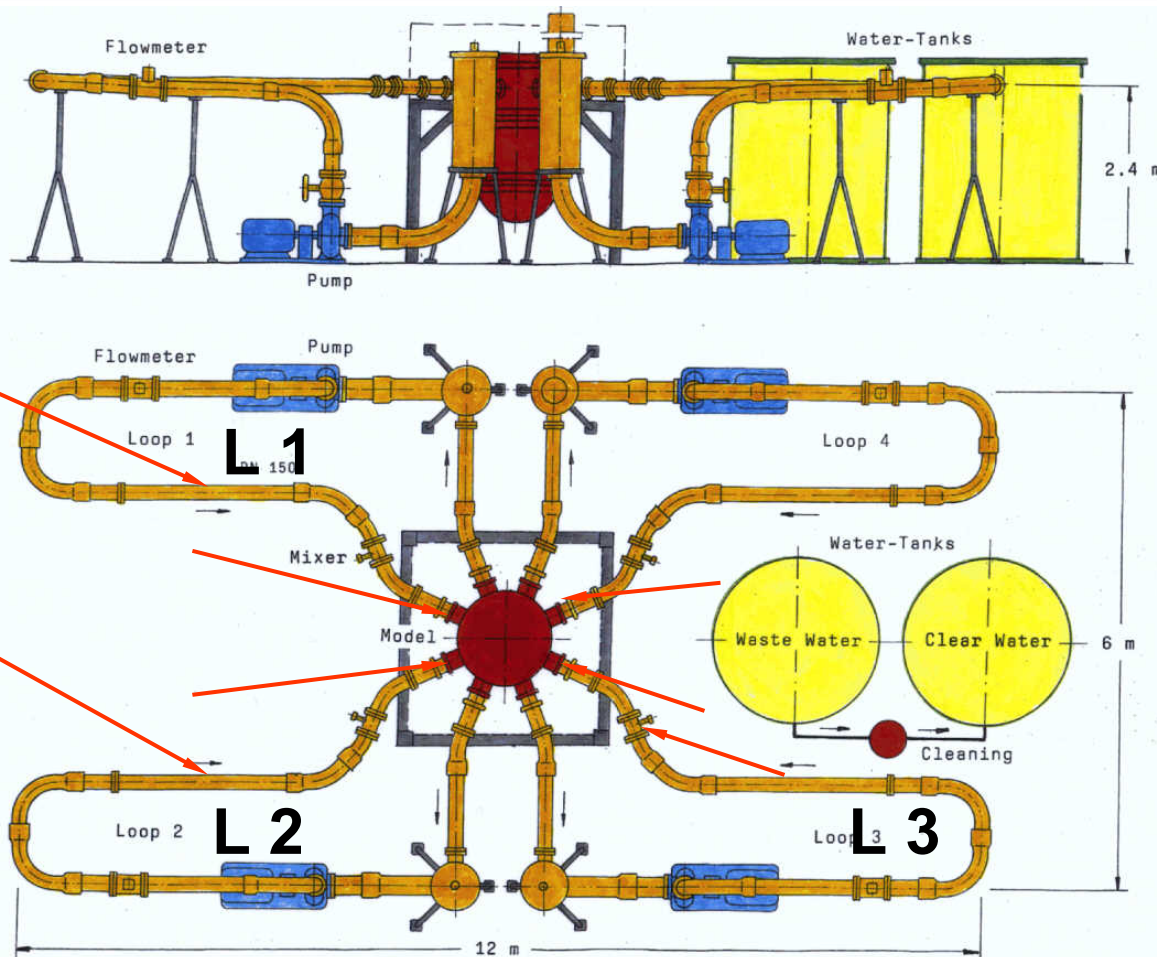


Forschungszentrum
Rossendorf

Member Institution of the
Scientific Association
Gottfried Wilhelm Leibniz

Institute of Safety Research

Erweiterung der Messtechnik



Positionen der Sensoren in den Schleifen

ROCOM-Versuch Szenario: "kalt/kalt"

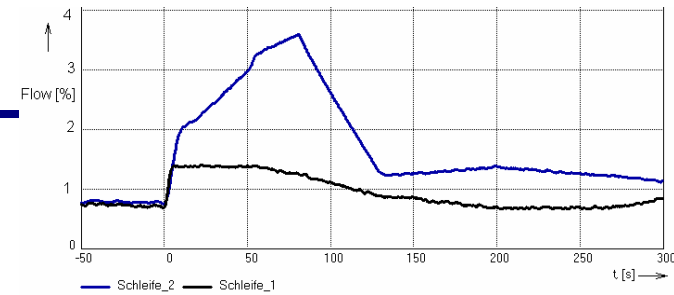
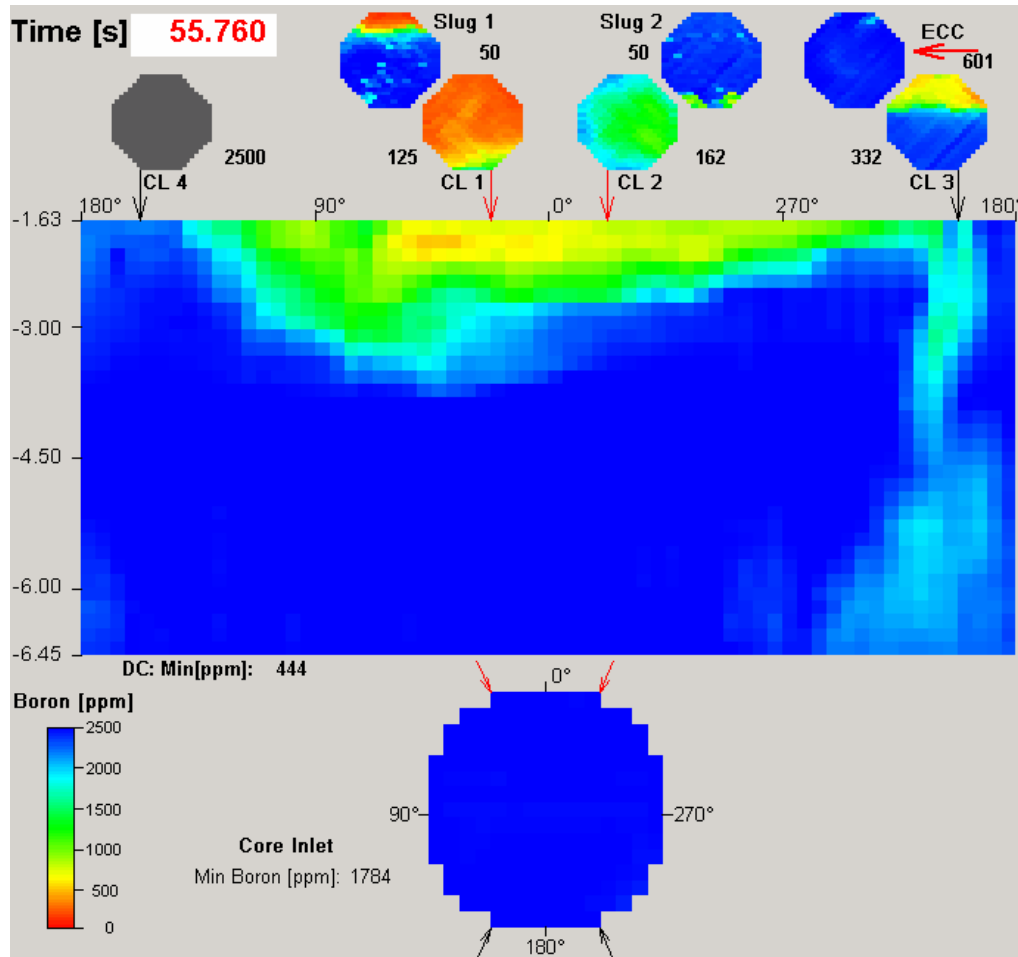


Forschungszentrum
Rossendorf

Member Institution of the
Scientific Association
Gottfried Wilhelm Leibniz

Institute of Safety Research

Ergebnisse



- **t = -20 s** **t = 160 s**

Schleife 1, 2:
Naturumlauf mit
Pfropfen

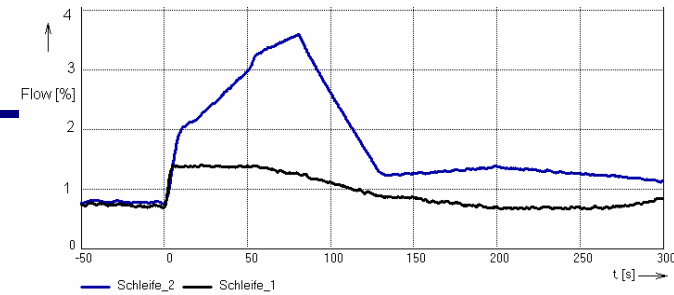
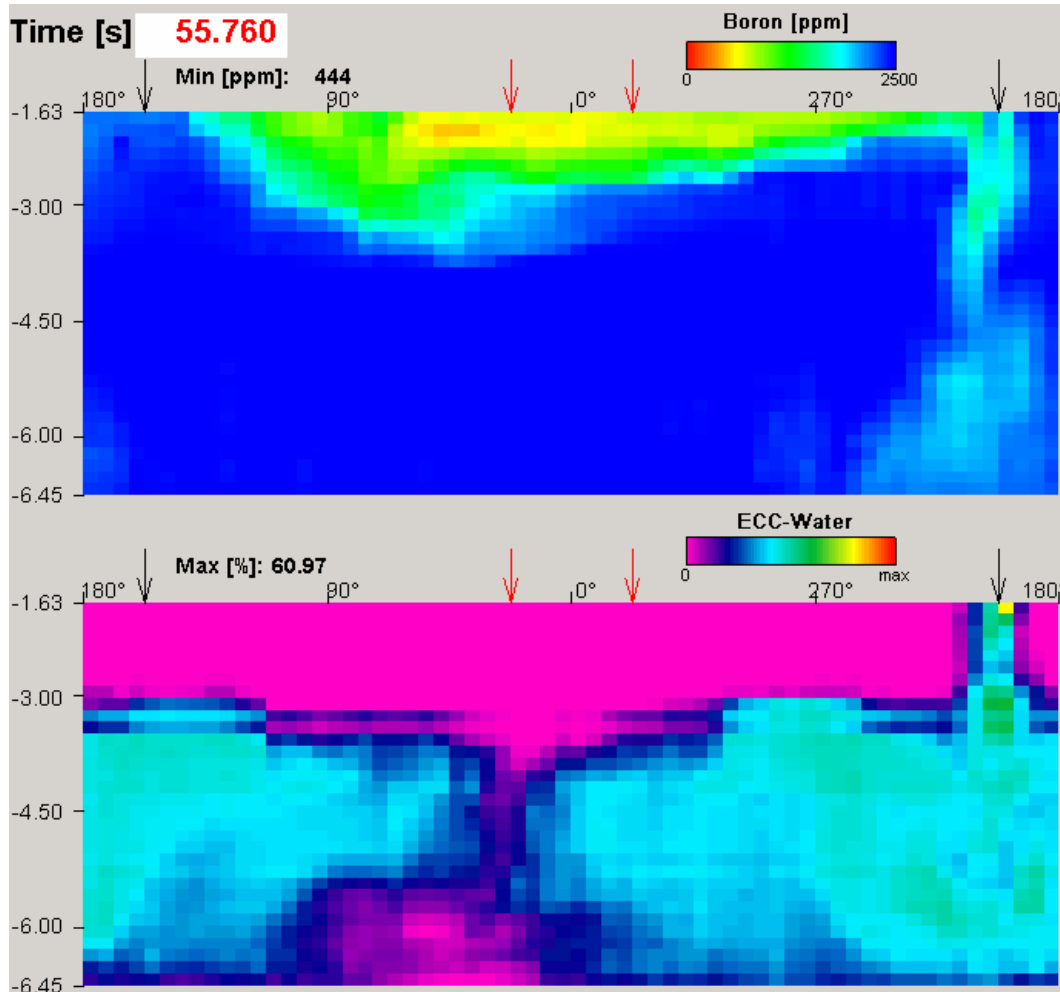
Schleife 3:
Notkühleinpeisung

- **Pfropfentransport und Vermischung im RDB**

ROCOM-Versuch Szenario: "kalt/kalt"



Ergebnisse



• t = 18 s

t = 220 s

Schleife 1, 2:
Naturumlauf mit
Pfropfen

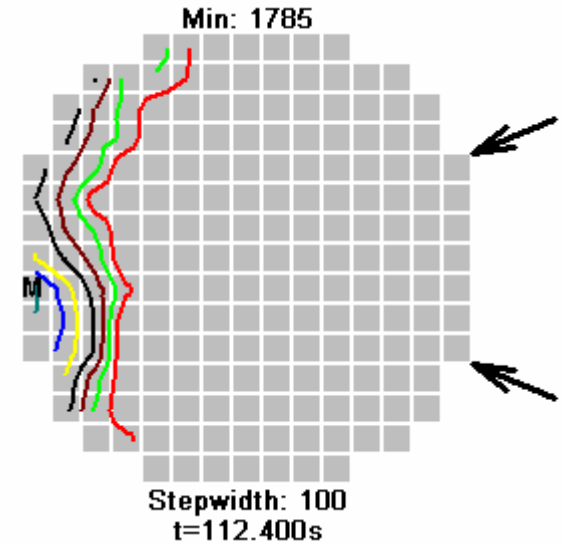
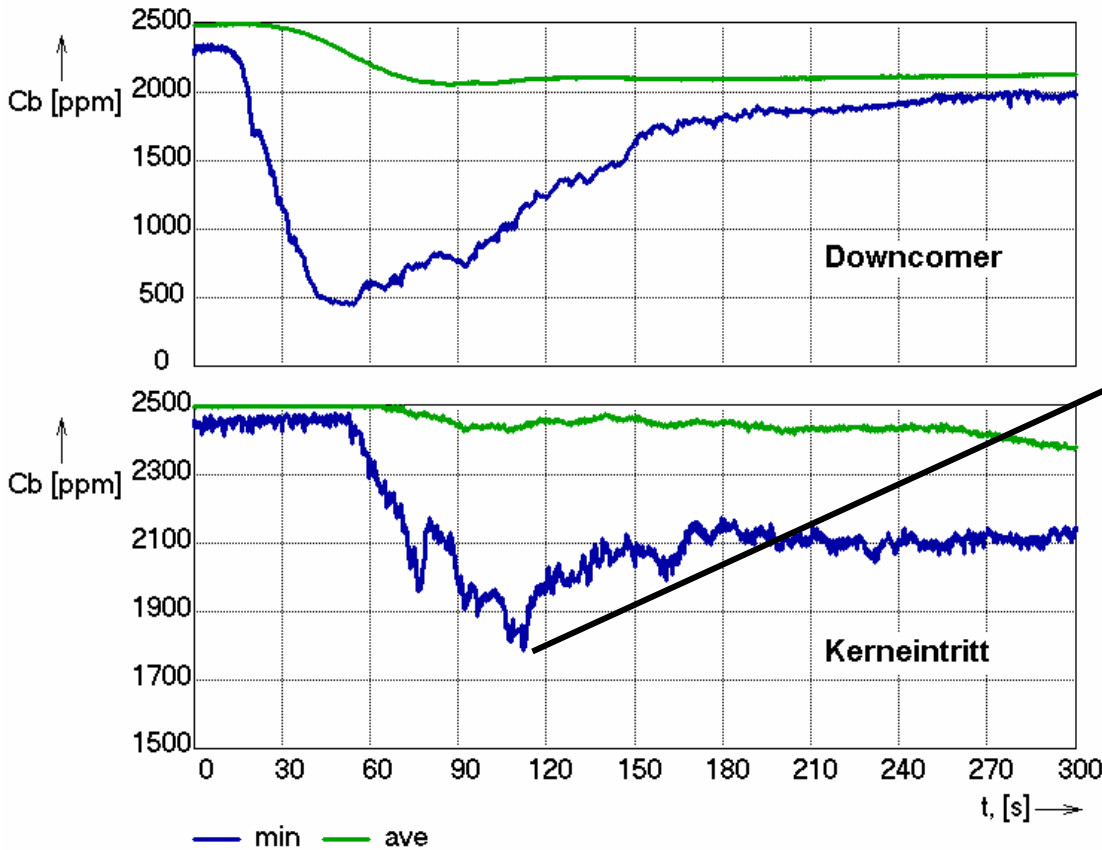
Schleife 3:
Notkühleinpeisung

- Vermischungsprozesse im Downcomer

ROCOM-Versuch Szenario: "kalt/kalt"

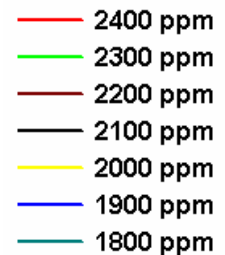


Ergebnisse



Borkonzentration am Kerneintritt ($t = t_{\max}$)

Legend:



• **Mittel- und Minimalwert der Borkonzentration im Downcomer und in der Kerneintrittsebene**

ROCOM-Versuch Szenario: "kalt/kalt"



Zusammenfassung

- **Experimente zur Kühlmittelvermischung im RDB in der Spätphase von postulierten Störfällen mit kleinem Leck**
 - Anlagen mit heißseitiger Vorzugslage der NK-Einspeisung (Szenario: "heiß/heiß")
 - Anlagen mit kaltseitiger Vorzugslage der NK-Einspeisung (Szenario: "kalt/kalt")
- **Abdeckende Randbedingungen**
 - Direkte Übernahme von Ergebnissen der Versuchsanlage PKL
 - Zusätzliche konservative Annahmen
- **Basierend auf den ROCOM-Ergebnissen: kein Szenario identifiziert, bei dem Reflux-Condenser Betrieb zur Rekritikalität führt**



SITZUNG I

Sitzungsleiter: V. Teschendorff (GRS)

Kenntnisstand zu unterstellten Borverdünnungsszenarien in DWR

PKL-Experimente zur Deborierung durch Reflux-Condenser-Betrieb

Klaus Umminger, Thomas Mull, Framatome ANP GmbH, Erlangen

PKL-Experimente zur Deborierung durch Reflux-Condenser-Betrieb

*Klaus Umminger, Thomas Mull
Framatome ANP, Erlangen*

1. Einleitung

Seit Beginn der 90-er Jahre richtet sich in der Reaktorsicherheitsforschung zunehmendes Interesse auf das Thema "Borverdünnung". Die sicherheitstechnische Bedeutung von Borverdünnungs-Szenarien liegt darin, dass der Eintrag von unboriertem oder schwach boriertem Wasser in den Kernbereich zu Rekritikalität und damit zu einer Leistungsexkursion führen könnte. Die Bewertung verschiedener Störfallszenarien, die Ereignisse mit Borverdünnung auslösen könnten, ergab, dass für Siemens-DWR insbesondere Störfälle mit kleinem Leck im Primärkreis unter diesem Gesichtspunkt untersucht werden sollten. Bei derartigen Störfällen kann es bei eingeschränkter Funktion der Notkühlsysteme vorübergehend zu einer deutlichen Reduzierung des Primärkreisinventars, zu Reflux Condenser-Bedingungen und damit zur sogenannten "inhärenten Borverdünnung" kommen. Wird im weiteren Störfallverlauf der Primärkreis wieder aufgefüllt, so stellt das Wiedereinsetzen des Naturumlaufs einen entscheidenden Vorgang dar.

Vor diesem Hintergrund wurden in der PKL Versuchsanlage noch in der 1999 abgeschlossenen Versuchsserie III D erste Untersuchungen zum Anlaufen von Naturumlauf bei Störfällen mit kleinem Leck im Primärkreis durchgeführt. Bei diesen Untersuchungen kam noch reines Deionat (ohne Zusatz von Borsäure) als Primärkühlmittel zum Einsatz. In der im Jahr 2000 begonnenen Versuchsserie PKL III E sowie in der aktuellen Versuchsserie PKL III F stellt die inhärente Borverdünnung bei Störfällen mit kleinem Primärleck ein zentrales Thema dar. Diese Versuche werden unter Einsatz von Borsäure und von Messtechnik zur Borkonzentrationsmessung durchgeführt. Dabei ist das Interesse an den untersuchten Störfällen nicht nur beschränkt auf die Betreiber, Gutachter und Hersteller von Siemens-DWR-Anlagen. Seit April 2001 wird das PKL-Vorhaben im Rahmen eines internationalen OECD (Organization for Economic Cooperation and Development) Projekts mit Beteiligung von 14 Partnerländern durchgeführt.

Neben der inhärenten Borverdünnung bei kleinem Primärleck werden in der aktuellen Versuchsserie auch Störfälle bei abgeschalteter Anlage untersucht. Auch im Verlauf derartiger Störfälle kann es unter bestimmten Umständen zu Reflux Condenser-ähnlichen Bedingungen und somit prinzipiell ebenfalls zu lokaler Borverdünnung kommen. Die hierzu in der PKL Anlage derzeit laufenden Untersuchungen werden bis Ende 2006 abgeschlossen.

Der vorliegende Beitrag konzentriert sich auf die Arbeiten zur inhärenten Borverdünnung nach kleinem Primärleck, die innerhalb der Versuchsserien PKL III E und PKL III F durchgeführt wurden. Die wesentlichen Ergebnisse der entsprechenden PKL Versuche werden aufgezeigt und die Übertragbarkeit sowie die Bedeutung für den DWR-Anlagenbetrieb werden diskutiert

2. PKL Versuchsanlage

Die Großversuchsanlage PKL ist die skalierte Nachbildung eines KWU-Druckwasserreaktors (DWR) mit einer elektrischen Leistung von 1300 MW. Referenzanlage ist das Kernkraftwerk Philippsburg 2. Die PKL-Anlage bildet die gesamte Primärseite und wesentliche Teile der Sekundärseite (ohne Turbine und Kondensator) der Referenzanlage im Höhenmaßstab 1:1 nach. Volumina, Leistungen und Massenströme sind im Maßstab 1:145 skaliert. Die Versuchsanlage verfügt, wie der Referenz-DWR, über 4 Primärkreisstränge, die symmetrisch um den Reaktordruckbehälter (RDB) angeordnet sind. Der Reaktorkern wird in der Versuchsanlage durch ein Bündel von 314 elektrisch beheizten Stäben mit einer Gesamtleistung von 2,5 MW entsprechend 10 % Nennleistung simuliert. Der Maximaldruck der Primärseite ist auf 45 bar begrenzt.

3. PKL-Versuche zur inhärenten Borverdünnung bei kleinem Primärleck

3.1 Zielsetzung der Versuche

Zu inhärenter Borverdünnung kann es im DWR kommen, wenn ein kleines Leck im Primärkreis auftritt und wenn nur ein Teil der Sicherheitseinspeisepumpen (SEP) bestimmungsgemäß funktioniert. Unter diesen Bedingungen ist die Leckrate bei hohem Druck größer als die Einspeiserate der SEP und es kommt zu einer Reduzierung des Primärkreisinventars. Vorübergehend wird deshalb Energie vom Kern im Reflux Condenser-Modus an die Dampferzeuger übertragen¹. Bor gelangt nur in geringem Umfang in die Dampfphase. Daher ist das in den Dampferzeugern produzierte Kondensat weitgehend entboriert. Dieses Kondensat kann sich an bestimmten Orten im Primärkreis ansammeln, insbesondere in den Pumpenbögen. Bei niedrigerem Druck übersteigt die Einspeiserate des Notkühlsystems die Leckrate und der Primärkreis wird wieder aufgefüllt. Setzt dann Naturumlauf ein, so werden die minder borierten Wassermassen in Richtung Kern transportiert. Wenn keine hinreichende Vermischung mit borierten Wassermassen stattfinden und der Naturumlauf in allen Loops gleichzeitig anlaufen würde, wäre eine lokale Kritikalität des Reaktorkerns nicht auszuschließen.

¹ RELAP-Analysen zufolge kommt es zu einer zeitweisen Energieabfuhr im Reflux Condenser-Modus und zur Bildung relevanter Kondensatmengen (bei Verfügbarkeit von nur 2 von 4 HD-SEP) nur bei Leckgrößen zwischen 10 und 70 cm²

Eine etwaige Rekritikalität hängt entscheidend von folgenden Randbedingungen ab:

- Größe der entstehenden "Kondensatpfropfen"
- Vermischung in den Dampferzeugern und beim Transport der Pfropfen durch die Loops mit höher boriiertem Wasser
- Intensität der Anlauftransienten des Naturumlafs (Durchsatz)
- Zeitlicher Versatz zwischen dem Beginn von Naturumlauf in unterschiedlichen Loops
- Vermischung mit höher boriiertem Wasser im Ringraum des RDB und im unteren Plenum

Die ersten vier genannten Punkte sind Gegenstand der Untersuchungen in der PKL-Versuchsanlage. Für die reaktorgerechte Nachbildung von Vermischungsvorgängen im Fallraum des RDB und im unteren Plenum sind dagegen Versuchsanlagen, in denen die relevanten Komponenten in Originalgeometrie oder zumindest in einem größeren Maßstab nachgebildet werden, besser geeignet. Untersuchungen im Maßstab 1:1 wurden hierzu im Rahmen des UPTF TRAM-Projekts durchgeführt. Weitere umfangreiche Untersuchungen zum Vermischen im RDB-Fallraum und im unteren Plenum mit speziell für die relevanten Störfallszenarien angepassten Randbedingungen wurden zudem in den letzten Jahren in der ROCOM-Versuchsanlage vorgenommen. Dabei wurden die aus PKL-Versuchen gewonnenen Ergebnisse hinsichtlich Naturumlauf in den einzelnen Loops sowie die Beschaffenheit der schwach boriierten Pfropfen (Größe, Borkonzentrationsverteilung) am Eintritt zum RDB als Randbedingungen für die ROCOM Versuche herangezogen (siehe nachfolgenden Beitrag). Darüber hinaus stellen die PKL Versuchsergebnisse eine wertvolle Datenbasis für die Validierung von Rechenprogrammen dar, die zur analytischen Behandlung dieser Thematik eingesetzt werden und liefern somit insgesamt einen wichtigen Beitrag zur Bewertung von Entborierungsereignissen in DWRs.

3.2 Generelle Randbedingungen bei der Durchführung der PKL Versuche

Da der maximale Primärdruck in der PKL-Anlage 45 bar beträgt, ist die Nachbildung der Störfalltransienten im oberen Druckbereich (ausgehend vom Betriebsdruck der DWR-Anlagen bei 160 bar) nicht möglich. In den Versuchen erfolgt daher der "Einstieg" in die Störfalltransiente typischerweise bei einem Primärdruck von etwa 40 bar mit Anfangsbedingungen, die im DWR zu diesem Zeitpunkt (d.h. wenn der Primärdruck im DWR 40 bar erreicht hat) vorliegen würden. Die speziellen Anfangsbedingungen der Versuche ergeben sich dabei aus Analysen mit S-RELAP 5 oder anderen Thermohydraulik-Codes, die mit DWR-Geometrie und den entsprechenden Randbedingungen durchgeführt werden.

Entsprechend der in den deutschen DWR-Anlagen bei kleinem Primärleck automatisch eingeleiteten Abkühlung der Sekundärseiten mit 100 K/h wird ein Druckniveau von 40 bar ca. 0,5 h nach Störfalleintritt und Reaktorschnellabschaltung erreicht. Bei diesem Druck und

einer entsprechenden Nachzerfallsleistung beginnt im Allgemeinen die Nachbildung des DWR-Störfalls in den PKL-Versuchen (d.h. bei bereits reduziertem Primärkreisinventar).

Die Nachbildung des weiteren Störfallablaufs erfolgt dann im Original-Druckbereich. Die Tatsache, dass der obere Druckbereich nicht nachgebildet wird, hat auf die Aussagekraft der Versuche i.A. keinen nennenswerten Einfluss, da sich die hinsichtlich der Borthematik relevanten Vorgänge (der Großteil der Reflux Condenser-Phase, das Auffüllen des Primärkreises, das Anlaufen von Naturumlauf und die Verlagerung von minder borisiertem Wasser in Richtung RDB) auch im DWR in der Regel im unteren Druckbereich abspielen würden.

Die PKL-Versuche werden nach Möglichkeit unter konservativen Randbedingungen durchgeführt. Das bedeutet, dass für einen bestimmten (ohnehin sehr unwahrscheinlichen) Störfall häufig nicht der Ereignispfad mit der größten Eintrittswahrscheinlichkeit detailliert nachgebildet wird, sondern ein Ereignispfad, der einen besonders ungünstigen Fall in Bezug auf Rekritikalität durch Borverdünnung darstellt. Entsprechend den oben aufgezählten Einflussfaktoren können die Randbedingungen von PKL-Versuchen zur inhärenten Borverdünnung nach kleinem Primärleck in zweierlei Hinsicht konservativ gewählt werden:

- Hinsichtlich des zeitlichen Versatzes des Beginns von Naturumlauf:
Bei diesen Versuchen werden die Randbedingungen so gewählt, dass sie ein Loop-simultanes Einsetzen von Naturumlauf begünstigen, denn ein solcher, simultaner Beginn von Naturumlauf würde bedeuten, dass die Kondensatpfropfen aus allen Loops den RDB gleichzeitig erreichen und dass deshalb die Borkonzentration am Kerneintritt besonders weit absinkt.
- Hinsichtlich des Umfangs der angesammelten Kondensatmassen:
Bei diesen Versuchen werden die Randbedingungen so gewählt, dass der Kondensatanfall groß und der Einfluss von Vermischungsvorgängen klein ist.

Bei Versuchen der ersten Art werden alle vier Loops des Primärkreises symmetrisch mit Notkühlwasser (NKW) bespeist. Hierzu ist anzumerken, dass es in KWU-DWR-Anlagen bei Verfügbarkeit aller vier SEP nicht zum Reflux Condenser-Betrieb kommt, da in diesem Fall die Sekundärseite nicht zur Energieabfuhr gebraucht wird. Für die Versuche wurden in einer Versuchsvorphase trotzdem Kondensatpfropfen erzeugt. Bei Versuchen der zweiten Kategorie werden - zumindest im Hochdruck-Bereich - nicht alle Loops bespeist und die Leckgröße wird so gewählt, dass mit einer maximalen Ansammlung von Kondensat zu rechnen ist.

4. Wesentliche Versuchsergebnisse

In den Versuchsserien PKL III E und F wurden bis heute insgesamt 8 Integralversuche mit Einsatz von Bor zum Thema Borverdünnung bei kleinen Lecks durchgeführt. Dabei erfolgte in 3 Versuchen (E1.1, E2.1 und F1.1) die Einspeisung von Notkühlwasser symmetrisch in alle 4 Primärkreisläufe. In 4 Versuchen (E2.2, E2.3, F1.3 und F1.4) wurde die Verfügbarkeit von 2 von 4 Sicherheitseinspeisepumpen unterstellt. In einem weiteren Versuch (F1.2) wurde im Rahmen einer Parameterstudie die Ansammlung von Kondensat systematisch in Abhängigkeit vom primärseitigen Wasserinventar untersucht. Die hier dargestellten Ergebnisse konzentrieren sich auf die Versuche mit asymmetrischer Bespeisung, da das Auftreten von Reflux Condenser Bedingungen und damit die Ansammlung von Kondensat in den deutschen Anlagen nur bei eingeschränkter Verfügbarkeit der SEP zu erwarten ist. Im Anschluss daran werden auch die wesentlichen Ergebnisse der mit symmetrischer Bespeisung durchgeführten Versuche kurz zusammengefasst.

4.1 Versuche mit Verfügbarkeit von 2 SEP (asymmetrische Bespeisung)

4.1.1 Leck und Einspeisung kaltseitig (E2.2, F1.4)

Versuch E 2.2

Der Versuch E2.2, bei dem angenommen wurde, dass nur zwei von vier SEP zur Verfügung stehen, fällt in die 2. Kategorie entsprechend der weiter oben gemachten Einteilung: die Versuchsrandbedingungen sind konservativ hinsichtlich des Umfangs der akkumulierten Kondensatmassen.

RELAP-Rechnungen zum gesamten Größenspektrum kleiner Lecks wiesen darauf hin, dass die größten angesammelten Kondensatmassen bei kaltseitigem Leck dann zu erwarten sind, wenn auch die Einspeisung von NKW durch die SEP kaltseitig erfolgt und wenn das Leck gerade so groß ist, dass es einerseits zu einer langen Reflux Condenser-Phase kommt, dass aber andererseits der Pegel des primärseitig vorliegenden Wasser/Dampf-Gemisches in der gesamten Reflux Condenser-Phase nicht unter die Oberkante der (heißseitigen) Hauptkühlmittelleitung (HKL) abfällt. Aufgrund des hohen Pegels sagen die Rechnungen und Abschätzungen vorher, dass sich dann nicht nur in den Pumpenbögen, sondern auch in den heißen Strängen und DE-Kalotten Zonen mit minder boriertem Wasser ausbilden können. Im Versuch E2.2 wurde genau dieses Szenario nachgebildet.

Die wichtigsten Ergebnisse speziell in dieser Hinsicht lassen sich wie folgt formulieren:

Obwohl in der Versuchsvorphase unter Reflux Condenser Bedingungen konservativerweise ein Mehrfaches an Kondensat produziert wurde als im DWR bis zu einem Primärdruck von

40 bar produziert würde, waren die akkumulierbaren Kondensatpfropfen deutlich kleiner, als nach Thermohydraulik-Analysen (RELAP etc.) angenommen werden musste, und zwar aus zwei Gründen:

- Durch Vermischungsvorgänge aufgrund der Dampfströmung vom Kern zu den Dampferzeugern können sich beim Auffüllvorgang in den DE-Eintrittskammern und in den Heißsträngen keine Wassermassen mit $[B] < 1000$ ppm unvermischt halten.
- Anders als in den Thermohydraulik-Analysen kommt es im Versuch zu Strömungsvorgängen durch einzelne U-Rohre, sobald die DE-Austrittskammern bis zu den Rohrböden mit Kühlmittel gefüllt sind. Dadurch wird boriertes Wasser von der DE-Eintritts- auf die DE-Austrittsseite verlagert, was wiederum die Ansammlung von minder boriertem Wasser in den Austrittskammern und Pumpenbögen stört bzw. verhindert. Daher kommt es kaltseitig nur dann zur Akkumulierung von Kondensat, wenn das U-Rohrbündel austrittsseitig entleert ist. Das ist eine deutliche Einschränkung des Volumens, das für die Ansammlung von Kondensat in Frage kommt. Dies gilt umso mehr, als es bei teilgefülltem Primärsystem im Auffüllvorgang stets zu Pegelschwankungen auch in den DE-Austrittskammern kommt. Aufgrund dieser Pegelschwankungen kommt es kaltseitig nur dann zu einer stabilen Ansammlung von Kondensat, wenn die Pegel im zeitlichen Mittel einen gewissen Abstand zum Rohrboden haben.

Ein weiteres, wichtiges Resultat besteht darin, dass Naturumlauf in den unterschiedlichen Loops zu unterschiedlichen Zeitpunkten einsetzt. Umlauf setzt zuerst in den beiden unbespeisten Loops ein, wobei auch zwischen diesen beiden Loops ein zeitlicher Versatz zu beobachten ist. Demzufolge erreichen auch die schwach borierten Pfropfen aus den beiden unbespeisten Loops den RDB zeitlich deutlich versetzt. Durch Vermischung mit höher boriertem Wasser während der Wiederauffüllphase und nach dem Einsetzen von Umlauf kam es zu einer „Aufweichung“ des ursprünglich in der Reflux Condenser Phase im Pumpenbogen akkumulierten Kondensat-Pfropfens. Dies bedeutet, dass die minimale Borkonzentration im Pfropfen am Eintritt zum RDB nach Einsetzen von Umlauf in den nicht bespeisten Loops deutlich höher war als in dem ursprünglich im Pumpenbogen akkumulierten Pfropfen. In den mit Notkühlwasser bespeisten Loops trat – wie auch in allen anderen Versuchen beobachtet – nach Einsetzen von Umlauf keine signifikante Absenkung der Borkonzentration am RDB Eintritt auf.

Versuch F1.4

Bei dem oben beschriebenen Versuch E2.2 kam es nach Unterschreitung eines Primärdrucks von 10 bar zum Ansprechen der ND-Einspeisepumpen (heiß- und kaltseitig in 2 Loops). Andererseits wurde – insbesondere auf Wunsch der ausländischen Partner – bei diesem Versuch auf die Einspeisung mit den Druckspeichern verzichtet. Nachdem seitens

der Gutachter darauf hingewiesen wurde, dass gerade für Szenarien ohne ND-Einspeisung und mit Einspeisung (vor allem der heißseitigen) Druckspeicher sich unter Umständen ungünstigere Bedingungen hinsichtlich Borverdünnung ergeben könnten, wurde gemeinsam von den Betreibern, GRS/TÜV und Framatome ANP ein weiterer Versuch (F1.4) mit kaltseitiger Einspeisung (in 2 Lops) definiert, um auch diesen Aspekt abdeckend zu behandeln. Die gemeinsam abgestimmten Randbedingungen und die Fahrweise für diesen Versuch wurden ganz gezielt auf DWR-Anlagen mit vorzugsweise kaltseitiger Notkühl-einspeisung ausgerichtet (KKU, Biblis A/B, GKN1), wobei hier konservativ abdeckend vor allem die Randbedingungen des KKU (höhere Leistung, größerer Abfahrgradient von 120 K/h) zugrunde gelegt wurde. Neben der Einspeisung mit 2 kaltseitigen SEP wurde wie in den entsprechenden DRW-Anlagen ab 26 bar die Bespeisung aus den Druckspeichern, die sowohl heiß- als auch kaltseitig (kein Absperren der kaltseitigen Druckspeicher) einspeisen, realisiert. Die Leckgröße war so ausgelegt, dass der Druck vor Auffüllen des Primärkreises nicht unter 10 bar sank, so dass keine Einspeisung mit den ND-Pumpen erfolgte.

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass auch unter diesen Randbedingungen ein Eintrag von schwächer boriertem Wasser in den RDB nur in den nicht mit SEP bespeisten Loops auftritt. Dabei werden die Pfropfen in diesen Loops schon vor dem Einsetzen von kontinuierlichem Umlauf durch diskontinuierliche Inventarverlagerungen bei sehr kleinen Massenströmen aus dem Pumpenbogen in den RDB verlagert, was zudem in den beiden nicht bespeisten Loops zu unterschiedliche Zeiten erfolgte. Außerdem kam es zu durch Übertrag von boriertem Wasser über die Dampferzeuger schon bei geringem Wasserinventar sowie durch Dampfbildung infolge des Abfahrens und durch die Druckspeicher-Einspeisung in die kalten Stränge zu einem effektiven Vermischen der schwach borierten Pfropfen mit höher boriertem Wasser. Die Konsequenz war, dass – wie auch in allen anderen Versuchen – die minimale Borkonzentration am RDB Eintritt deutlich über der minimalen Borkonzentration in den ursprünglich während der Reflux Condenser Phase angesammelten Wasserpfropfen lag.

4.1.2 Leck und Einspeisung heißseitig (E2.3, F1.3)

Versuch E 2.3

Im Versuch E2.3 wurde ein Szenario mit heißseitigem Leck ($50 \text{ cm}^2/145$) und heißseitiger Einspeisung von Notkühlwasser mit zwei SEP nachgebildet, wobei das Leck in einem der bespeisten Loops lag. Zur Abdeckung konservativer Annahmen wurde der Versuchsanfangszustand durch eine entsprechende Fahrweise so eingestellt, dass die Dampferzeuger in den 2 Loops ohne Einspeisung von Notkühlwasser unter Reflux Condenser-Bedingungen Energie zur Sekundärseite abführten, während in den beiden heißseitig durch SEP bespeisten Loops Naturumlauf bestand und das eingespeiste NKW mit dem Naturumlauf in Richtung Dampferzeuger transportiert wurde. Dazu war es erforderlich, in der Phase vor

Versuchsbeginn einen größeren Leckquerschnitt (entspr. 75 cm^2 im DWR) als im Versuch selbst einzusetzen. Außerdem musste in der Versuchsvorphase im Kern eine deutlich erhöhte Leistung zugeführt werden, andernfalls wäre es nicht zur Bildung von Kondensat und zur Erhaltung des Umlaufs in den bespeisten Loops gekommen. Der mit diesem Anfangszustand beginnende Versuch E2.3 bildete eine unterstellte DWR-Transiente ("LOBI-Transiente") nach, die hinsichtlich der inhärenten Borverdünnung zwei besonders ungünstige Aspekte vereinigt:

1.: Wenn das heißseitig eingespeiste Notkühlwasser, wie unterstellt, in Richtung des Naturumlafs zu den Dampferzeugern hin umgelenkt wird, liegt beim 100 K/h-Abfahren die Sekundärtemperatur dieser Dampferzeuger über der DE-Eintrittstemperatur. Es wird Energie von der Sekundär- auf die Primärseite übertragen. In den Loops ohne Einspeisung, wo Reflex Condenser-Bedingungen vorliegen, fällt daher umso mehr Kondensat an.

2.: Setzt der Naturumlauf nach dem Wiederauffüllen auch in den unbespeisten Loops wieder ein und werden die zwischenzeitlich akkumulierten Kondensatmassen zum RDB hin transportiert, so bestehen dort eventuell ungünstige Bedingungen für die Vermischung mit hoch borierterem Kühlmittel (gleichzeitige Durchströmung aller Loops mit vergleichbar großen Durchsätzen und kein direkter Eintrag von Notkühlwasser durch den Kern ins untere Plenum). Es zeigte sich jedoch, dass zur Kondensatakkumulation nur das relativ kleine Volumen der Pumpenbögen bis zur Höhe der HKL-Unterkante zur Verfügung steht. Vorarbeiten zu diesem Versuch hatten nämlich ergeben, dass es auch unter den hier gegebenen Randbedingungen zu den Strömungsvorgängen über die Dampferzeuger kommt, die im Abschnitt 4.1.1 beschrieben wurden, wenn die Pegel höher eingestellt werden.

Vor Versuchsbeginn wurde eine Menge von Kondensat in den Dampferzeugern ohne Einspeisung produziert, die entsprechend einer ATHLET-Rechnung bis zum Erreichen von 40 bar im DWR angefallen wäre. Mit Versuchsbeginn und damit Wirksamwerden des 100 K/h-Abfahrens kam es zu einem raschen Auffüllen der Dampferzeuger in den Loops ohne NKW-Einspeisung und zu einem sehr frühzeitigen Einsetzen von Naturumlauf in diesen Loops, wobei der Naturumlauf in den beiden Loops zeitlich versetzt begann. Die Kondensatansammlungen erreichten den RDB deshalb ebenfalls zeitlich versetzt. Das niedrig borierte Kühlmittel wurde mit moderaten Massenstromraten zum RDB transportiert. Zur entsprechenden Zeit waren die Massenströme in den mit Notkühlwasser bespeisten Loops mehr als doppelt so groß.

Das rasche Wiederauffüllen und das dadurch bedingte Einsetzen einer langsamen Strömung in den nicht bespeisten Loops bereits kurz nach Versuchsbeginn deutet darauf hin, dass es bei einem Leck entsprechender Größe im DWR nicht zu einer so weit gehenden Entleerung des Primärkreises gekommen wäre, wie sie für den Versuchsbeginn eingestellt wurde. Hierzu hätte das Leck im DWR größer sein müssen. Gleichzeitig ist aus einem Vorversuch

bekannt, dass ein Leckquerschnitt von 75 cm^2 (bezogen auf DWR) während des eigentlichen Versuches bereits zu einer so weitgehenden Entleerung des Primärkreises führt, dass der Naturumlauf auch in den bespeisten Loops zum Erliegen kommt. Dies deutet darauf hin, dass das unterstellte und in der PKL-Anlage unter stationären Bedingungen nur durch eine reaktoruntypische Fahrweise einstellbare Szenario im DWR - wenn überhaupt - dann nur in einem sehr schmalen Bereich des Leck-Spektrums auftreten könnte.

Versuch F1.3

Wie oben erwähnt, ist aufgrund der Erfahrungen bei der Realisierung der Startbedingungen und aus den Vorarbeiten für den Versuch E 2.3 das Auftreten des sog. LOBI-Szenarios für den DWR als sehr unwahrscheinlich zu bezeichnen. Wird ein kleines Leck im heißen Strang und die Verfügbarkeit von 2 heißseitigen Sicherheitseinspeisepumpen unterstellt, dann ist für das relevante Leckspektrum viel eher von einer Unterbrechung des Umlaufes und mit dem Einstellen von Reflux Condenser Bedingungen in allen 4 Loops auszugehen. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde ein weiterer Versuch (F1.3) mit heißseitigem Leck und Einspeisung mit 2 heißseitigen Sicherheitseinspeisepumpen definiert, der bei 40 bar mit unterbrochenem Umlauf in allen Loops begonnen wurde, nachdem in den Dampferzeugern die vorgegebene Kondensatmenge (entsprechend RELAP Analysen) produziert worden war. Nach Einleiten des 100 K/h-Abfahrens erfolgte dann bei einem Druck von 26 bar die Einspeisung mit 4 Druckspeichern heißseitig und bei 10 bar die Einspeisung mit den ND-Pumpen (in 2 Loops heiß- und kaltseitig).

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass Naturumlauf überhaupt nur in den beiden nicht mit SEP bzw. ND-Pumpen bespeisten Loops (und hier zu unterschiedlichen Zeiten) einsetzt, Das Einsetzen von Umlauf erfolgt bei kleinen Massenströmen, da zu diesem Zeitpunkt der Kern einphasig ist und zudem die heißseitige Einspeisung von kaltem Wasser sich generell bremsend auf den Naturumlauf auswirkt. Auch bei diesem Versuch tritt bei Beginn von Naturumlauf nur eine geringe Absenkung der Borkonzentration am Eintritt zum RDB auf (B_{\min} ca. 1600 ppm), obwohl in den Pumpenbögen zuvor in der Reflux Condenser Phase Kondensatpfropfen mit Borkonzentrationen $< 50 \text{ ppm}$ akkumuliert worden waren. Ursache dafür sind auch hier Vermischungsvorgänge in den Pumpenbögen und in den Dampferzeugern vor und nach dem Einsetzen von Umlauf. Während des Wiederauffüllens wird die kalte Seite mit borierterem Wasser aus der heißseitigen Einspeisung „rückwärts“ über den Kern, den RDB-Fallraum und die Pumpenbögen aufgefüllt. In den Pumpenbögen wird die Vermischung durch Verdampfungsvorgänge als Folge der Druckabsenkung zusätzlich unterstützt. Ein weiteres Vermischungspotential besteht darin, dass Umlauf in den beiden betroffenen Dampferzeugern nicht in allen U-Rohren gleichzeitig sondern zunächst nur in einigen wenigen U-Rohren beginnt.

4.2 Versuche mit symmetrischer Bespeisung in alle 4 Loops (E1.1, E2.1, F1.1)

Die Versuche E1.1 und E2.1 sind als Grundlagenversuche zu sehen, um den o.e. Aspekt maximaler Loop-Symmetrie abdeckend zu behandeln und sind daher nicht als Nachbildung konkreter DWR Transienten zu betrachten. Die Versuche sollten das Anlaufen von Naturumlauf unter maximal symmetrischen Bedingungen für kaltseitige Einspeisung (E1.1) und heißseitige Einspeisung (E2.1) mit für deutsche Anlagen typischen Einspeiseraten untersuchen.

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass es auch bei symmetrischer Bespeisung nicht zu einem gleichzeitigen Anlaufen von Umlauf in den einzelnen Loops kommt. Durch die hohen Einspeisemengen wird ein Großteil der Nachzerfallsleistung gebunden und die Dampferzeuger werden zur Wärmeabfuhr nur im geringen Maße benötigt. Ein Umstand, der dem Anlaufen von Naturumlauf eher entgegen wirkt. Darüber hinaus ergibt sich durch die symmetrische Bespeisung ein großes Aufborierungspotential für die ursprünglich produzierten und akkumulierten Kondensatpfropfen. Obwohl in beiden Versuchen in der Reflux Condenser Phase schwach borierte Pfropfen (< 50 ppm) vorgelegt wurden, lag aufgrund der Vermischungsvorgänge während des Wiederauffüllens die kurzzeitig am RDB Eintritt gemessene minimale Borkonzentration bei 1700 ppm.

Der Versuch F1.1 wurde ebenfalls mit symmetrischer Bespeisung aller 4 Loops (kaltseitig) durchgeführt, wobei hier eine für Framatome- bzw. Westinghouse-Anlagen typische Einspeisekonfiguration nachgebildet wurde. Dies bedeutet, dass trotz Verfügbarkeit von nur einer (von zwei) Einspeisepumpen durch die Einspeisung über einen Verteiler alle Loops – allerdings mit jeweils deutlich kleineren Einspeiseraten – beaufschlagt werden. Auch für diese Einspeisekonfiguration wurden die oben aufgeführten Ergebnisse für symmetrische Bespeisung (kein gleichzeitiges Einsetzen von Umlauf, relativ geringe Absenkung der Borkonzentration am RDB Eintritt) bestätigt.

5. Zusammenfassung der Ergebnisse

Durch die in der PKL Anlage mit Borsäure und messtechnischer Erfassung lokaler Borkonzentrationen durchgeführten Versuche zur Borverdünnung bei kleinen Lecks wurde experimentell bestätigt, dass im DWR unter Reflux Condenser-Bedingungen (d.h. für ein bestimmtes Leckspektrum und reduzierte Verfügbarkeit der SEP) mit der Bildung und Ansammlung von schwach borierten Kondensatpfropfen gerechnet werden muss. Die Versuche zeigen aber auch, dass die maximal mögliche Größe schwach borierten Pfropfen deutlich kleiner ist als ursprünglich vor der Durchführung dieser Versuche unterstellt wurde. Die maximale Ausdehnung von Kondensatpfropfen ist auf das Volumen eines Pumpenbogens und eines Teils der DE-Austrittskammer begrenzt.

Alle bisher durchgeführten PKL-Versuche hatten gemeinsam, dass bei den jeweils unterstellten Randbedingungen Naturumlauf nach bzw. beim Wiederauffüllen des Primärkreises zeitlich versetzt zwischen den einzelnen Primärkreisläufen begann, so dass die messtechnisch nachgewiesenen Kondensatpfropfen aus den einzelnen Loops den RDB nicht gleichzeitig erreichten. Das trifft auch für die Versuche mit symmetrischer Bespeisung der vier Primärkreisläufe zu. Generell begann Umlauf zuerst in den nicht mit Notkühlwasser bespeisten Loops (soweit vorhanden).

Beim Beginn von Umlauf in solchen Loops, die von Beginn der Transiente an mit Notkühlwasser bespeist wurden, trat in keinem Versuch eine deutliche Absenkung der Borkonzentration am RDB-Eintritt auf. Auch in den nicht von Beginn an bzw. überhaupt nicht mit Notkühlwasser bespeisten Loops führten verschiedene Vermischungsvorgänge dazu, dass die gemessene, minimale Borkonzentration am RDB-Eintritt deutlich über der minimalen Borkonzentration der ursprünglich in den Loops gebildeten Kondensatpfropfen lag. Auch bei einer Maximierung der Größe der Kondensatpfropfen durch spezielle, ungünstige Annahmen hinsichtlich Leckgröße und Einspeisekonfiguration bei kaltseitiger Einspeisung von NKW (Versuch E2.2) sank die Borkonzentration am RDB-Eintritt beim Beginn von Naturumlauf nur kurzzeitig ab und erreichte dabei punktuell einen Minimalwert von $[B] = 350 \pm 100$ ppm

Für den Fall heißseitiger Einspeisung von Notkühlwasser wurde eine Transiente unterstellt und versuchstechnisch erzwungen, bei der der Umlauf in den beiden mit NKW bespeisten Loops nicht abreißt („LOBI-Transiente“). Die Versuchsergebnisse deuten jedoch darauf hin, dass dieses Szenario im DWR - wenn überhaupt - dann nur in einem sehr schmalen Bereich des Leck-Spektrums auftreten könnte. Gleichzeitig ergab sich, dass auch unter diesen unwahrscheinlichen, sehr konservativen Randbedingungen die zu berücksichtigenden Kondensatansammlungen kleiner und der Eintrag von schwächer borierterem Wasser mit kleineren Geschwindigkeiten (und zeitversetzt) erfolgt als ursprünglich unterstellt. Ein weiterer Versuch mit Leck/Einspeisekonfiguration heiß/heiß, bei dem eine Unterbrechung des Umlaufs auch in den nicht bespeisten Loops unterstellt wurde, ergab, dass diese für den DWR „realistischeren“ Annahmen zu noch günstigeren Vermischungsbedingungen im RDB-Fallraum und im unteren Plenum (nicht Gegenstand der PKL Versuche, sondern der ROCOM Versuche) und damit letztlich zu höheren Borkonzentrationen am Kerneintritt führen.

6. Übertragbarkeit auf den DWR und Nutzen der Ergebnisse

Aufgrund der Auslegung der Versuchsanlage mit Original-Höhenabmessungen, der Nachbildung von 4 Primärkreisläufen, die symmetrisch um den RDB angeordnet sind und der Möglichkeit, alle relevanten Fahrweisen und Leck/Einspeise-Konfiguration im DWR für

symmetrische und asymmetrische Einspeisebedingungen realistisch nachzubilden, ist die PKL Anlage sehr gut für die Untersuchung der hier interessierenden Störfall-Transienten geeignet. Daher sind alle wesentlichen in den Versuchen beobachteten Phänomene hinsichtlich Einsetzen von Naturumlauf, Entstehung und Verlagerung von schwach borierten Pfropfen und die damit verbundenen Vermischungsvorgänge auf den DWR übertragbar. Hervorzuheben ist hier insbesondere die realistische Nachbildung der Vorgänge in den Dampferzeugern durch die reaktorgetreue Modellierung der Dampferzeuger U-Rohre (Durchmesser, Wandstärken, Höhen 1:1, auch verschiedene Rohrreihen mit unterschiedlichen Höhen wie im DWR). Die Vorgänge in den Dampferzeugern haben einen signifikanten Einfluss auf das Gesamt-Systemverhalten bei den untersuchten Transienten.

Durch den Einsatz von Original-Borsäure und durch die umfangreiche Messtechnik insgesamt sowie die eingesetzte Bormesstechnik im Besonderen können alle für die Interpretation der Versuchsergebnisse erforderlichen Messinformationen zur Verfügung gestellt werden.

Für die reaktorgerechte Nachbildung der Vermischungsvorgänge im RDB Fallraum und im unteren Plenum ist die PKL Anlage skalierungsbedingt nicht geeignet. Diese Thematik ist vielmehr Gegenstand von umfangreichen Untersuchungen in der Versuchsanlage ROCOM, die im Forschungszentrum Rossendorf betrieben wird und speziell für derartige Untersuchungen konzipiert ist. Die Festlegung der Randbedingungen für die ROCOM Versuche, d.h. die Massenströme, mit denen die schwach borierten Pfropfen aus den einzelnen Loops in den RDB gelangen sowie die Borkonzentration innerhalb der Pfropfen basieren wiederum auf Ergebnissen aus den PKL Versuchen. In Kombination von PKL Versuchen zum Systemverhalten und von ROCOM Versuchen zum Vermischen im RDB Fallraum und im unteren Plenum kann somit für die jeweiligen Störfall-Szenarien die minimale Borkonzentration am Kerneintritt ermittelt werden.

Es ist hier noch darauf hinzuweisen, dass wie bei allen skalierten Versuchsanlagen eine direkte quantitative Übertragung der Ergebnisse auf den DWR auch für die PKL Versuche nur mit Einschränkung, d.h. unter Berücksichtigung gewisser Unsicherheiten möglich ist. Diesem Umstand wird dadurch Rechnung getragen, dass einerseits bei der Definition der PKL Versuche gezielt sehr konservative Randbedingungen unterstellt wurden und zum Anderen auch bei der Umsetzung der PKL Ergebnisse in die Randbedingungen für die ROCOM Versuche zusätzliche Konservativitäten berücksichtigt wurden (z.B. wurden in ROCOM das gleichzeitige Eintreffen von schwach borierten Pfropfen im RDB aus 2 Lops realisiert, obwohl der entsprechende PKL Versuch ein zeitversetztes Eintreffen ergab). Demnach sind die aus den PKL Versuchen abgeleiteten und konservativerweise angepassten Randbedingungen für ROCOM auch in quantitativer Hinsicht als konservativ abdeckend zu betrachten.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass die Ergebnisse der hier beschriebenen PKL Versuche nach wie vor weltweit die einzige belastbare experimentelle Datenbasis zum DWR-Systemverhalten bei Borverdünnungs-Szenarien darstellen.

7. Ausblick

Die in der PKL-Anlage durchgeführten Untersuchungen zur inhärenten Borverdünnung bei kleinem Primärleck haben in den letzten Jahren - wie auch bereits in der Vergangenheit zu anderen Themen - dazu beitragen, aktuelle Sicherheitsfragen zu beantworten, z.B. zur Strömungsgeschwindigkeit, Größe und Rest-Borkonzentration von Kondensatpfropfen, mit denen am RDB-Eintritt unter bestimmten Bedingungen zu rechnen ist, wenn es um die Ermittlung der minimal auftretenden Borkonzentration am Kerneintritt eines DWR geht.

Mit der Beantwortung dieser sicherheitsrelevanten Fragen sind die PKL Versuche zum Systemverhalten von DWRs bei kleinen Lecks mit Borverdünnung weitgehend abgeschlossen. Zur Zeit wird gemeinsam mit den deutschen und internationalen Partnern noch über die Notwendigkeit eines weiteren, speziell auf die Validierung von Rechnerprogrammen zugeschnittenen Versuchs diskutiert, bei dem die Ansammlung von Kondensat in Abhängigkeit vom primärseitigen Wasserinventar unter Berücksichtigung des Druckeinflusses systematisch untersucht werden soll.

Im laufenden OECD Projekt stehen bis zum Ende des Jahres 2006 noch Versuche zu Störfällen bei abgeschalteter Anlage (Mitte-Loop-Betrieb) im Mittelpunkt des Interesses. Dabei werden sowohl Störfallszenarien mit geschlossenem als auch mit bereits geöffnetem Primärkreis betrachtet. Mit dem Ziel, auch zukünftig auf aktuelle Sicherheitsfragen und auf weltweit vorkommende Ereignisse schnell reagieren zu können, ist eine Weiterführung des PKL Vorhabens im Rahmen eines neuen Versuchsprogramms ab 2007 geplant. Dabei wird auch weiterhin die bewährte Zusammenarbeit im internationalen Rahmen über ein OECD-Projekt angestrebt. Die für das neue Versuchsprogramm relevanten Untersuchungsthemen werden derzeit mit den nationalen und internationalen Partnern abgestimmt und konkretisiert.

PKL-Experimente zur Deborierung durch Reflux-Condenser-Betrieb

*Klaus Umminger, Thomas Mull
Framatome ANP, Erlangen*

***Fachtagung der KTG-Fachgruppen “Sicherheit kerntechnischer Anlagen”,
“Thermo- und Fluidodynamik” und “Betrieb von kerntechnischen Anlagen”***

Forschungszentrum Rossendorf

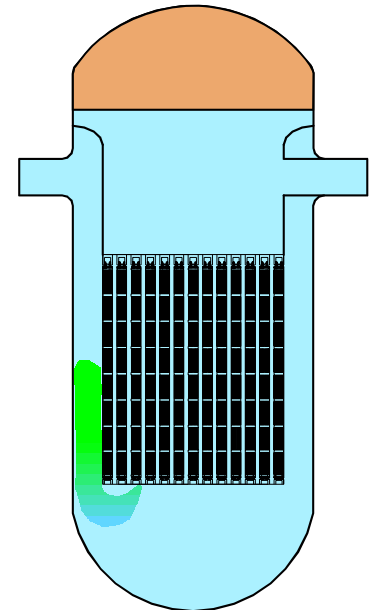
3. – 4. April 2006

- *Hintergrund der Untersuchungen zur Borthematik*
- *Kurze Beschreibung der PKL – Versuchsanlage*
- *PKL – Versuche zur Borverdünnung bei kleinem Leck*
- *Wesentliche Erkenntnisse aus den PKL - Versuchen*
- *Zusammenfassung und Ausblick*

PKL - Versuche zur inhärenten Borverdünnung

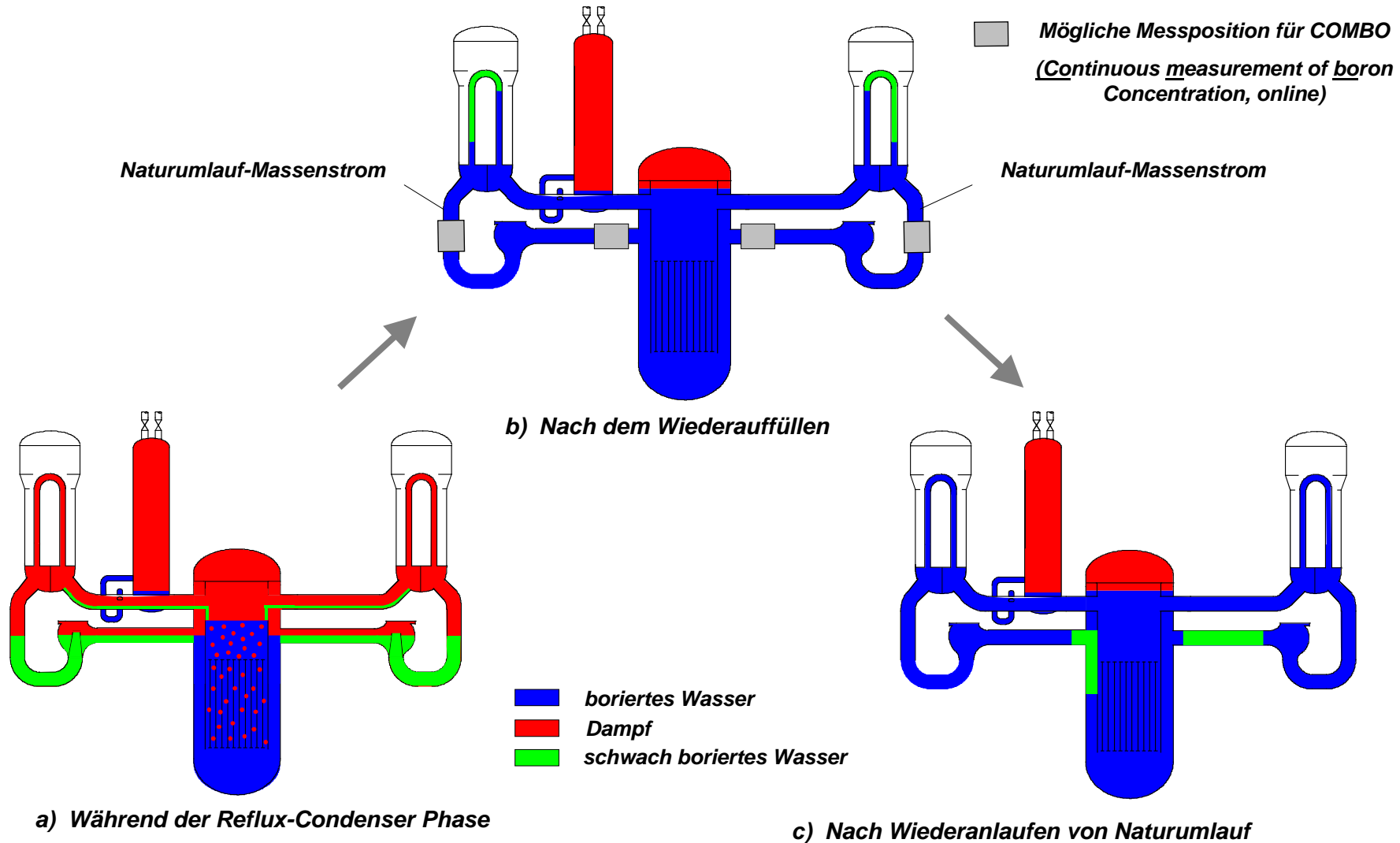
Hintergrund

- *Bildung von niedrig borierten Wasserpfropfen durch Separation von borierten und nahezu borfreien Wasser innerhalb des Primärkreises z. B. bei*
 - ◆ *Kleinen Lecks mit Reflux Condenser*
 - ◆ *Ausfall Nachkühlung im Mitte - Loop Betrieb*
- *Verlagerung niedrig boriertes Pfropfen in den Kern ohne ausreichende Vermischung kann zu*
 - ⇒ *lokaler Leistungsexkursion mit Überschreitung zulässiger Grenzen führen*



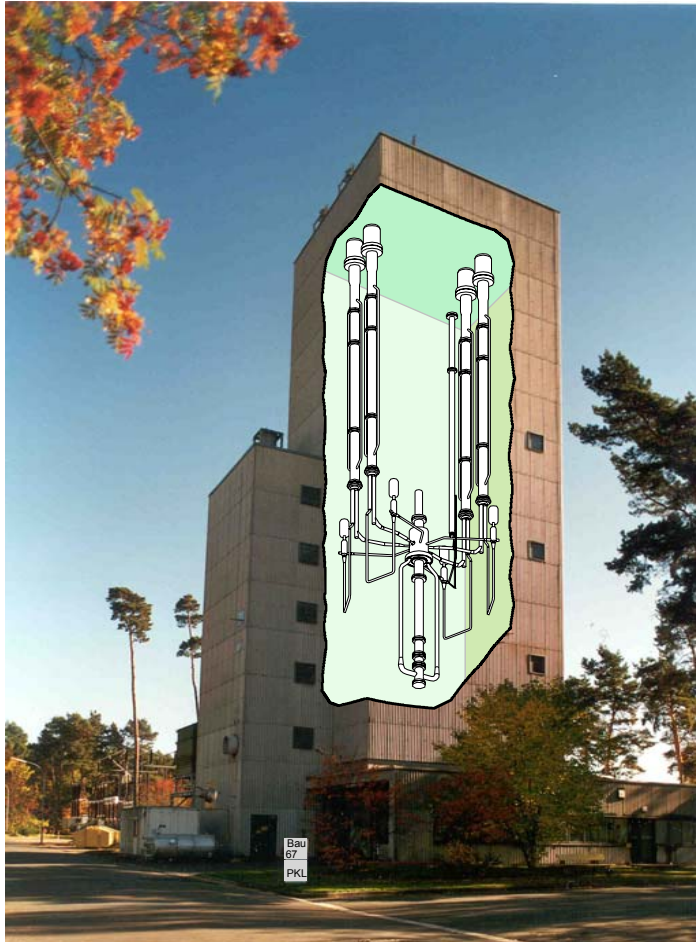
Transport von schwach borierten Wasserpfropfen bei kleinem Leck

Schematische Darstellung



Untersuchungsziele

- **Integrales Systemverhalten**
 - ◆ **Ansammlung von Kondensat unter Reflux Condenser Bedingungen**
 - ◆ **Vermischung von Kondensat mit borierten Wasser während des Auffüllens und nach Einsetzen von Naturumlauf in den Primärkreisleitungen und in den Dampferzeugern**
 - ◆ **Wiedereinsetzen von Naturumlauf in den einzelnen Loops**
 - **Verlagerung von niedrig borierten Wasserpfropfen in den RDB (Menge, min. Borkonzentration, Geschwindigkeit)**
 - **Randbedingungen für weiterführende Analysen / Versuche zum Vermischen im RDB - Fallraum und unteren Plenum**
 - ◆ **CFD - Analysen (z.B. PHOENICS bei FANP)**
 - ◆ **Versuche in der ROCOM - Anlage in FZR**
- ➔ Ermittlung der min. Borkonzentration am Kerneintritt**



Nachbildung eines 1300 MW DWR

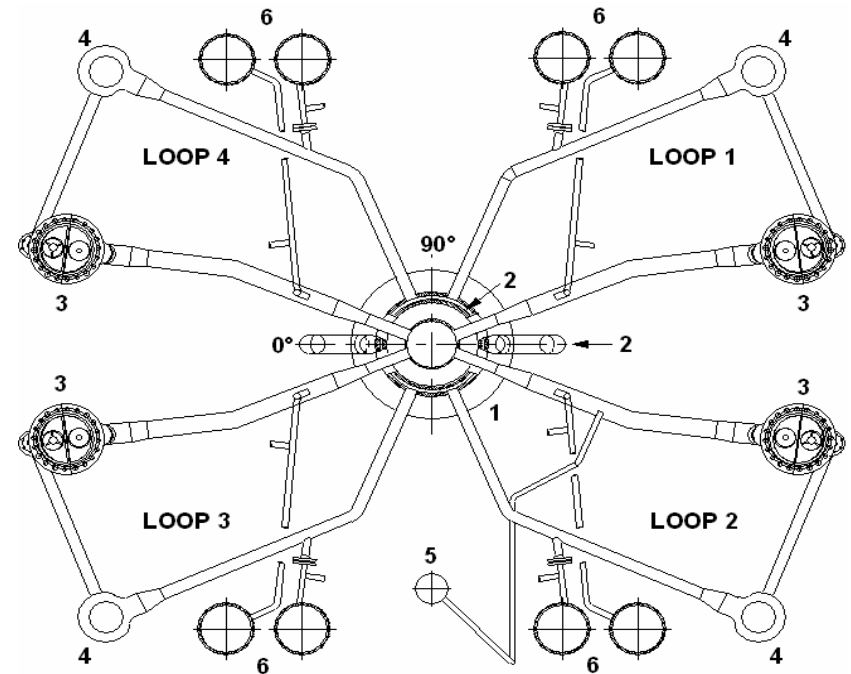
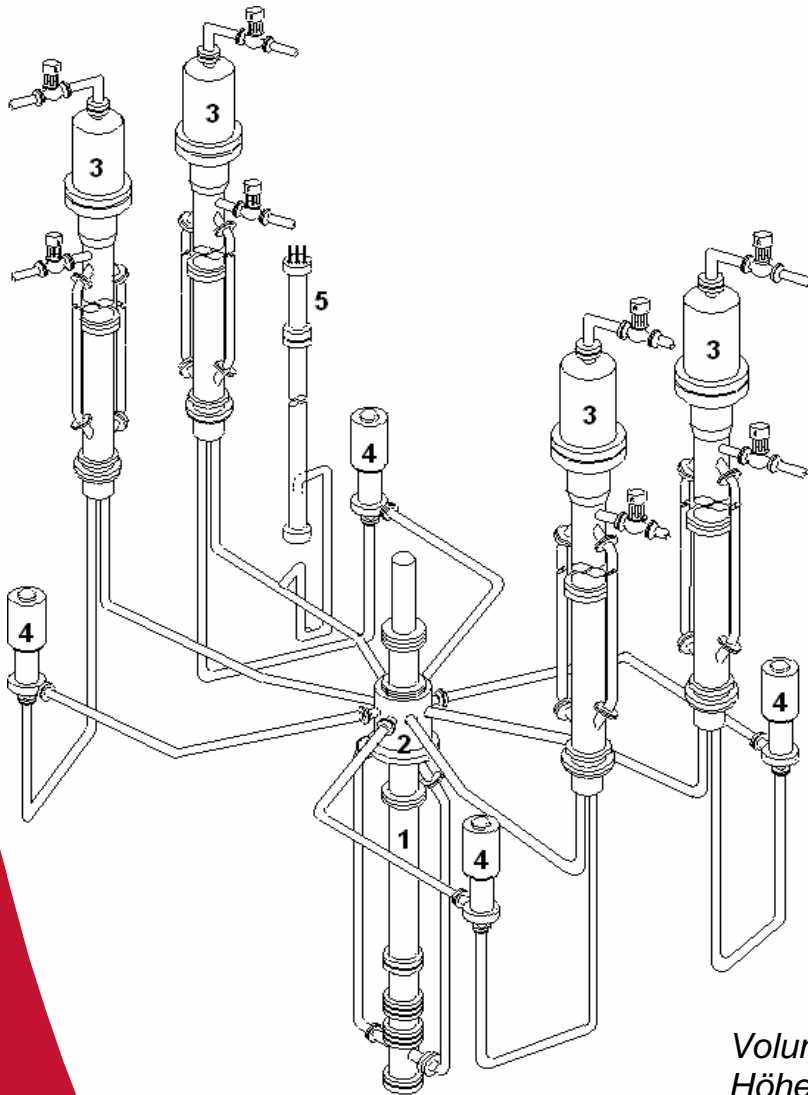
- 4-Loop Anlage
- Primär-/Sekundärseite, Anschlusssysteme
- Volumen-/Leistungsmaßstab 1:145 (Durchmesser 1:12)
- Höhenmaßstab 1:1

Ziele

- Thermohydraulisches Systemverhalten bei Störfällen
- Untersuchung von Abfahrmaßnahmen bei Störfällen (BHB/NHB)
- Aufzeigen von Sicherheitsreserven
- Datenbasis für Validierung von Rechenprogrammen
- Schulung von KKW - Betriebspersonal
- Beantwortung aktueller Fragestellungen

- ▶ **Fachliche und finanzielle Förderung des Projekts durch VGB und GRS / BMWA**
- ▶ **Seit 2001 Einbindung in ein internationales OECD - Projekt**

PKL Versuchsanlage - Primärseite



Volumen : 1 : 145
 Höhen : 1 : 1
 Max. Druck : 45 bar
 Max. Leistung : 2,5 MW (10%)

1 Reaktordruckbehälter
 2 Fallraum
 3 Dampferzeuger
 4 Pumpe
 5 Druckhalter
 6 Druckspeicher

Versuchsrandbedingungen

- **Konservativ abdeckend, so dass nach Einsetzen von Naturumlauf niedrige Borkonzentrationen am RDB - Eintritt bzw. am Kerneintritt zu erwarten sind**
 - ◆ **Große Kondensatpfropfen**
 - ◆ **Maximale Symmetrie zwischen den Loops (begünstigt gleichzeitiges Eintreffen der Kondensatpfropfen am RDB)**

- **Relevant für DWR - Anlagen mit Vorzugslage der Notkühlwassereinspeisung (SEP)**
 - ◆ **Heißseitig: Vorkonvoi / Konvoi**
 - ◆ **Kaltseitig: KKV, GKN 1, KWB sowie W / Framatome Anlagen**

PKL Versuche zur Borverdünnung bei kleinem Leck

➤ **Störfallzenarien mit konservativ abdeckenden Randbedingungen**

◆ Maximale Symmetrie

Symmetrische Einspeisung in alle 4 heißen Stränge: PKL III E2.1

Symmetrische Einspeisung in alle 4 kalten Stränge: PKL III E1.1, F1.1

◆ Maximale Ansammlung von Kondensat

Einspeisung mit 2 von 4 Einspeisesystemen

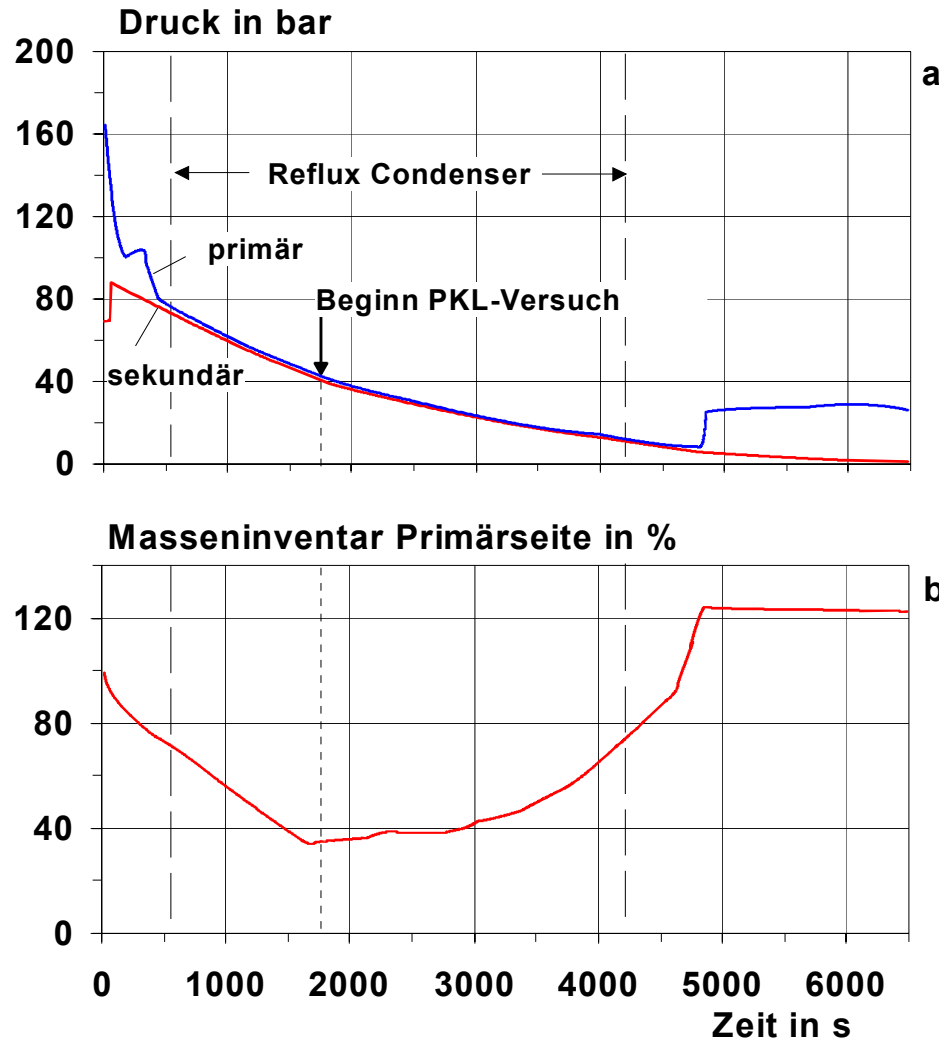
➤ **Leck und Einspeisung kaltseitig: PKL III E2.2, F1.4**

➤ **Leck und Einspeisung heißseitig: PKL III E2.3, F1.3**

➤ **Grundlagenversuch**

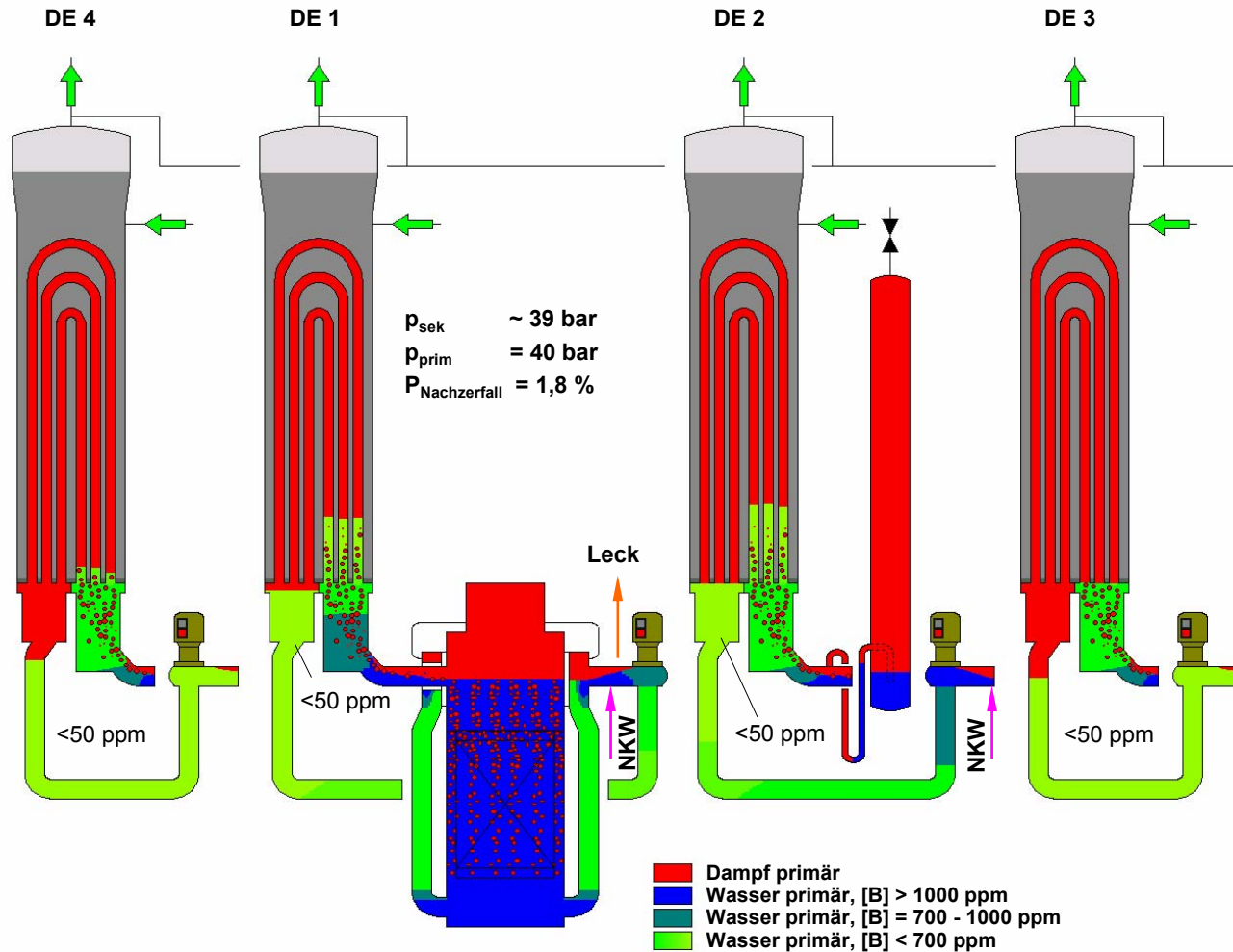
Parameterstudie zur Ansammlung von schwach boriertem Wasser in Abhängigkeit von primärseitigen Wasserinventar: PKL III F1.2

Beziehung zwischen Störfallablauf im DWR und PKL - Versuch



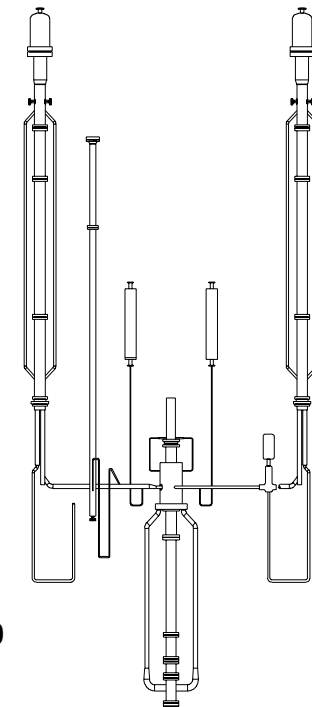
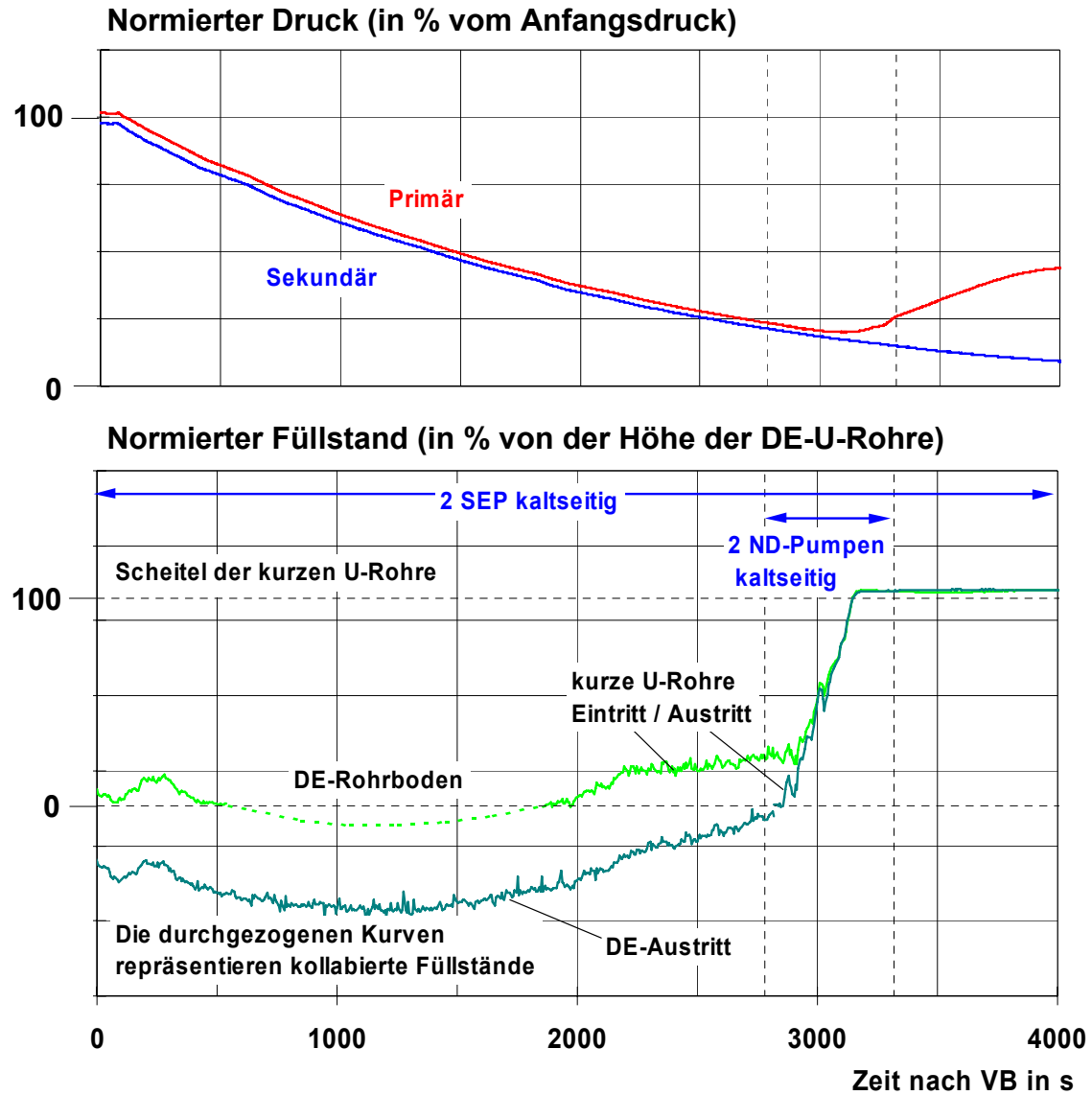
- PKL - Versuch beginnt bei 40 bar
- Anfangszustand entsprechend 40 bar im DWR (S-RELAP 5)
- Versuch bei Originaldruck deckt die relevante Phase des Störfalls ab
- Einsatz von Original-Borsäure

S-RELAP 5 Analyse zum kleinen Leck

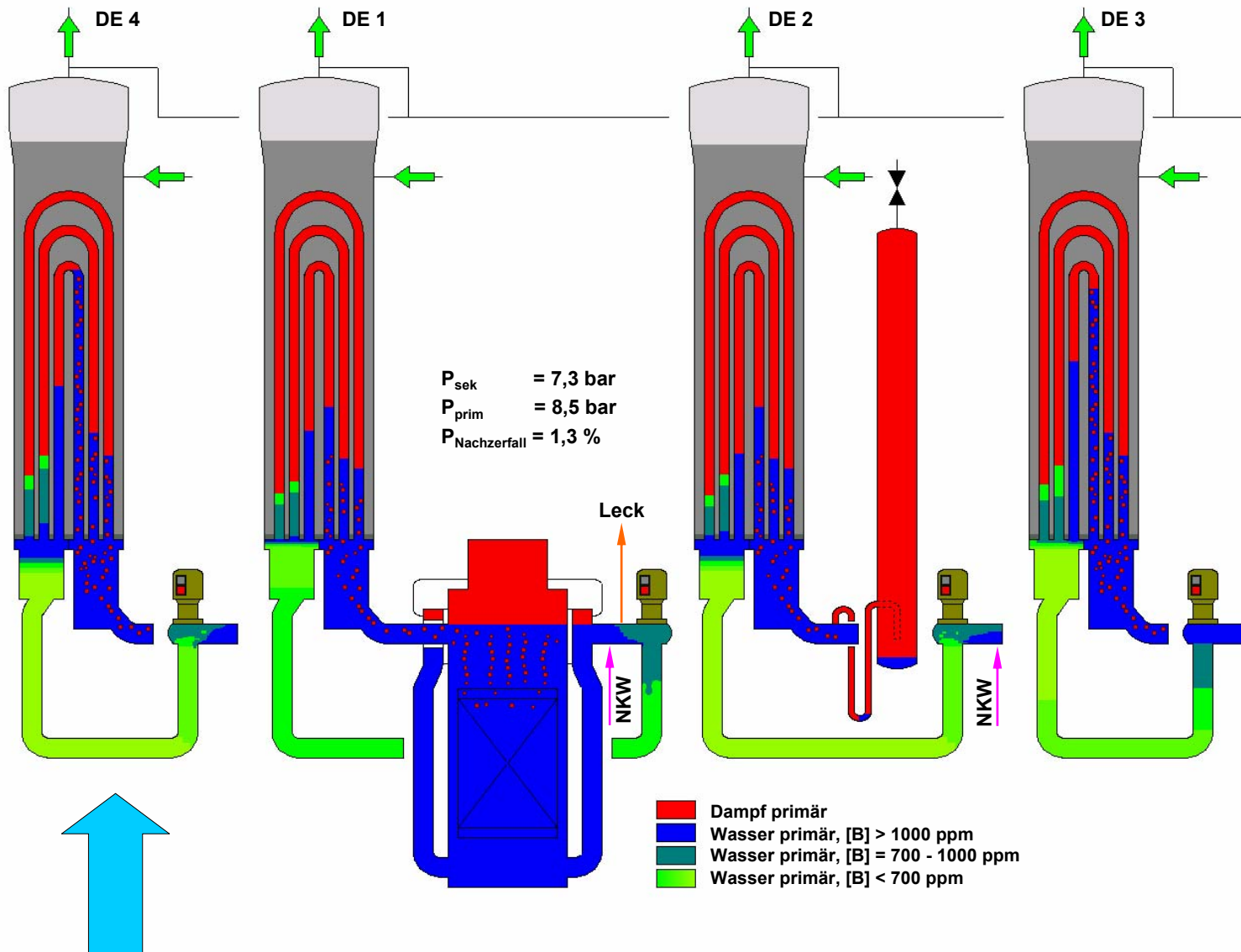


- ◆ Kleines Leck kaltseitig (32 cm²)
- ◆ 2 von 4 Sicherheits-einspeisepumpen kaltseitig
- ◆ 100 K/h - Abfahren

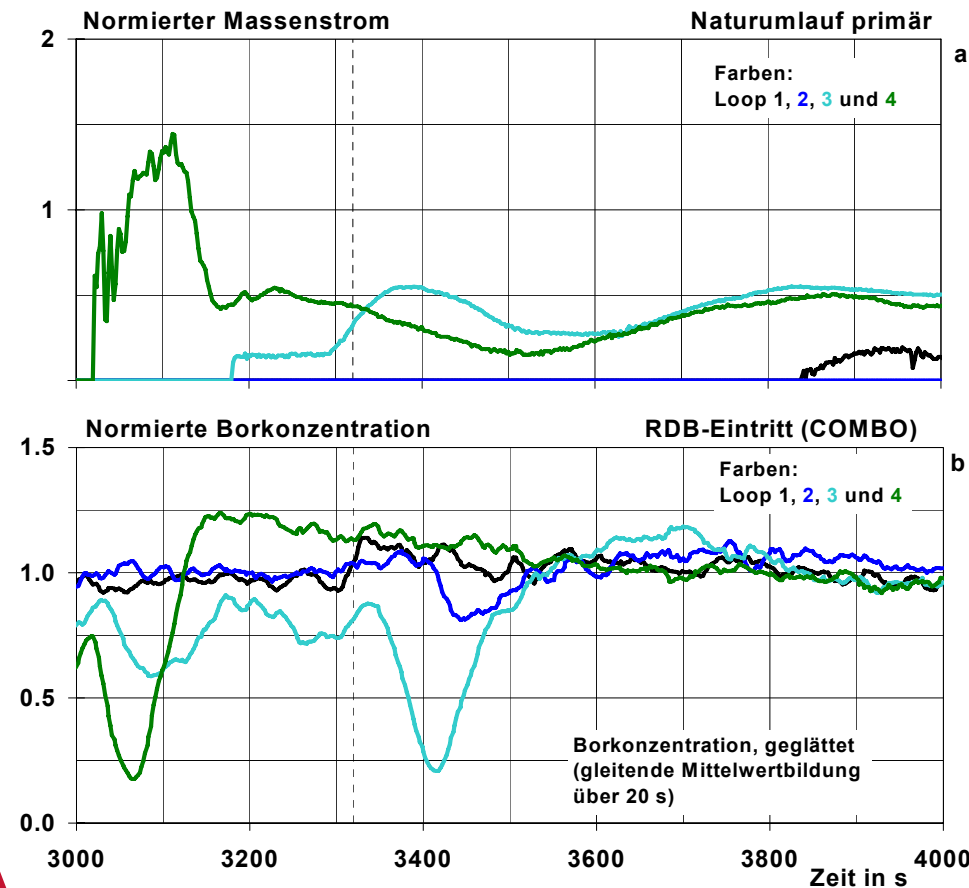
**Leck- Einspeisekonfiguration kalt / kalt
(relevant für KGU, GKN1, Biblis)**



Versuch E2.2: Kondensatpfropfen bei Umlauf-Beginn in Loop 4 (t = 3020 s)

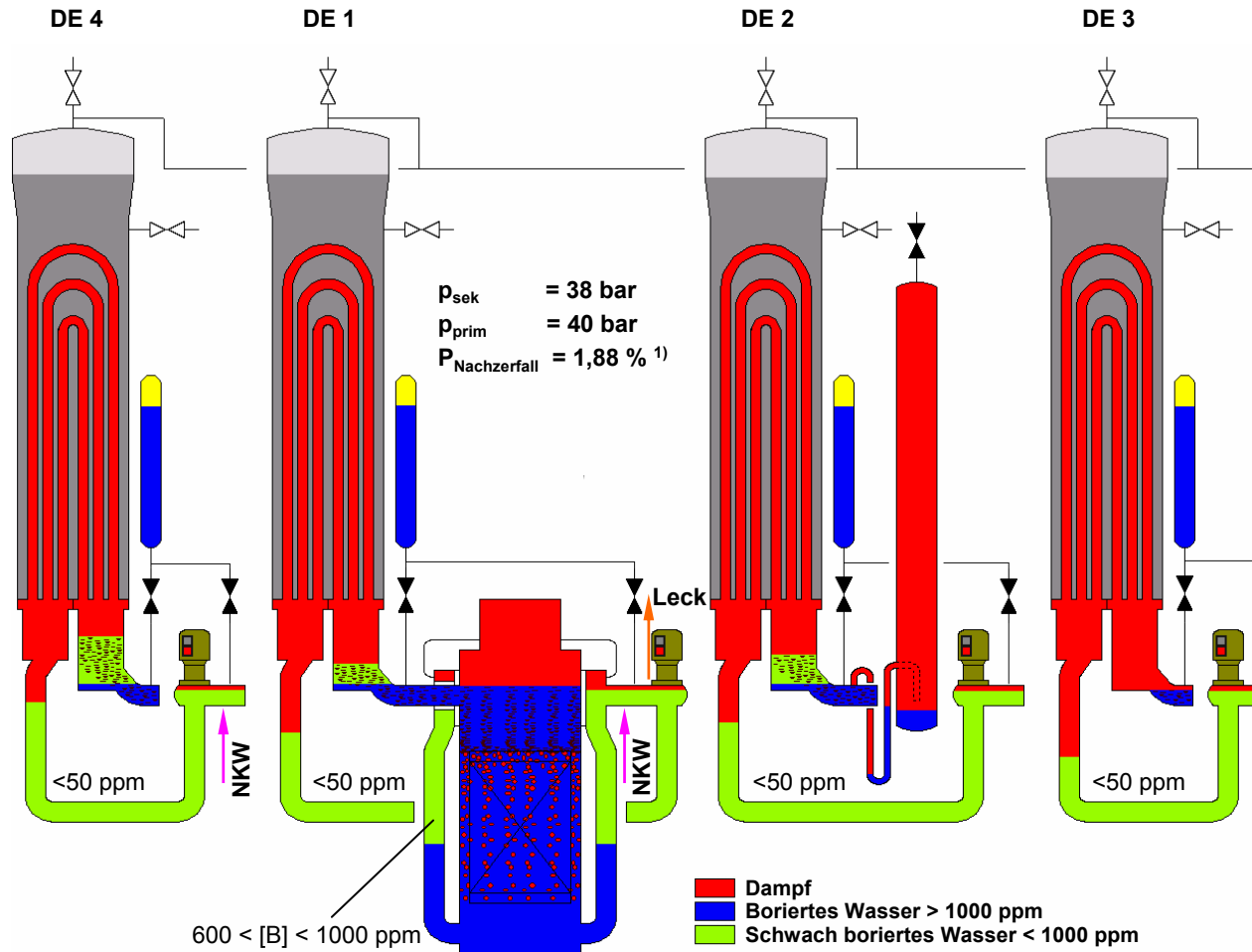


SEPs (Loops 1 und 2, kaltseitig)
 ND-Einspeisung



- Umlauf beginnt zeitversetzt, zuerst in den nicht bespeisten Loops
- Deutliche, aber nur kurzzeitige Absenkung der Borkonzentration (zeitversetzt)
- Minimale Borkonzentration am RDB-Eintritt: 350 ppm
- Keine signifikante Absenkung der Borkonzentration in den bespeisten Loops 1 und 2

Anfangsbedingungen PKL-Versuch F1.4

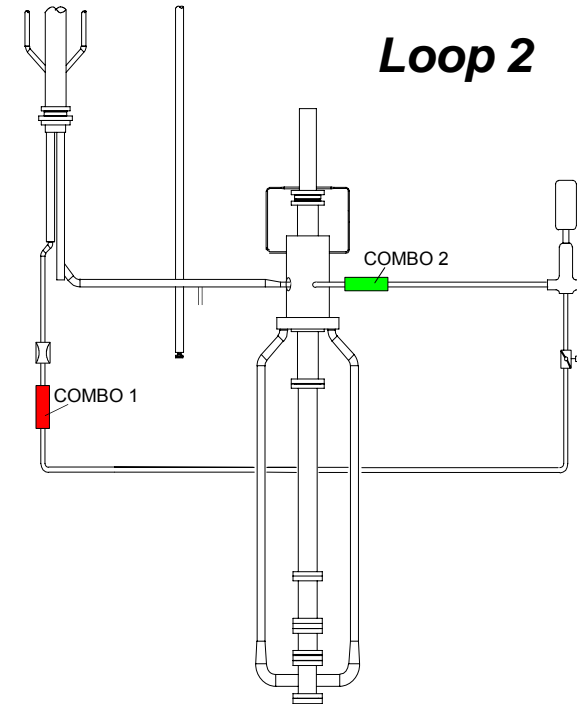
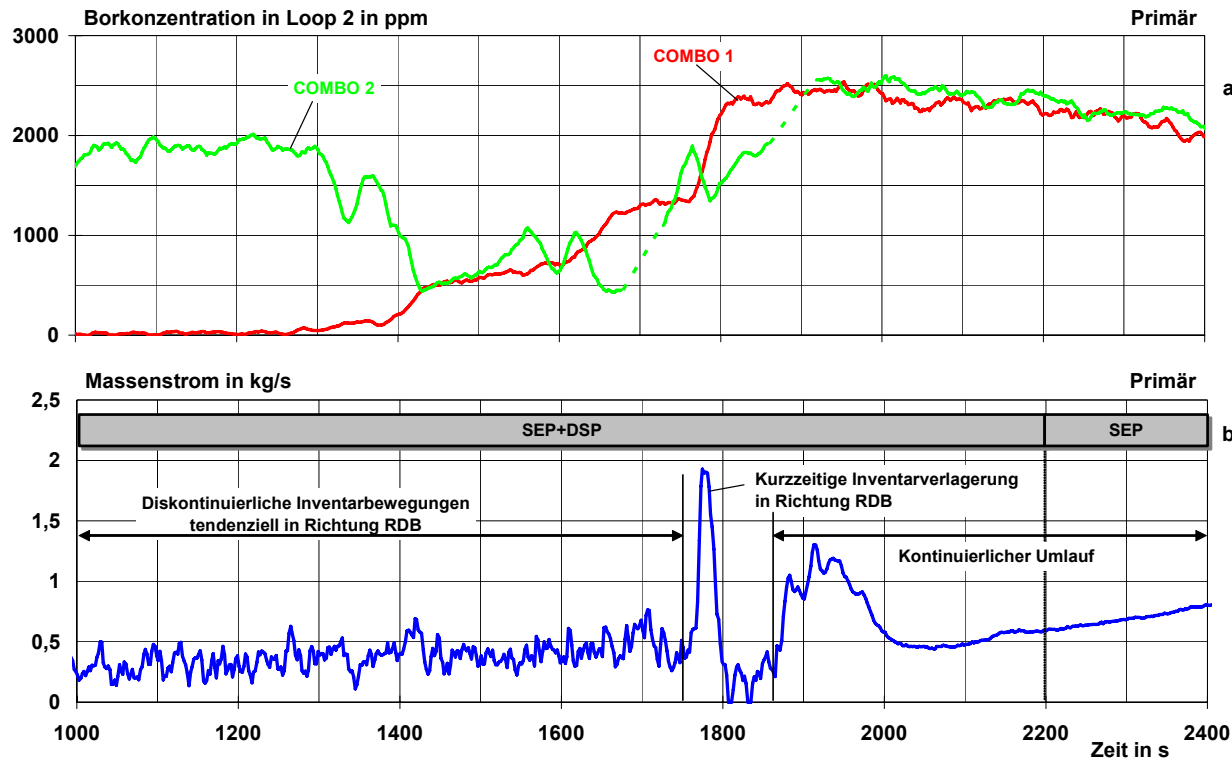


- ◆ Kleines Leck kaltseitig (26 cm²)
- ◆ 2 von 4 Sicherheits-einspeisepumpen kaltseitig
- ◆ 4 Druckspeicher, die heiß- und kaltseitig einspeisen
- ◆ Keine ND-Einspeisung
- ◆ 120 K/h - Abfahren

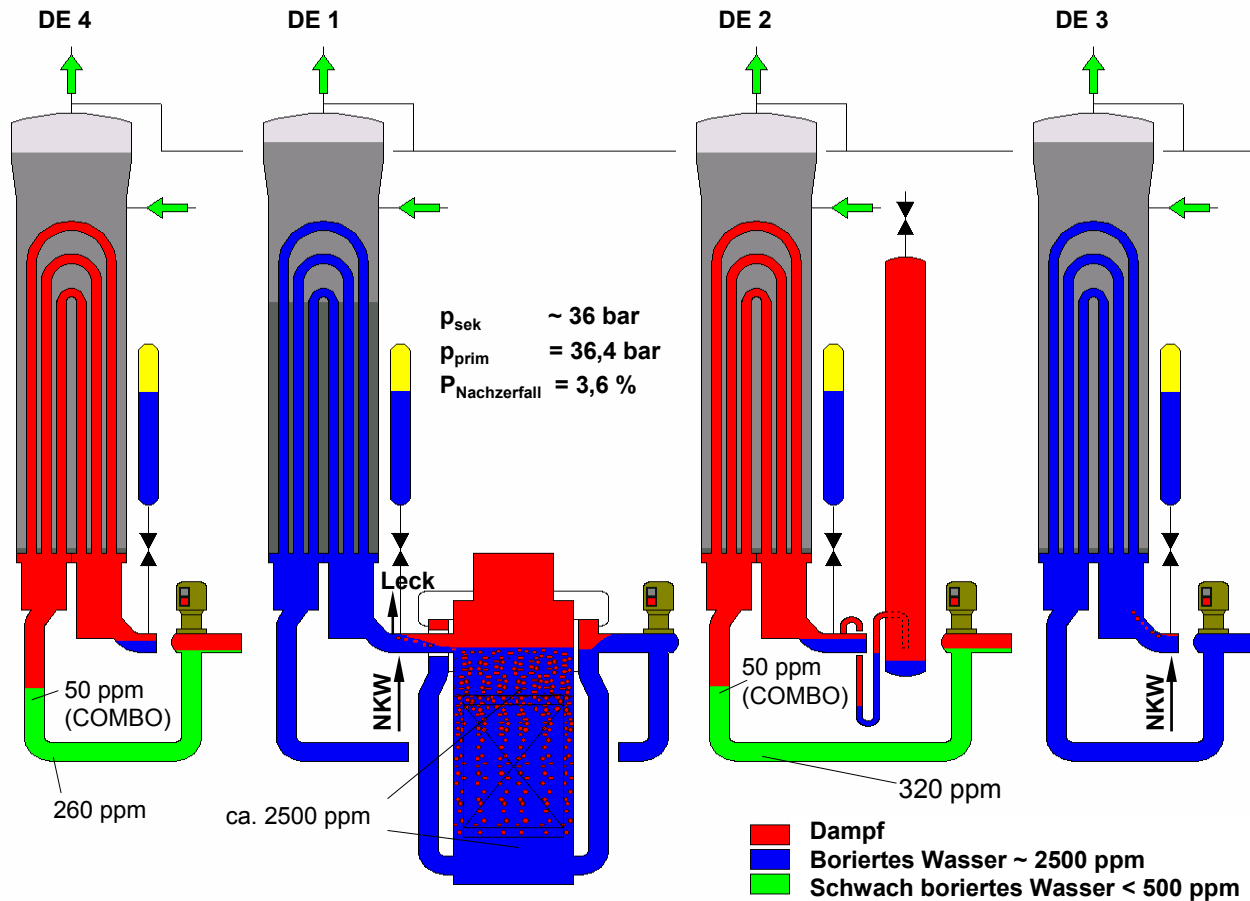
**Leck- Einspeisekonfiguration kalt / kalt
(relevant für KGU, GKN1, Biblis)**

¹⁾ 2350 s nach RESA, bezogen auf 106 % für KGU

Versuch F1.4: Transport niedriger borierteren Wassers durch Loop 2



- ◆ *Kontinuierliche Verlagerung von schwach boriertem Wasser aus dem Pumpenbögen bei sehr kleinen Massenströmen*
- ◆ *Dabei minimale Borkonzentration am RDB-Eintritt [B]: 430 ppm*
- ◆ *Keine signifikante Ansenkung der Borkonzentration in den mit SEPs bespeisten Loops*
- ◆ *Zeitversetzter Eintrag von schwächer boriertem Wasser in den nicht mit SEPs bespeisten Loops*



- ◆ Kleines Leck heiß-seitig (50 cm²)
- ◆ 2 von 4 Sicherheitseinspeisepumpen heißseitig
- ◆ 100 K/h - Abfahren
- ◆ LOBI-Szenario: Erhalt des Umlaufs in den bespeisten Loops

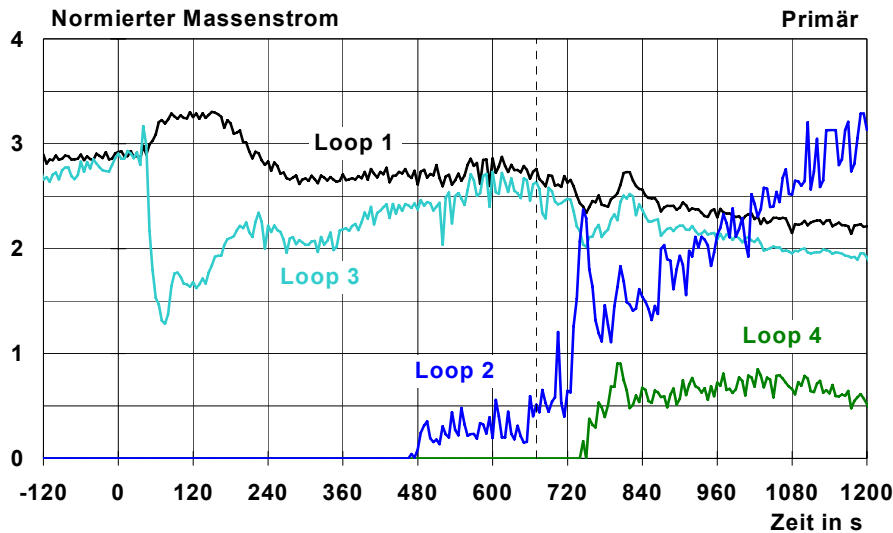
**Leck- Einspeisekonfiguration heiß / heiß
(relevant für Vorkonvoi / Konvoi)**

Versuch E2.3: Besonderheiten des unterstellten Szenarios

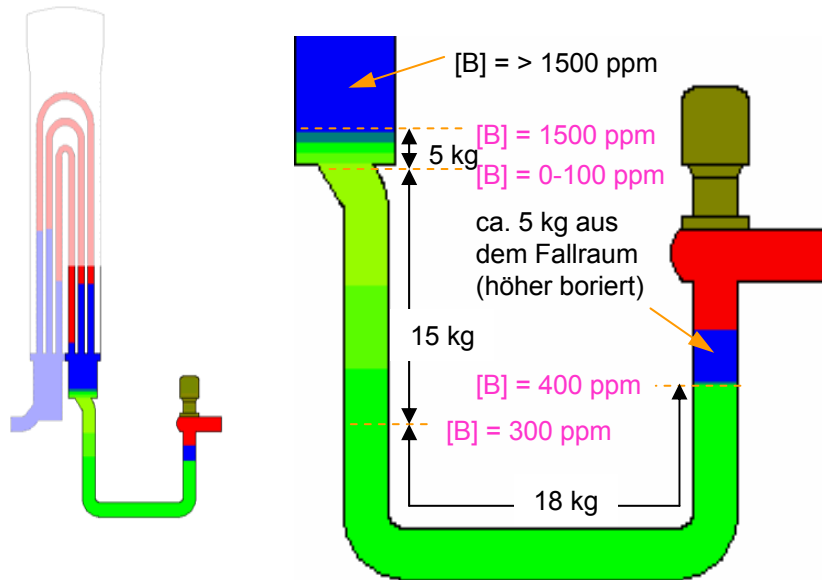
- **Konservative Annahmen (LOBI-Szenario)**
 - ◆ **Reflux Condenser-Bedingungen in den 2 Loops ohne Einspeisung von Notkühlwasser**
 - ◆ **Naturumlauf in den 2 durch SEP bespeisten Loops mit vollständiger Umlenkung des heißseitig eingespeisten NKW zu den DE hin**

Anmerkung: Im Versuch in der Versuchvorphase nur durch entsprechende, nicht reaktortypische Fahrweise (z. B. deutlich höhere Nachzerfallsleistung) zu erzwingen

- **Erläuterung:**
 - ◆ **In den bespeisten Loops Energietransfer Sekundär - Primär, daher verstärkte Kondensatproduktion in den Loops mit RC-Bedingungen**
 - ◆ **Beim Einsetzen von Naturumlauf auch in diesen Loops eventuell ungünstige Bedingungen für die Vermischung mit hochboriertem Kühlmittel im RDB-Fallraum**

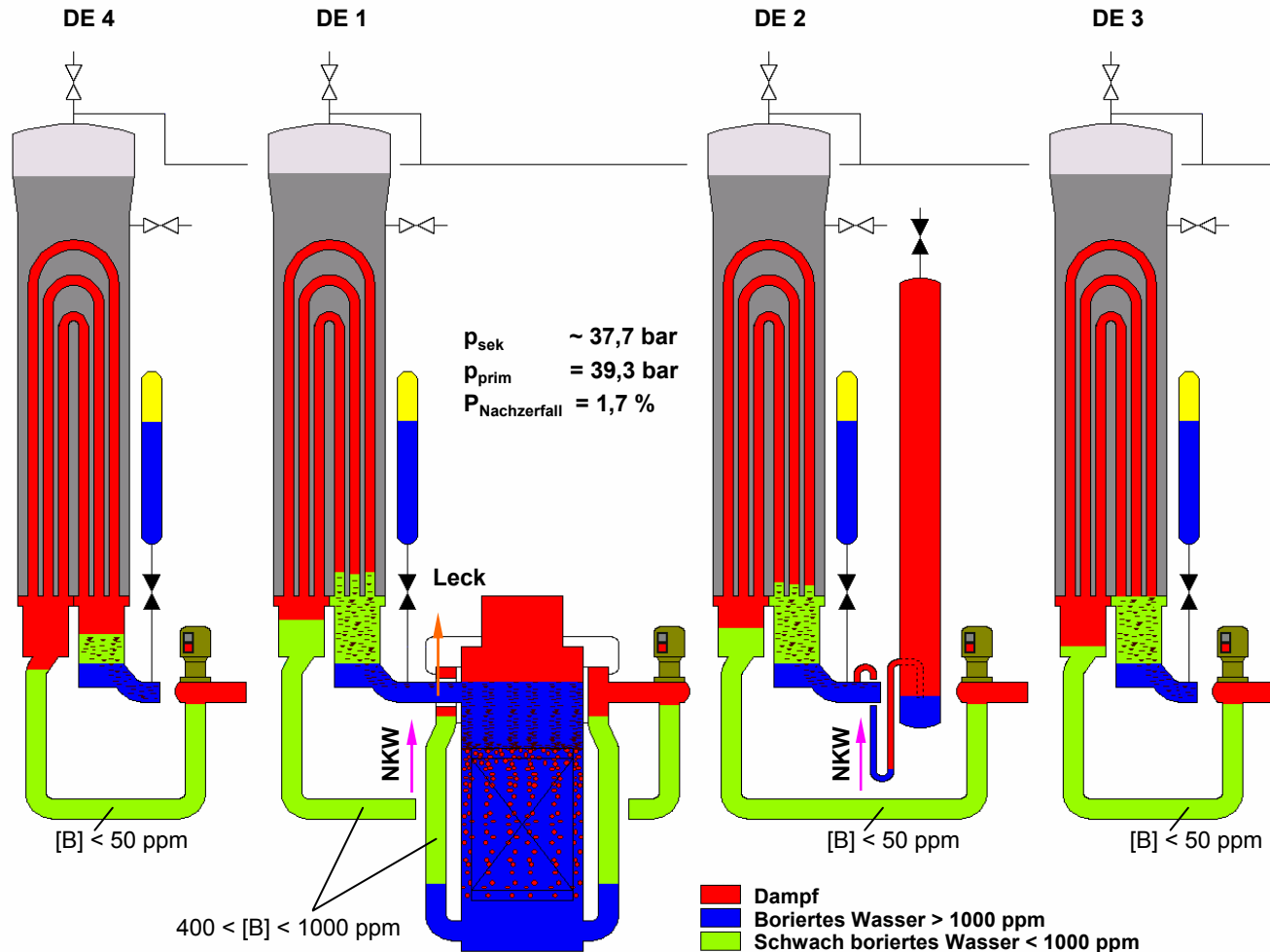


- Umlauf beginnt zeitversetzt in den nicht bespeisten Loops
- Erhöhung der Borkonzentration schon vor Beginn von Umlauf
- Pfropfen werden mit sehr kleinen Geschwindigkeiten in den RDB verlagert



Kondensatpfropfen in Loop 2 kurz vor Beginn des Umlaufs

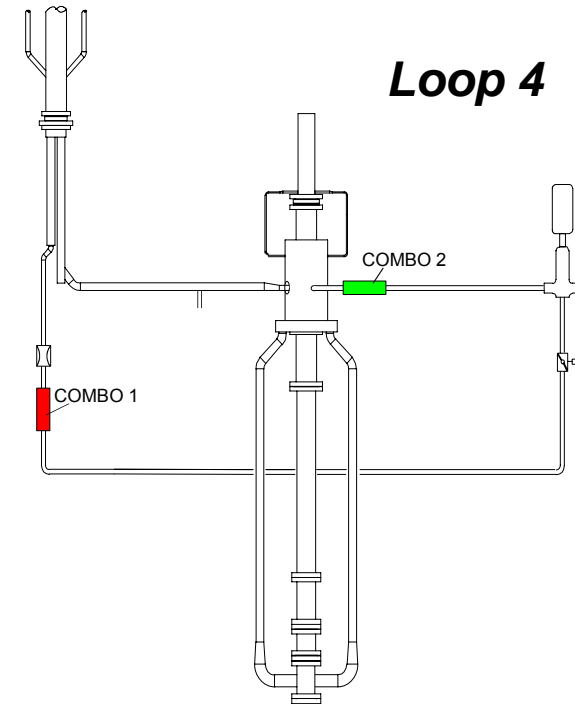
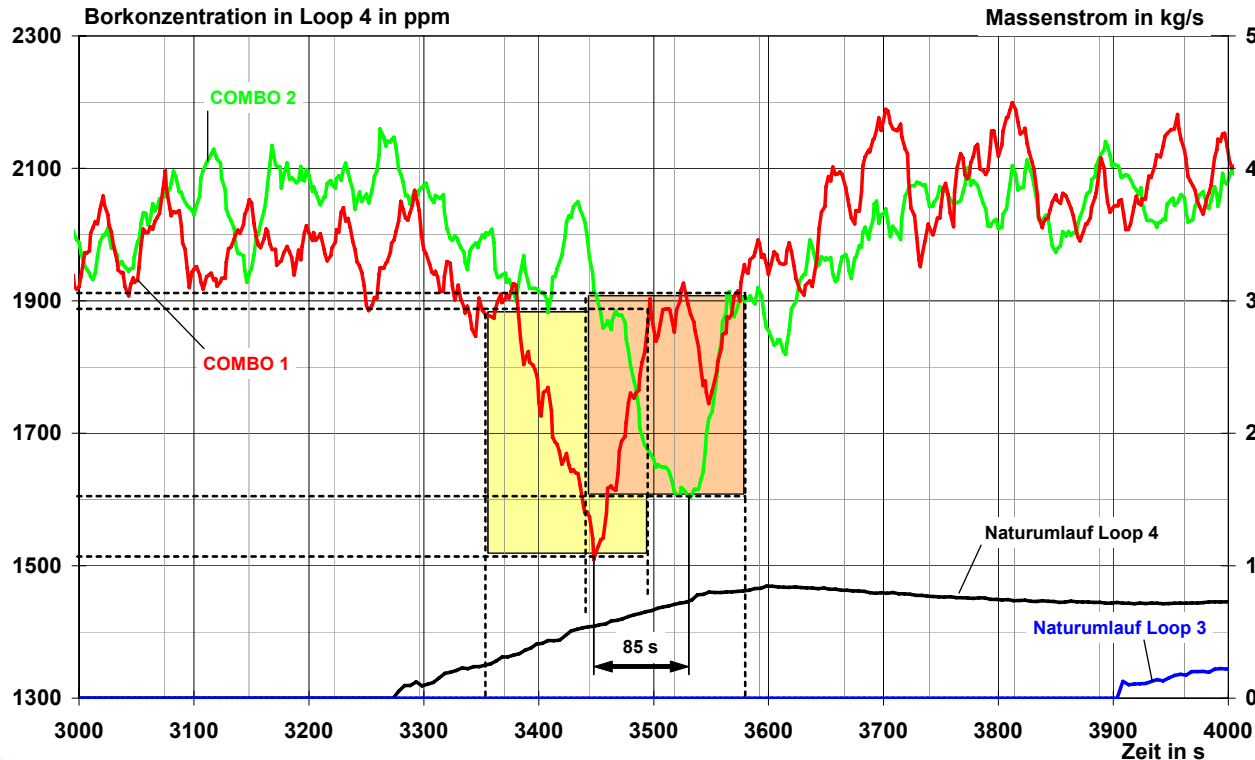
Anfangsbedingungen PKL-Versuch F1.3



- ◆ Kleines Leck heißseitig (39 cm²)
- ◆ 2 von 4 Sicherheits-einspeisepumpen heißseitig
- ◆ 100 K/h – Abfahren
- ◆ Kein Umlauf in den bespeisten Loops bei 40 bar (im Gegensatz zu LOBI - Szenario: Vgl. E2.3)

**Leck- Einspeisekonfiguration heiß / heiß
(relevant für Vorkonvoi / Konvoi)**

Versuch F1.3: Transport niedriger borierteren Wassers durch Loop 4



- ◆ *Kalte Seite wird mit heißseitigen SEP „rückwärts“ über Kern, Fallraum, Pumpenbogen mit borierterem Wasser aufgefüllt*
- ◆ *Naturumlauf setzt nur in den nicht bespeisten Loops (und hier zeitversetzt) ein*
- ◆ *Nur geringe Absenkung der Borikonzentration am RDB-Eintritt bei Beginn von Naturumlauf ($[B]_{min} \sim 1600$ ppm)*

Wesentliche Erkenntnisse

- **Bildung und Ansammlung von Kondensatpfropfen experimentell bestätigt**
- **Maximale Größe schwach borierter Pfropfen kleiner als ursprünglich unterstellt**
- **Zeitversetztes Anlaufen von Naturumlauf in den einzelnen Loops**
- **Erhöhung der Borkonzentration in den Pfropfen durch effektives Mischen in den DEs und in den Loops vor Einsetzen von Umlauf**
- **Eintrag der Pfropfen in den RDB mit kleineren Geschwindigkeiten als ursprünglich angenommen**

Wesentliche Erkenntnisse (Forts.)

- ***Auftreten des “LOBI-Szenarios“ im DWR sehr unwahrscheinlich, wenn überhaupt, dann nur in einem sehr schmalen Bereich des Leckspektrums***
- ***Auch bei Unterstellung dieser sehr konservativen Randbedingungen:***
 - ◆ ***maximale Kondensatansammlungen kleiner und***
 - ◆ ***Eintrag von Pfropfen in den RDB mit kleineren Geschwindigkeiten als zuvor angenommen***

Fazit: Günstigere Bedingungen für Vermischung im RDB - Fallraum und im unteren Plenum

Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse auf den DWR

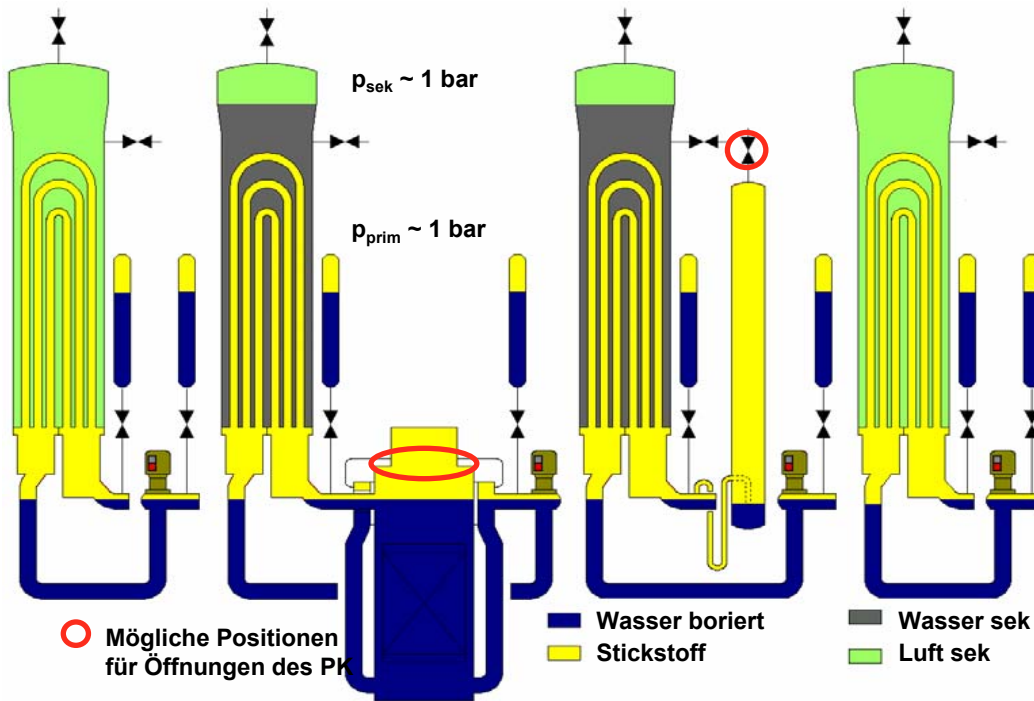
- **Die PKL Anlage ist sehr gut geeignet für die Untersuchung der hier zu untersuchenden Störfalltransienten**
 - ◆ **Alle Höhenabmessungen 1:1, 4 symmetrische Loops**
 - ◆ **Original Wärmetauscherrohre in den Dampferzeugern**
 - ◆ **Reaktorgerechte Nachbildung der relevanten Systemtechnik**
 - ◆ **Nachbildung der relevanten DWR Fahrweisen**
 - ◆ **Verwendung von Borsäure, umfangreiche Messtechnik, insbesondere auch für Borgehaltsmessung**

- **Alle wesentlichen, in den Versuchen beobachteten Phänomenen (hinsichtlich Naturumlauf und Verlagerung von Pfropfen) sind auf den DWR übertragbar**

Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse auf den DWR

- ***Konservativitäten bei der Festlegung der PKL Versuchsrandbedingungen sowie***
 - ***Weitere Konservativitäten bei der Festlegung der Randbedingungen für ROCOM aus PKL Ergebnissen***
- ➔ ***Die aus den PKL Versuchen für die ROCOM Versuche ermittelten Randbedingungen sind auch in quantitativer Hinsicht als konservativ abdeckend zu betrachten***

Ausfall des Nachkühlsystems im Mitte-Loop-Betrieb bei abgeschalteter Anlage



◆ Versuche mit geschlossenem Primärkreis

- Maximaler primärseitiger Druckanstieg
- Mögliche Borverdünnung
- Optimierung der Fahrweisen (z.B. Druckspeicher-Einspeisung)

◆ Versuche mit geöffnetem Primärkreis

- Wirksamkeit von Notfallmaßnahmen zur Verzögerung von Dampfbildung bzw. von Kernfreilegung

→ **Direkte Verwertung der Erkenntnisse für BHB/NHB**

→ **Verbesserung der Rechenprogramme z.B. hinsichtlich Wärmeübertragung in den Dampferzeugern bei Anwesenheit von Stickstoff**

Ausblick

- **PKL - Versuche zur Borverdünnung bei kleinem Leck sind aus heutiger Sicht abgeschlossen**
- **Bis Ende 2006: Störfällen bei abgeschalteter Anlage (Ausfall Nachkühlung im Mitte-Loop-Betrieb)**
- **Weiterführung des PKL - Vorhabens ab 2007 im Rahmen eines neuen Versuchsprogramms, mit dem Ziel,**
 - ◆ **auch zukünftig auf aktuelle Sicherheitsfragen und**
 - ◆ **auf weltweit vorkommende Ereignisse reagieren zu können**
- **Auch zukünftig ist die Weiterführung im Rahmen eines internationalen OECD-Projekts vorgesehen**
- **Zur Zeit werden die relevanten Untersuchungsthemen mit den nationalen und internationalen Partnern abgestimmt und konkretisiert**

Kenntnisstand zu unterstellten Borverdünnungsszenarien in DWR

Borverdünnung durch Störfälle mit Reflux-Condenser-Betrieb:

Erkenntnisgewinn und sicherheitstechnische Einordnung aus Betreibersicht

Ralf Wohlstein, E.ON Kernkraft GmbH, Hannover

Volker Noack, RWE Power AG, Essen

**Borverdünnung durch Störfälle mit Reflux-Condenser-Betrieb:
Erkenntnisgewinn und sicherheitstechnische Einordnung aus Betreibersicht**

Vortrag von

**R. Wohlstein, E.ON Kernkraft, Hannover
Dr. V. Noack, RWE Power, Essen**

bei der

**KTG-Fachtagung
„Aktuelle Themen der Reaktorsicherheitsforschung in Deutschland“,
in Rossendorf am 03/04.04.06**

Gegenstand des Vortrags sind Borverdünnungs-Szenarien bei kleinen Lecks mit verminderter Wirksamkeit der Notkühleinrichtungen. Das interessierende Leckspektrum erstreckt sich über heiß- und kaltseitige Lecks von ca. 15 bis 50 cm². Zu relevanten Kondensatansammlungen kann es nur kommen, wenn angenommen wird, dass nur 2 von 4 Notkühlsträngen verfügbar sind. Das bei den untersuchten Szenarien relevante übergeordnete Schutzziel ist die Kontrolle der Reaktivität.

In dem Vortrag wird zur sicherheitstechnischen Einordnung der Reflux-Condenser-Szenarien zunächst die Historie der Diskussion in Deutschland kurz beleuchtet. Danach wird betrachtet, wie die Reflux-Condenser-Szenarien aus deterministischer und aus probabilistischer Sicht einzustufen sind. Schließlich wird zum Vergleich auf das Vorgehen in den USA eingegangen.

Danach wird anhand der Betrachtung wichtiger Aspekte aufgezeigt, welche Erkenntnisse aus den Untersuchungen gewonnen wurden.

Historie der Diskussion in Deutschland

Das Thema wurde 1991 in den USA im Rahmen von Untersuchungen zum TMI-Ereignis aufgegriffen. Ab 1992, also nach Erteilung der Betriebsgenehmigung der deutschen DWR, wurde es im Kreis der deutschen DWR-Betreiber diskutiert. Es folgten umfangreiche Analysen durch Siemens/KWU im Auftrag der Betreiber. 1996 wurde das Thema im Zuge eines Genehmigungsantrags zur Anreicherungshöhung eines DWR von Gutachtern und Behörden thematisiert. 2002 wurden bei einem TÜV/GRS-Workshop offene Fragen formuliert und nachfolgend von den Betreibern beantwortet. 2003 stellte die RSK fest, dass von minimalen Borkonzentrationen am Kerneintritt von 800 bzw. 850 ppm auszugehen sei und noch Fragen zur weiteren Vermischung bis zum Kerneintritt offen seien. Im Jahre 2004 wurden den Genehmigungsbehörden weitere Untersuchungen vorgelegt.

Deterministische Betrachtung der sicherheitstechnischen Einstufung

Folgende Postulate wurden im Rahmen der Untersuchungen erhoben, die zu relevanten Abläufen führten:

- Ein Sicherheitseinspeisestrang speist auf das Leck.
- Ein Instandhaltungsfall wird unterstellt, der zur Unverfügbarkeit einer Sicherheitseinspeisung führt.
- Ein Einzelfehler an einem der beiden nicht vom Leck oder von der Instandhaltung betroffenen Notkühlstränge liegt vor.

Darüber hinaus sind folgende Postulate von Bedeutung:

- Ein Primärkreisleck mit einem besonders ungünstigen Leckquerschnitt tritt auf. Die Wahl des jeweils ungünstigsten Leckquerschnitts wurde abdeckend unabhängig von der Frage vorgenommen, ob es überhaupt Anschlussleitungen mit dem entsprechenden Leckquerschnitt gibt. Untersuchungen der GRS zeigen, dass für einen bestimmten Leckquerschnitt die Häufigkeit eines Lecks vernachlässigbar ist gegenüber dem Vollabriss einer kleineren Leitung mit dem entsprechenden Querschnitt.
- Die Möglichkeit einer Rekritikalität besteht am ehesten, wenn die Reaktivität des Reaktorkerns und damit die kritische Borkonzentration relativ hoch sind. Daher gelten die Untersuchungen für den ungünstigsten Zustand „Zyklusbeginn“.

Insgesamt handelt es sich hier um eine zwar auslegungsgemäße, aber relativ unwahrscheinliche Überlagerung von Anfangsbedingungen. Dieser Punkt wird unten noch aus probabilistischer Perspektive behandelt.

Ergebnis der Analysen waren minimale Borkonzentrationen

- in der Kerneintrittsebene,
- an einer Brennelement-Position,
- zu einem bestimmten Zeitpunkt.

Diese ermittelte lokal und zeitlich begrenzte vorhandene Borkonzentration wird mit der Borkonzentration verglichen, bei der der Kern kritisch würde, wenn

- der gesamte Reaktorkern dauerhaft mit Kühlmittel derselben Borkonzentration

gefüllt wäre. Hierbei bleiben die Möglichkeit zur weiteren Vermischung auf dem Weg durch den Reaktorkern, die ansteigende Konzentration außerhalb des Minimums und der zeitliche Verlauf der Konzentration außer Acht. In der Realität besteht deshalb noch ein erheblicher Abstand zur Kritikalität, wenn die minimal vorhandene Konzentration der kritischen entspricht.

Bei den Untersuchungen wurde stets das Ziel verfolgt (und auch erreicht), den Erhalt der Unterkritikalität nachzuweisen. Unterstellt man – als Gedankenexperiment - den Fall einer Rekritikalität und einer Leistungserzeugung, so würde die sich einstellende Leistung durch die Temperatur- und Dichterückwirkung begrenzt werden. Da sich das Primärkühlmittel aufgrund des Lecks im oder nahe dem Sättigungszustand befindet, wäre eine starke Rückwirkung durch Dampfbildung im Reaktorkern vorhanden. Eine unterstellte Leistungserzeugung wäre außerdem nur von kurzer Dauer, da dem Pfropfen gering borierten Kühlmittels deutlich höher boriertes Kühlmittel nachfolgt. Aus dieser schutzzielorientierten Betrachtung ergibt sich, dass für die Einhaltung des Schutzziels „Kontrolle der Reaktivität“ der Erhalt der Unterkritikalität nicht zwingend erforderlich ist. Das verwendete Nachweisziel „Unterkritikalität“ stellt damit eine weitere Konservativität dar.

Probabilistische Betrachtung der sicherheitstechnischen Einstufung

Eine probabilistische Betrachtung der Reflux-Condenser-Abläufe muss mindestens 4 Elemente berücksichtigen:

- Die Häufigkeit der hier unterstellten Primärkreislecks. Diese liegt nach einer neueren Untersuchung, die im Auftrag der VGB (Projekt SAAT 14/01) durchgeführt wurde, unter 3 E-4/a .
- Die Wahrscheinlichkeit dafür, dass der Störfall gegen Zyklusbeginn eintritt, wird mit 0,1 angesetzt.
- Die Wahrscheinlichkeit für die Unverfügbarkeit eines Sicherheitseinspeisestrangs durch einen Ausfall. Diese beträgt auf der Grundlage von Ausfallraten aus der VGB-Datenbank ZEDB (Zentrale Zuverlässigkeits- und Ereignisdatenbank) etwa 1 E-2 .
- Die Wahrscheinlichkeit für die Unverfügbarkeit eines Sicherheitseinspeisestrangs durch einen Instandhaltungsfall. Diese wird wesentlich durch die zulässige Dauer von Wartungen während des Leistungsbetriebs bestimmt. Setzt man die - für einige Anlagen - maximal zulässige Zeit von 4 Wochen pro Jahr an, so ergibt sich eine Wahrscheinlichkeit unter 0,1.

Weitere Faktoren, wie das angesetzte genau gleichzeitige Einsetzen des Naturumlaufs in 2 Loops oder das eingeschränkte Leckspektrum, für das das „LOBI-Verhalten“ diskutiert wird, sollen hier außerhalb der Betrachtung bleiben.

Aus den o. g. Faktoren resultiert eine Gesamthäufigkeit des unterstellten Ablaufs von kleiner als 3 E-8/a . Dieser Ablauf stellt noch keinen Gefährdungszustand im Sinne der PSA dar, da alle Untersuchungen das Ergebnis haben, dass das Szenario beherrscht wird. Die o. g. Häufigkeit ist dennoch klein gegenüber den Gesamt-Gefährdungszustands-Häufigkeiten, die für deutsche DWR in aller Regel zwischen 1 E-6/a und 1 E-5/a liegen. Damit kann festgestellt werden, dass die Reflux-Condenser-Szenarien aus probabilistischer Sicht nur eine geringe Bedeutung für das Sicherheitsniveau besitzen.

Vorgehen in den USA

Ein Vergleich mit dem Vorgehen in den USA zeigt, dass Borverdünnungsszenarien durch Reflex-Condenser-Betrieb beim Kleinen Leck zunächst probabilistisch bewertet wurden. Das Ergebnis war, dass diese – wie für deutsche DWR – als sehr unwahrscheinlich einzustufen sind. Eine Rekritikalität wird in den USA zugelassen. Von Interesse waren in den USA vor allem Szenarien mit Wiedereinschalten von HKMP bei Babcock & Wilcox-Reaktoren. Nur für diese ergaben die Analysen das Auftreten von Rekritikalität. Dies ist damit zu erklären, dass bei diesem mit Geradrohr-Dampferzeugern ausgerüsteten Reaktor-Typ das gesamte Kondensat in den (relativ großen) Pumpenbögen anfällt.

In dem Brief des Vorsitzenden des „Advisory Committee on Reactor Safeguards“ an den NRC-Vorsitzenden vom 22.10.2004 finden sich dem entsprechend folgende Aussagen:

„The RES analyses ... have shown that recriticality for postulated boron dilution events is not possible in Westinghouse* and Combustion Engineering* reactor designs for either resumption of natural circulation or restart of a RCP.“

(*: U-Rohr-Dampferzeuger, ähnlich KWU-Anlagen)

„The low probability of this event, coupled with its limited consequences, supports the conclusion that GSI-185 can be considered resolved for Babcock & Wilcox lowered-loop-plants, as well as for all other operating PWRs.“

Insgesamt ergibt die Betrachtung, dass

- relevante Abläufe nur bei einer unwahrscheinlichen Überlagerung ungünstiger Randbedingungen auftreten,
- bei der Nachweisführung in Deutschland sehr konservativ vorgegangen wurde,
- als Nachweisziel vorgelagert der Erhalt der Unterkritikalität verwendet wurde,
- Reflex-Condenser-Szenarien aus probabilistischer Sicht nur eine untergeordnete Bedeutung für das Sicherheitsniveau besitzen und
- in den USA weniger konservativ vorgegangen wurde.

Erkenntnisse aus den Untersuchungen

Anfang der Neunzigerjahre kam die Thematik möglicher Borverdünnungen durch Reflex-Condenser-Betrieb bei kleinen Primärkreislecks auf. In den folgenden Jahren wurden Abläufe mit Borverdünnung beim kleinen Leck experimentell mit den 4-Loop-Versuchsanlagen UPTF (1992 – 1997, Mischungsverhalten zur Verifizierung von S/KWU-Analysen), PKL (ab 1996, Umlaufverhalten, Pfropfengröße, Borkonzentration bis RDB-Eintritt, 10 Umlaufversuche, davon 8 mit Borsäure) und ROCOM (Mischverhalten im RDB, 5 Versuchsreihen) und analytisch mit den Codes S-RELAP5, DEIO-MIX und PHOENICS umfassend untersucht.

Einsetzen Naturumlauf

Das Thema erschien besonders brisant, weil sich bei diesen Abläufen in den Pumpenbögen Kühlmittel mit Borkonzentrationen von minimal etwa 50 ppm ansammeln könnte. Diese Konzentration liegt weit unterhalb der kritischen Borkonzentrationen insbesondere bei Zyklusbeginn. Von großem Interesse war vor allem die Frage, ob ein gleichzeitiges Einsetzen des Naturumlaufts in allen Loops möglich wäre, da dies zu sehr schlechten Bedingungen für die Vermischung im RDB-Ringraum und im unteren Plenum geführt hätte. Hierzu wurden zahlreiche Versuche an der PKL-Anlage durchgeführt, zum Teil mit bewusst gewählter Einspeisung in alle Loops, um eine maximale Symmetrie zwischen den Loops herzustellen (z. B. PKL III D2.2). Die PKL-Versuche zeigten, dass ein gleichzeitiges Anlaufen nicht möglich ist. Die nicht Notkühlwasser-bespeisten Loops laufen stets zuerst an, jedoch in den Versuchen auch nicht gleichzeitig. Abdeckend wurde den nachfolgenden Untersuchungen ein gleichzeitiges Einsetzen des Naturumlaufts in den Notkühlwasser-bespeisten Loops zugrunde gelegt. Die Untersuchungen bestätigten den Erhalt der Unterkritikalität.

Aufborierung bei kaltseitiger Notkühleinspeisung

Ein Aspekt, zu dem es unterschiedliche Auffassungen gab, war die aus den UPTF-Versuchen abgeleitete Stärke der Aufborierung im RDB-Ringraum und im unteren Plenum bei Abläufen mit kaltseitiger Notkühleinspeisung. Hierzu wurden deshalb zum einen analytische Untersuchungen mit dem CFD-Code PHOENICS durchgeführt. Zum anderen wurde diese Frage an der ROCOM-Anlage experimentell untersucht. Die Untersuchungen führten zu sehr hohen Borkonzentrationen am Kerneintritt im Bereich von 1700 ppm und bestätigten damit die aus UPTF abgeleitete Vermischungsintensität in ihrer Größenordnung. Mit diesen Ergebnissen ist die Unterkritikalität selbstverständlich sichergestellt.

LOBI-Szenario

Für Anlagen mit heißseitiger Sicherheitseinspeisung wurde später ein Szenario zur Diskussion gestellt, bei dem die heißseitige Notkühleinspeisung in Richtung Dampferzeuger umgelenkt würde, so dass der Naturumlauf in diesen Loops nicht abreißt („LOBI-Szenario“). Thermohydraulische Berechnungen für eine Konvoi-Anlage mit dem Thermohydraulik-Code ATHLET ergaben, dass sich dieses Verhalten einstellen könnte. Sie ergaben außerdem, dass der Naturumlauf in den Loops ohne Notkühleinspeisung nach Auffüllen des Primärkreises sehr schnell wieder einsetzen und ähnliche Massenströme wie in den bespeisten Loops erreichen würde. Damit wären sehr ungünstige Bedingungen für die Vermischung im RDB-Ringraum und im unteren Plenum gegeben. Berechnungen mit Thermohydraulik-Code S-RELAP5 ergaben, dass das „LOBI-Verhalten“ nicht auftreten würde. Der hierzu durchgeführte Versuch PKL III E2.3 hatte das Ergebnis, dass sich das LOBI-Verhalten zwar in der stationären Versuchsphase einstellen ließ, jedoch nur unter Bedingungen, die für Realanlagen untypisch sind. Zudem waren die Naturumlauf-Massenströme in den einzelnen Loops sehr unterschiedlich. Obwohl die Betreiber die Übertragbarkeit des „LOBI-Verhaltens“ auf Realanlagen bezweifeln, wurden abdeckende Analysen auf der Grundlage von PKL III E2.3 und Versuchen an der ROCOM-Anlage des Forschungszentrums Rossendorf durchgeführt. Diese führten wie alle vorhergehenden zu dem Ergebnis, dass die Unterkritikalität sichergestellt ist.

Übertragbarkeit von PKL-Ergebnissen

Der letzte wichtige Punkt, der hier erwähnt werden soll, ist die Frage, inwieweit Ergebnisse aus Versuchen an der PKL-Anlage auf Realanlagen übertragen werden können. Unsere Auffassung hierzu ist, dass qualitative Versuchsergebnisse vollständig übertragbar sind, da die PKL-Anlage gerade für die Untersuchung des Umlaufverhaltens ausgelegt ist. Die quantitativen Ergebnisse halten wir wegen der Auslegung der PKL-Anlage (Höhen 1:1, Druckverluste) ebenfalls für übertragbar, wobei die Übertragung allerdings mit gewissen Unsicherheiten verbunden ist. Diese Unsicherheiten werden jedoch durch die großen, in den Untersuchungen enthaltenen Konservativitäten abgedeckt. Dies sind z. B.:

- Zuschläge zu Ausgangsleistung und Nachzerfallsleistung,
- abdeckend große Mengen von angesammeltem Kondensat,
- Lage des Lecks möglichst ungünstig (auch wenn kein entspr. Stutzen vorhanden ist),
- Wiedereinsetzen des Naturumlauflauf so, dass die Pfropfen genau gleichzeitig am RDB eintreffen.

Insgesamt ist festzustellen, dass die neu aufgeworfenen Phänomene und Aspekte der Reflux-Condenser-Thematik nicht die Gesamtaussage ändern: alle Untersuchungen bestätigten den Erhalt der Unterkritikalität. Änderungen an der Anlagentechnik, an den Fahrweisen oder in den Betriebsunterlagen waren und sind nicht erforderlich. Die Auslegung und die Betriebsweise der deutschen Druckwasserreaktoren wurden damit auch unter dem Aspekt der Borverdünnung durch Reflux-Condenser-Betrieb bei kleinen Primärkreislecks bestätigt.

Fazit

Die Betrachtungen in diesem Vortrag führen zu folgenden Haupt-Schlussfolgerungen:

- Kleine Primärkreislecks mit relevanter Kondensatansammlung sind zwar auslegungsgemäß zu unterstellen. Sie sind jedoch bei genauerer Betrachtung aus deterministischer und aus probabilistischer Sicht von eingeschränkter sicherheitstechnischer Relevanz.
- Bei der Nachweisführung wurde sehr konservativ vorgegangen.
- Neu aufgeworfene Fragen im Bereich der Untersuchungen der Reflux-Condenser-Thematik führten stets zu dem gleichen Ergebnis: die Unterkritikalität ist sichergestellt.
- Die Auslegung und die Betriebsweise der deutschen Druckwasserreaktoren wurden damit auch unter diesem Aspekt bestätigt.

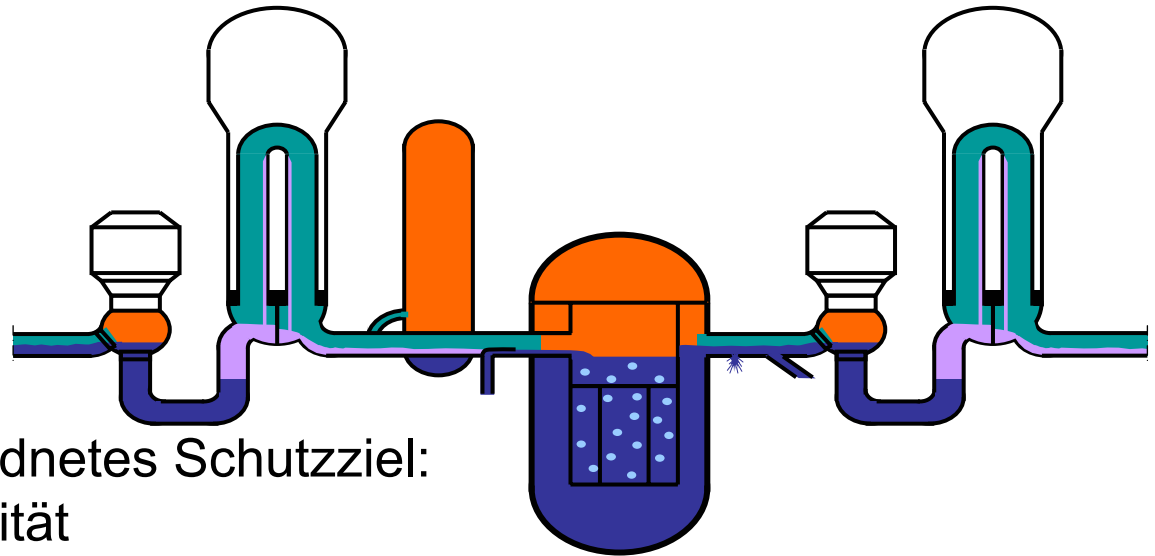
Borverdünnung durch Störfälle mit Reflux-Condenser- Betrieb: Erkenntnisgewinn und sicherheitstechnische Einordnung aus Betreibersicht

KTG-Fachtagung Rossendorf, 03/04.04.06

R. Wohlstein, E.ON Kernkraft, Hannover
V. Noack, RWE Power, Essen

Gegenstand des Vortrags: Borverdünnungs-Szenarien bei kleinen Lecks mit verminderter Wirksamkeit der Notkühlung

- Kleines Leck im Primärkreis, ca. 15 ... 50 cm², heiß- / kaltseitig
- Verfügbarkeit von 2 von 4 Notkühlsträngen



Relevantes übergeordnetes Schutzziel:
Kontrolle der Reaktivität

Inhalt des Vortrags:

- Sicherheitstechnische Einordnung der Reflux-Condenser-Thematik
 - Historie der Diskussion in Deutschland
 - deterministische Herangehensweise in Deutschland
 - probabilistische Relevanz
 - Vorgehen in den USA
- Erkenntnisgewinn aus den Untersuchungen
 - Betrachtung wichtiger Aspekte

Historie der Diskussion in Deutschland

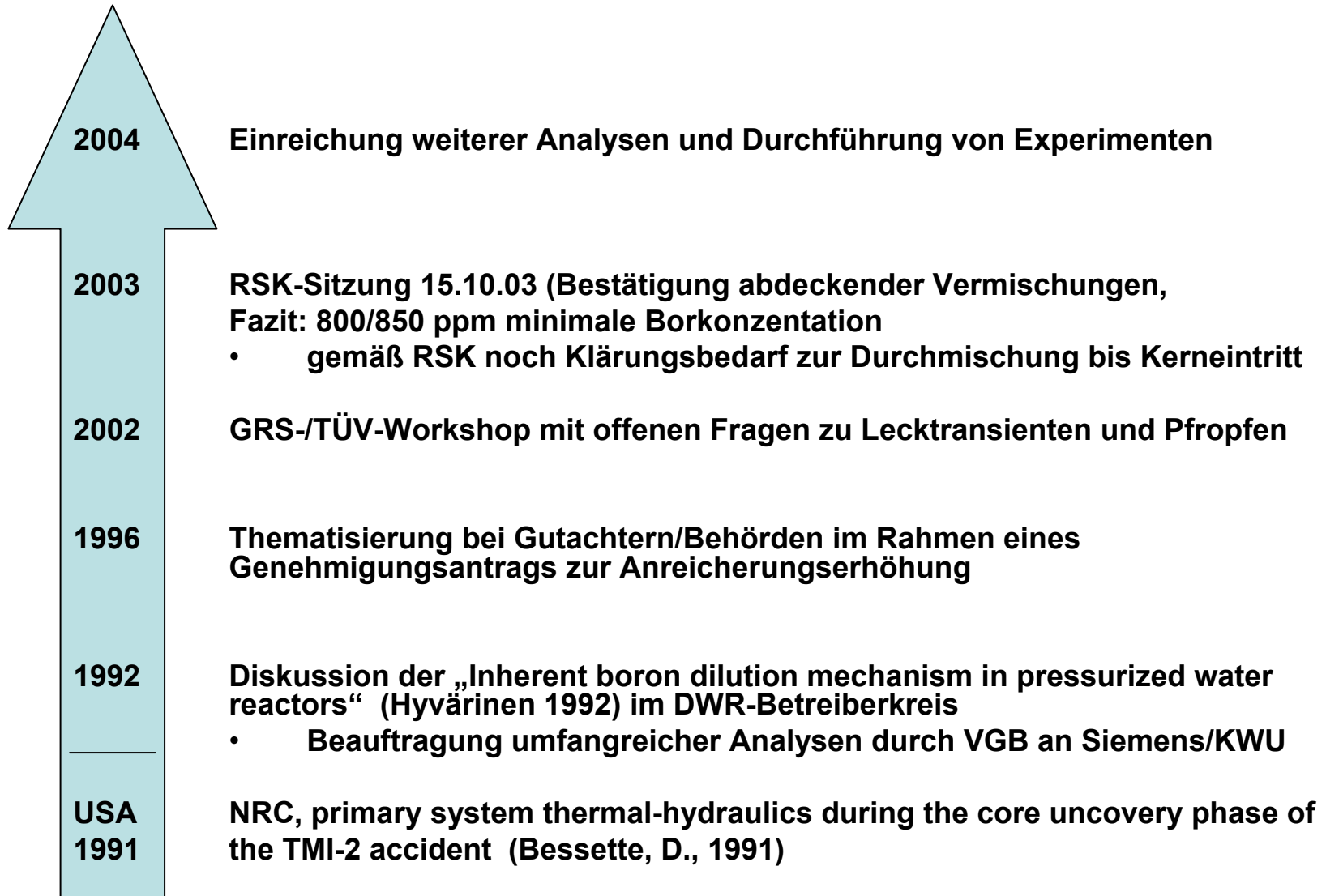
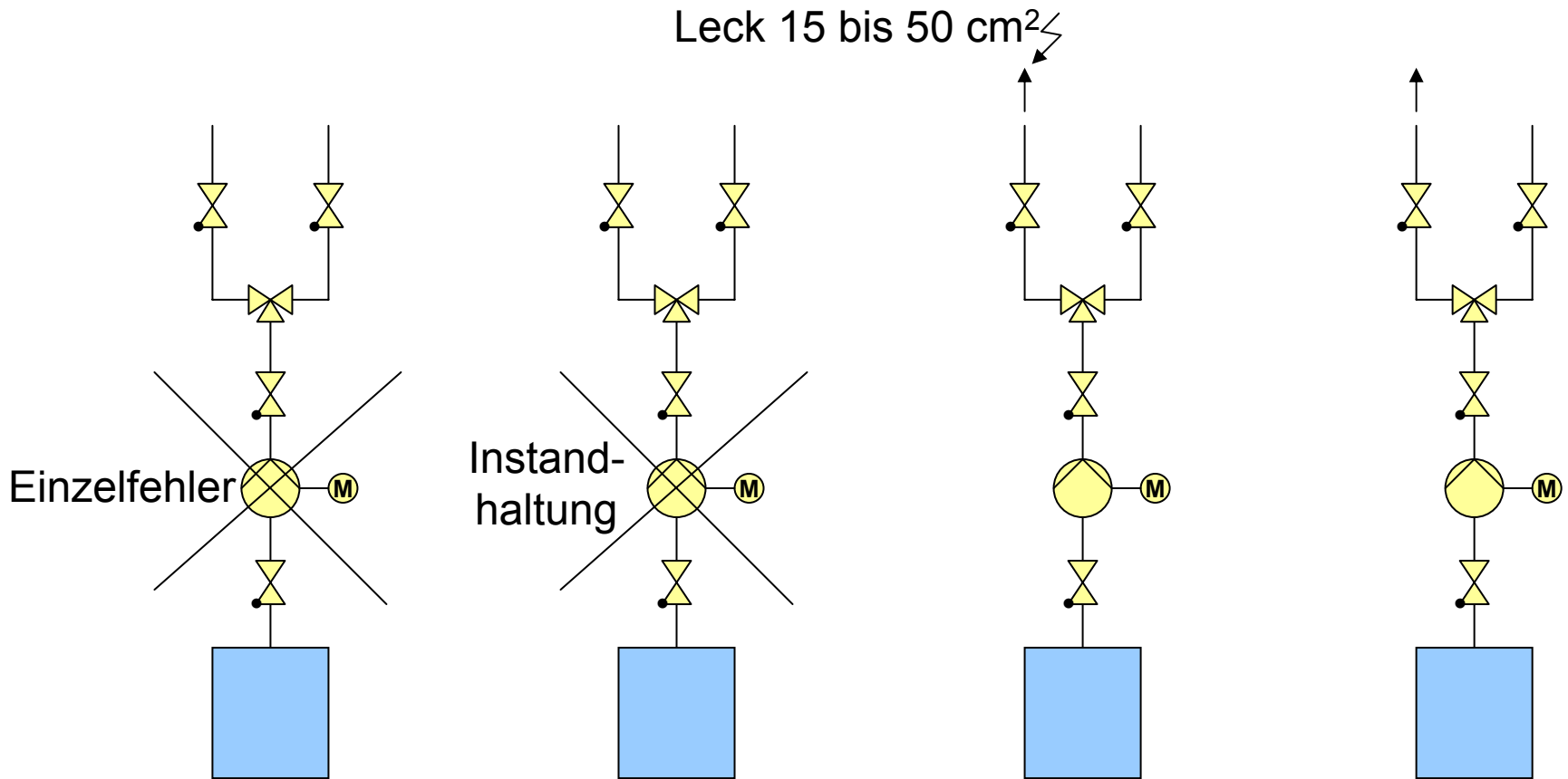


Bild 1: Konfiguration für relevante Deborierung



Deterministische Betrachtung in Deutschland – abdeckende Postulate bei Untersuchungen:

Neben Einzelfehler, Instandhaltungsfall, Leckbespeisung:

- Primärkreisleck mit ungünstigem Querschnitt -
entsprechende Anschlussleitung vorhanden?
- hohe kritische Borkonzentration: Zyklusbeginn, abdeckend
- abdeckend gleichzeitiger Start Naturumlauf in 2 Loops

→ Überlagerung von unwahrscheinlichen Anfangsbedingungen!

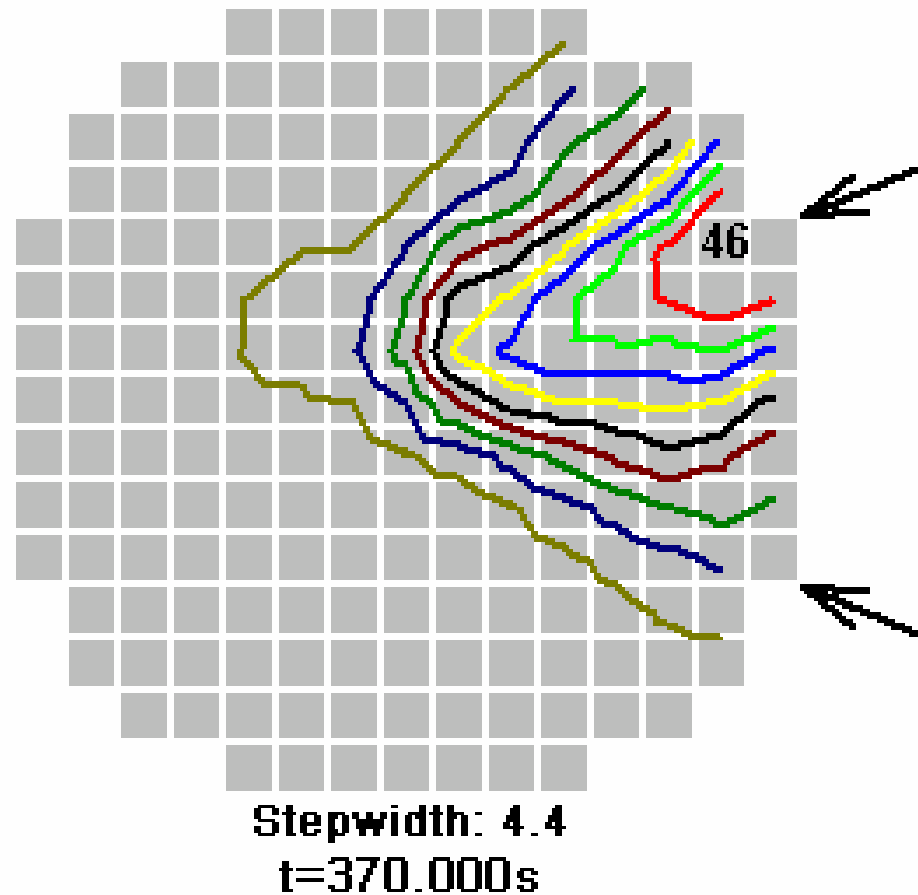
Deterministische Betrachtung – Konservativer Nachweis der Unterkritikalität (1)

Analysen ergeben die minimale Borkonzentration

- in der Kerneintrittsebene,
- an einer Brennelement-Position,
- zu einem Zeitpunkt.

→ Bild 2

Bild 2: Kerneintrittsquerschnitt mit Borkonzentrationen (ROCOM-Bericht)



Deterministische Betrachtung – Konservativer Nachweis der Unterkritikalität (2)

Ermittelte lokal und zeitlich begrenzte vorhandene Borkonzentration wird verglichen mit Borkonzentration, bei der der Kern kritisch würde, wenn

- der gesamte Kern dauerhaft mit Kühlmittel dieser Konzentration gefüllt wäre.

Hieraus resultiert real ein erheblicher Abstand zur Kritikalität.

Deterministische Betrachtung – Unterkritikalität erforderlich?

Unterkritikalität ist vorgelagertes Kriterium des Schutzziels
„Kontrolle der Reaktivität“

- Im Falle einer Reaktivität würde Leistung durch Temperatur- und Dichterückwirkung begrenzt
 - starke Dichterückwirkung, da KM wegen Leck in Sättigung ist
 - evtl. Leistungserzeugung wäre nur von kurzer Dauer (Pfropfendurchgang)
- Für ausreichende „Kontrolle der Reaktivität“ ist der Erhalt der Unterkritikalität nicht zwingend notwendig
- Nachweisziel „Unterkritikalität“ enthält weitere Konservativität

Probabilistische Betrachtung - Häufigkeit des Szenarios

Häufigkeit rel. Lecks gem. neuerer Untersuchungen: (VGB-Projekt SAAT 14/01, Okt. 2003)	< 3 E-4/a
&	
Störfalleintritt gegen Zyklusanfang (hohe krit. Borkonz.)	≈ 0,1
&	
Wahrscheinlichkeit Unverfügbarkeit Sicherheitseinspeise- Strang durch Ausfall (VGB-Datenbank ZEDB)	≈ 1 E-2
&	
Wahrscheinlichkeit Unverfügbarkeit SE-Strang durch Instandhaltung (max. 4 Wochen/Jahr)	< 0,1
&	
gleichzeitiges Starten Naturumlauf, LOBI, ...	< 1

Häufigkeit < 3 E-8/a → **aus probabilistischer Sicht untergeordnete
Bedeutung für Sicherheitsniveau**

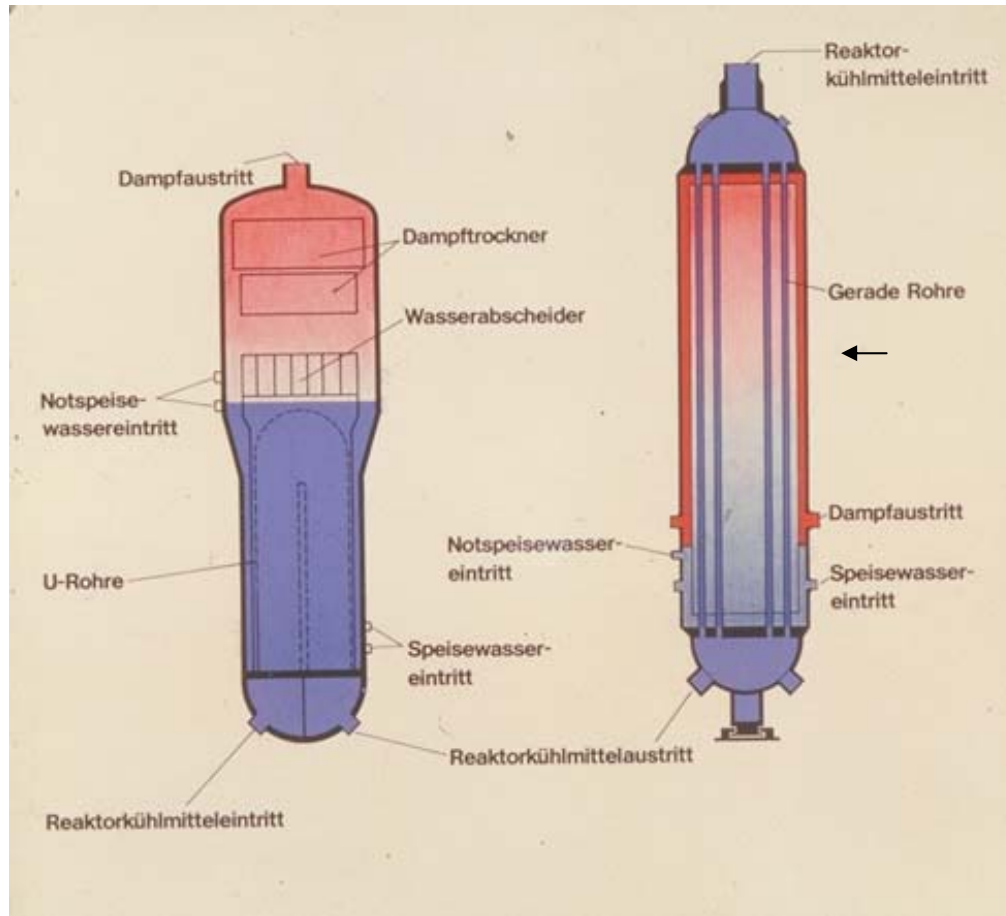
Vorgehen in den USA

(1)

- Untersuchung der Wahrscheinlichkeit von Deborierungsereignissen
- Kurzzeitige Kritikalität zulässig
- Hauptsächlich von Interesse:
 - Wiederschalten HKMP
 - Babcock & Wilcox-Anlagen
(Geradrohr-Dampferzeuger)

USA – vorrangig Relevanz bei Geradrohr-DE

AREVA-/
Westinghouse
- Design
(U-Rohr DE)



B&W Design
(Geradrohr DE)

Vorgehen in den USA

(2)

Brief des Vorsitzenden „Advisory Committee on Reactor Safeguards“
an NRC-Vorsitzenden (22.10.2004):

„The RES analyses ... have shown that recriticality for postulated boron dilution events is not possible in Westinghouse* and Combustion Engineering* reactor designs for either resumption of natural circulation or restart of a RCP.“

*: U-Rohr-Dampferzeuger,
ähnlich KWU-Anlagen

„The low probability of this event, coupled with its limited consequences, supports the conclusion that GSI-185 can be considered resolved for Babcock & Wilcox lowered-loop-plants, as well as for all other operation PWRs.“

Gesamtbewertung der sicherheitstechnischen Bedeutung

- Relevante Abläufe nur bei unwahrscheinlicher Überlagerung ungünstiger Randbedingungen
- Vorgehen bei Nachweisführung sehr konservativ
- Nachweis der Unterkritikalität anstelle Kontrolle Reaktivität
- Probabilistische Betrachtung ergibt untergeordnete Bedeutung für das Sicherheitsniveau
- Vorgehen in USA weniger konservativ

Versuche zu Reflux-Condenser in Deutschland

- UPTF** Mischverhalten über Temperaturerfassung im RDB-Ringraum
- 1992 bis 1997, Kühlung der RDB-Wand und Vermischung
 - Mischungsverhalten zur Verifizierung von S/KWU-Analysen

- PKL** Umlaufverhalten, Pfropfengröße, Borkonz. bis RDB-Eintritt
- ab 1996: 10 Umlaufversuche (davon 8 mit Borsäure)
 - Ergebnis: 350 - 2000 ppm am RDB-Eintritt

- ROCOM** Mischverhalten vom RDB-Eintritt bis Kerneintritt
- 2000 bis 2005, 5 Versuchsreihen zum Start Naturumlauf
 - Ergebnis: 1000 ppm bis 2000 ppm

Erkenntnisgewinn - Einsetzen Naturumlauf (1)

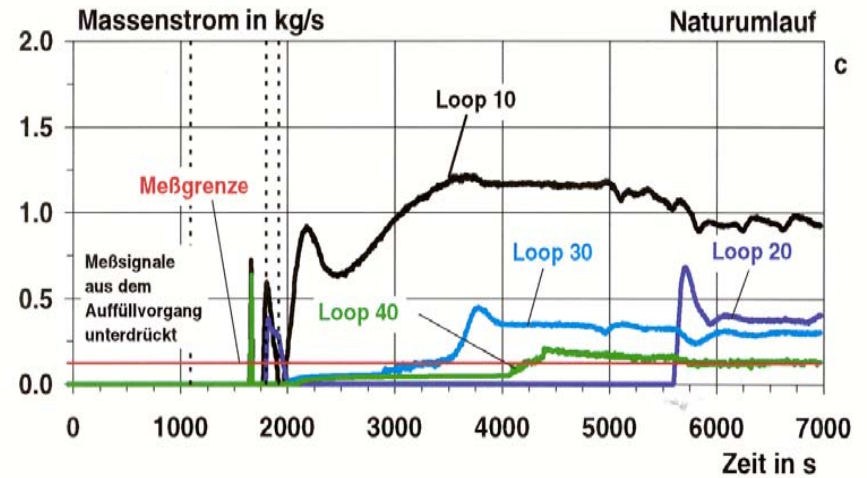
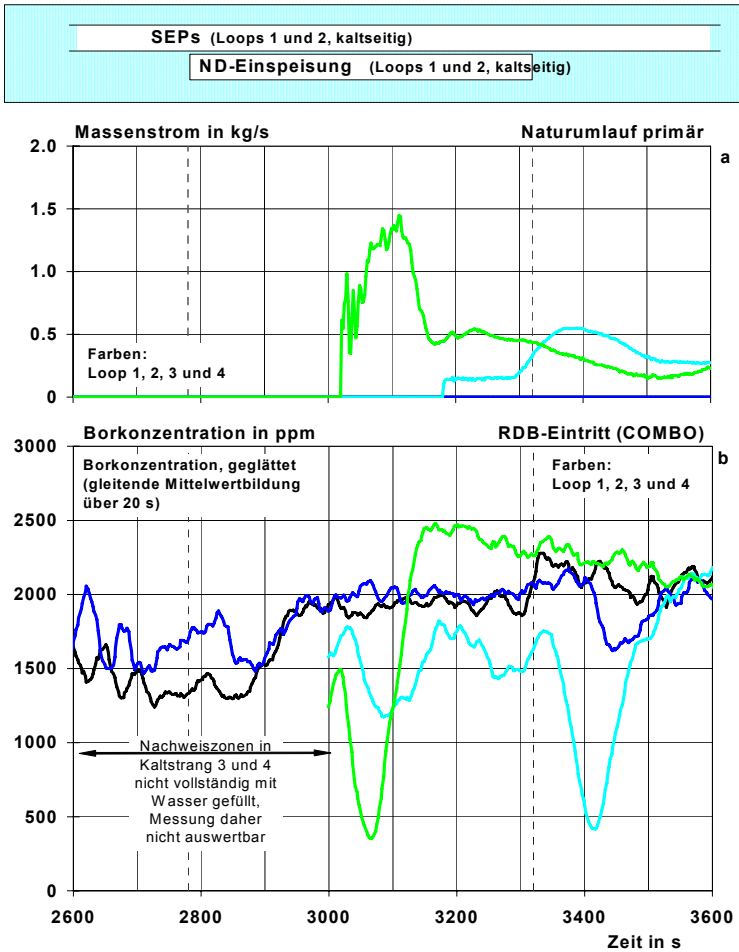
ursprüngliche Annahmen / Diskussionspunkte:

Min. Borkonzentration in Pumpenbögen: 50 ppm!
(\ll kritische Borkonzentration)

Gleichzeitiges Einsetzen des Naturumlaufs in allen Loops??

sehr abdeckende Bedingungen für
Vermischung in RDB-Ringraum und
unterem Plenum!

Bild 3: Naturumlauf-Massenstrom-Verläufe bei PKL-Versuchen (Beispiele)



PKL-Versuch D2.2
 (heißs. Leck, symm. Einsp. heiß u. kalt)

← **PKL-Versuch E2.2 (kalts. Leck, 2 kalts. Einsp.)**

Erkenntnisgewinn - Einsetzen Naturumlauf (2)

PKL-Versuche der Serien III D und E zeigten:

Loops laufen getrennt an

trotzdem abdeckende Annahme:

2 Loops ohne Notkühleinspeisung laufen
zuerst und gleichzeitig an

Ergebnis der Untersuchungen:

→ Unterkritikalität bestätigt

Erkenntnisgewinn - Aufborierung bei „kalt/kalt“

Diskussionspunkt zu Szenarien mit kaltseit. Notkühleinspeisung:

Aus UPTF-Versuchen abgeleitete Stärke der Aufborierung in RDB-Ringraum und unteren Plenum wird angezweifelt.

Analysen mit CFD-Code PHOENICS und Versuche an ROCOM-Anlage bestätigen UPTF Ergebnisse,

PHOENICS-Analyse entspr. PKL III E2.2: $C_{\min, \text{Kerneintritt}}$	= 1686 ppm
ROCOM-Versuch entspr. PKL III E2.2: $C_{\min, \text{Kerneintritt}}$	= 1785 ppm
ROCOM-Versuch entspr. PKL III F1.4: $C_{\min, \text{Kerneintritt}}$	= 1688 ppm

→ Unterkritikalität bestätigt

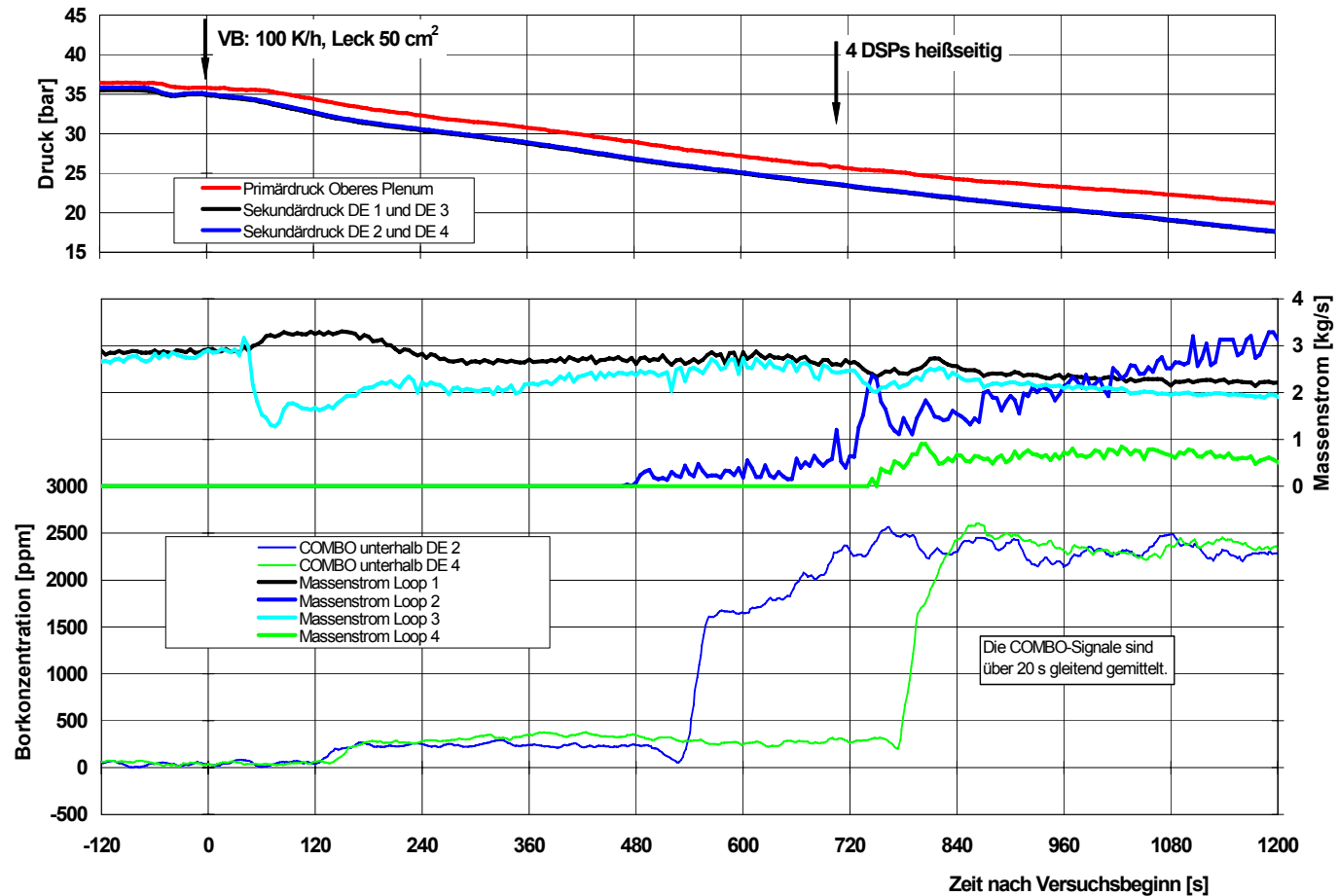
Erkenntnisgewinn - LOBI-Szenario (1)

Szenario: heißseitige Notkühleinspeisung mit Umlenkung in Richtung der Dampferzeuger, 2 Loops laufen durch, unbespeiste Loops laufen wieder an (LOBI- MOD2TEST A1-82)

Berechnungen mit ATHLET für Konvoi-Anlage:
etwa gleiche Naturumlauf-Massenströme im RDB-Ringraum, sehr schlechte Vermischung!

RELAP: „LOBI-Verhalten“ tritt nicht auf

Bild 4: Naturumlauf-Massenstrom-Verlauf bei PKL-Versuch III E2.3 (LOBI-Szenario)



Erkenntnisgewinn - LOBI-Szenario (2)

PKL III E2.3: „LOBI“-Verhalten lässt sich herbeiführen, jedoch nur unter Realanlage-fremden Bedingungen

- „LOBI-Verhalten“ endete kurz nach Übergang
in instationäre Phase

- Naturumlauf-Massenströme stark unterschiedlich

Abdeckende Analysen auf Basis von
PKL III E2.3- und ROCOM-Versuchen:

→ Unterkritikalität bestätigt

Erkenntnisgewinn - Übertragbarkeit PKL

Phänomenologie und quantitative Ergebnisse aus PKL auf Realanlage übertragbar?

Ergebnisse aus PKL sind qualitativ voll übertragbar, quantitativ mit gewisser Unsicherheit übertragbar → nächster Vortrag

Unsicherheiten durch große Konservativitäten abgedeckt, z. B.:

- Zuschläge zu Ausgangsleistung und Nachzerfallsleistung
- abdeckend große Mengen von angesammeltem Kondensat
- Lage des Lecks möglichst ungünstig
- Naturumlauf so, dass Pfropfen genau gleichzeitig am RDB eintreffen

Erkenntnisgewinn - Zusammenfassung

- Neue postulierte Phänomene und Aspekte:
nicht relevant für Gesamtaussage
- Alle Untersuchungen: Unterkritikalität bestätigt
- Änderungen an Anlagentechnik, Fahrweisen oder Betriebsunterlagen waren und sind nicht erforderlich
- Auslegung und Betriebsweise der deutschen DWR auch unter dem Aspekt „Kleines Leck mit Reflux-Condenser-Betrieb“ bestätigt

Fazit

- Sicherheitstechnische Relevanz ist aus deterministischer und aus probabilistischer Sicht eingeschränkt.
- sehr konservatives Vorgehen bei Nachweisführung
- Untersuchung neu aufgeworfener Fragen führten stets zu dem gleichen Ergebnis: Unterkritikalität sichergestellt
- Auslegung und Betriebsweise der deutschen DWR bestätigt

Kenntnisstand zu unterstellten Borverdünnungsszenarien in DWR

Borverdünnungsszenarien und ihre sicherheitstechnische Bedeutung

Winfried Pointner,
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH, Garching

Borverdünnungsszenarien und ihre sicherheitstechnische Bedeutung

1 Einleitung

Borsäure wird als lösbarer Neutronenabsorber im Primärkreis von Druckwasserreaktoren eingesetzt. Unter normalen Betriebsbedingungen wird mit Hilfe der Borsäure die Reaktivität kontrolliert und Abbrand und Xenonvergiftung innerhalb der vorgegebenen Reaktivitätsmargen kompensiert. Bei Revision der Anlage und Beladung des Kerns wird mit Hilfe der Borsäure die geforderte Unterkritikalität eingestellt.

Wenn während eines Störfalls die Borkonzentration im Kern unter die kritische Borkonzentration fällt, erfolgt eine Rekritikalität mit einem Anstieg der Reaktorleistung. Kernschäden sind dabei nicht auszuschließen, wenn durch einen schnellen und starken Abfall der Borkonzentration eine prompte Kritikalität auftritt oder wenn aufgrund des Systemzustands (niedriger Druck und Kerndurchsatz) die Reaktorleistung nicht abgeführt werden kann.

2 Problemstellung

Probabilistische Sicherheitsanalysen /CSN95/ haben ergeben, dass Störfälle mit Borverdünnung erheblich zu Kernschäden beitragen können.

Untersuchungen haben ergeben, dass Deborierungsstörfälle entweder durch eine unbeabsichtigte Borverdünnung im Nichtleistungsbetrieb (Instandhaltungsvorgänge) oder bei Störfällen mit Kondensatbildung im Primärkreis auftreten. Die wesentlichen Phänomene, die bei Deborierungsereignissen eine Rolle spielen sind:

- die Ansammlung und die Größe von niedrig borierten Kühlmittel,
- der Transport und die Vermischung des niedrig borierten Kühlmittel auf dem Weg zum Kern und
- das Verhalten des Kerns in Bezug auf eine Leistungserhöhung und die Wärmeabfuhr aus dem Kern.

Die Deborierungsstörfälle können in zwei Gruppen aufgeteilt werden:

- Homogene Vermischung tritt auf, wenn niedrig boriertes Kühlmittel oder Deionat eingespeist wird und die Strömungsbedingungen ausreichen, das zugeführte Kühlmittel effektiv mit dem vorhandenen Inventar im Primärkreis zu vermischen.
- Inhomogene Vermischung tritt auf, wenn das eingespeiste, ausgelaufene oder kondensierte Kühlmittel einen Pfropfen mit niedriger Borkonzentration im Primärkreis bildet.

Der Reaktivitätseintrag und die Leistungsexkursion erfolgt daher auf 2 Arten:

- Langsame Borverdünnung und Leistungsanstieg bei bestehender Kühlmittelumwälzung,
- schnelle Borverdünnung und Leistungsexkursion (mit möglicher prompter Kritikalität) bei Wiederanfahren einer Hauptkühlmittelpumpe bzw. Wiederanlauf des Naturumlaufs und vorherigen inhomogener Deborierung.

3 Szenarien

Wegen der möglichen Kernschäden sind die Störfälle mit der inhomogenen Ansammlung von niedrig borierten Kühlmittel oder Deionat von Bedeutung.

Eine inhomogene Ansammlung von niedrig borierten Kühlmittel oder Deionat kann nur erfolgen, wenn an der Einspeisestelle bzw. am Entstehungsort des Kondensats keine erzwungene Strömung bzw. Naturumlauf herrscht. Diese Zustände können auftreten, wenn

- die Hauptkühlmittelpumpen ausgefallen sind bzw. nicht fördern können und
- sich kein Naturumlauf einstellen kann.

Der Naturumlauf wird unterbrochen, wenn das Kühlmittelinventar in den Dampferzeugern soweit abgesenkt wurde, dass kein Kühlmittel über die U-Rohrbögen strömen kann. Dies ist der Fall bei Leckstörfällen, bei abgesenktem Füllstand im Nichtleistungsbetrieb und bei Abfahrvorgängen bei denen ein Dampferzeuger bei hohem Druck stehen bleibt (Ausdampfen der Dampferzeuger U-Rohre). Auch bei sehr geringem Energieeintrag in das Primärsystem (vor dem Anfahren der Anlage) kann die

treibende Kraft für den Naturumlauf so klein sein, dass Dichteunterschiede im Kühlkreislauf nicht überwunden werden können.

Das niedrig borierte Kühlmittel kann durch folgende Mechanismen in den Primärkreislauf gelangen:

- Einspeisung aus Deionat führenden Systemen (z.B. Volumenregelsystem, Dichtungssperrwasser),
- Lecks bzw. Leckagen aus angrenzenden Deionat führenden Systemen (z.B. Dampferzeugerheizrohrleck, Nachwärmekühler),
- Falsche Borkonzentration in angrenzenden Behältern und Leitungen (z.B. Flutbehälter, Notkühlsystem, Volumenregelsystem) und
- Bildung von niedrig borierten Kühlmittel durch Kondensation von Dampf im Reflux-Condenser-Betrieb (kleine Lecks, Ausfall der Nachwärmeabfuhr im Mitte-Loop-Betrieb, Auslegungsüberschreitende Störfälle mit verzögerter ausreichender sekundären Wärmeabfuhr z.B. Station Blockout, vollständiger Ausfall Speisewasser, ATWS).

4 Bedeutung für deutsche Anlagen

Alle in Kapitel 3 aufgelisteten Szenarien sind auch in deutschen Druckwasserreaktoren nicht ausgeschlossen. Durch Verriegelungen im Volumenregelsystem oder beim Wiederanfahren der Hauptkühlmittelpumpen und Inspektionen an den Dampferzeuger-U-Rohren wird die Eintrittswahrscheinlichkeit vieler Störfälle minimiert.

Untersuchungen für die deutsche KWU Druckwasserreaktoren haben aber gezeigt, dass die Störfälle mit Reflux-Condenser-Betrieb von größerer Bedeutung sind als bei Druckwasserreaktoren anderer Hersteller in anderen Ländern. Dies ist einerseits auf das Einspeisekonzept (Staffelung Hochdruck-/Niederdruckeinspeisung, kombinierte Einspeisung, Abfahrgradient) und andererseits auf das deutsche Regelwerk (Berücksichtigung von Einzelfehler und Reparaturfall bei Auslegungsstörfällen) zurückzuführen.

Thermohydraulische Berechnungen haben ergeben, dass bei kleinen Leckstörfällen mit "Reflux-Condenser"-Betrieb und beim Ausfall der Nachwärmeabfuhr bei Mitte-Loop-Betrieb die für die Unterkritikalität erforderliche Borkonzentration möglicherweise nicht durchgängig gewährleistet ist. /TES 01/. Die Analysen haben gezeigt, dass bei kleinen Lecks auf der kalten Seite mit kaltseitiger Hochdruckeinspeisung und auf der heißen Seite mit heißseitiger Hochdruckeinspeisung die größten Pfropfen von niedrig borierten Kondensat auf der kalten Seite der Kühlkreisläufe insbesondere zwischen dem Dampf-erzeugeraustrittsplenum und den Hauptkühlmittelpumpen gebildet werden. Bei heißseitigen kleinen Lecks erfolgt die Kondensatbildung nur in den unbespeisten Kühlkreisläufen, wenn in den bespeisten Kühlkreisläufen der Naturumlauf bestehen bleibt /BUR 02; POI 04/.

5 Experimentelle Untersuchungen

Die Experimentellen Untersuchungen konzentrieren sich auf folgende wesentlichen Phänomene bei Deborierungsstörfällen:

- Erzeugung und Ansammlung von niedrig borierten Kondensat im Primärkreislauf im Reflux-Condenser-Betrieb,
- Vermischungsphänomene im Kühlkreislauf bei der Wiederauffüllung des Primärkreislaufs vor Anlauf des Naturumlafs,
- Bestimmung der Größe des Naturumlafs und
- Vermischung von niedrig borierten Kondensat mit hoch borierten Kondensat auf dem Weg von zum Kern beim Wiederanlauf des Naturumlafs bzw. beim Wiederanfahren einer Hauptkühlmittelpumpe

In den PKL-Versuchsserien E und F /FRA 02, FRA 03.1, FRA 03.2, FRA 04.1, FRA 04.2, FRA 05/ wurde die interne Deborierung bei kleinen Lecks mit Reflux-Condenser-Betrieb und beim Ausfall der Nachwärmeabfuhr bei Mitte-Loop-Betrieb untersucht. Die Versuche haben ausreichend Daten zur Erzeugung, zur Ansammlung, zur Vorvermischung und zum Transport von Kondensat geliefert. Diese Daten können als Randbedingung für Vermischungsversuch herangezogen werden.

Die PKL-Versuche zeigten, dass sich in den Pumpenbögen bis zu 7.5 t niedrig boriertes Kondensat ansammelt. Nach der Wiederauffüllphase und auf dem Weg zum Ringraum wurde für kaltseitige Lecks mit kaltseitiger Einspeisung eine Aufborierung auf 350 ppm (Versuch mit maximaler Größe des Kondensatpfropfens) bzw. 450 ppm (Versuch unter Genehmigungsrandbedingungen) gemessen.

Der PKL-Versuch E3.1 /FRA03.2/ zum Ausfall der Nachkühlung bei Mitte-Loop Betrieb hat gezeigt, dass langfristig nicht nur der kalte Strang sondern auch der Ringraum deboriert werden kann. Wenn jedoch in den ersten 2 Stunden der Primärkreis wieder so weit durch Handmaßnahmen aufgefüllt wird, dass der Naturumlauf startet, kann eine Entborierung im kalten Strang und im Ringraum vermieden werden.

Die Vermischungsphänomene von niedrig borierten Kühlmittel mit hoch borierten Kühlmittel im Ringraum und im unteren Plenum wurden in ROCOM (Rossendorf) untersucht. Neben dem Anlaufen einer Hauptkühlmittelpumpe wurden in ROCOM auch Versuche zur Vermischung beim Anlauf des Naturumlaufs durchgeführt /GRU03.2/. Die ROCOM Versuche zeigten eine Aufborierung eines 7 m³ Deionatpfropfens um 60 % beim Start einer Hauptkühlmittelpumpe und bei einem 14 m³ Deionatpfropfen um 55 % beim Anlauf des Naturumlaufs.

Die Vermischung von Deionat-Pfropfen mit umgebendem Kühlmittel im Ringraum wurde auch in der Upper Plenum Test Facility (UPTF) untersucht. UPTF ist das Model eines deutschen 4-Loop Druckwasserreaktors im Maßstab 1:1. In den UPTF TRAM C3 Versuchen wurde Vermischung bei Naturkonvektion mit Notkühleinspeisung in den kalten Strängen /SON 02/ untersucht.

6 Regulatorische Randbedingungen

Die regulatorischen Anforderungen zur Sicherstellung der Unterkritikalität bei Störfällen sind in den BMI-Kriterien, in der RSK-Leitlinie und den KTA-Regeln enthalten.

Die BMI-Kriterien fordern, dass der Reaktorkern, die Kühlsysteme und die Abschaltanlagen so ausgelegt sein müssen, dass die für Störfälle spezifizierten Grenzwerte eingehalten werden. Der Reaktorkern muss so ausgelegt sein, dass prompte Rückkopplungseigenschaften schnelle Reaktivitätsanstiege soweit abfangen, dass keine

sicherheitstechnisch bedeutsame Schäden am Reaktorkern und im Kühlkreislauf eintreten.

Die RSK-Leitlinie konkretisiert die Anforderungen aus den BMI-Kriterien. Die RSK-Leitlinie erlaubt das Wiederkritischwerden bei Störfällen mit maximaler Abkühlgeschwindigkeit (z. B. Frischdampfleitungsbruch oder Zulauf von kaltem Wasser). Für Deborierungsereignisse wird ein Wiederkritischwerden nicht zugelassen.

7 Nachweisführung

Da die Nachweisführung zur Unterkritikalität noch nicht vollständig analytisch erfolgen kann, wurde vom TÜV und der GRS eine Stellungnahme erstellt, deren Einhaltung die Unterkritikalität bei kleinen Leckstörfällen mit Reflux-Condenser-Betrieb sicherstellt /TÜV 03/.

Aus den PKL-Versuchen /FRA02, FRA04.2/ und den analytischen Ergebnissen /BUR 02/ lässt sich ableiten, dass die Borkonzentration bei einem kaltseitigen Leck mit kaltseitiger Einspeisung mindestens 800 ppm am Kerneintritt beträgt. Die Aufborierung im unteren Plenum durch Vermischung mit dem Umgebungswasser wurde dabei nicht berücksichtigt, da das ATHLET-Modell hierfür nicht abgesichert ist.

Für die Aufborierung eines Kondensatpfropfens bei den Randbedingungen von einem heißseitigen kleinen Leck mit heißseitiger Hochdruckeinspeisung liegen bereits Messdaten aus der ROCOM-Versuchsanlage für konservative aus Reaktoranalysen (ATHLET) abgeleitete Randbedingungen /BUR 02/ vor. Die Messdaten aus ROCOM zeigen, dass die Borkonzentration am Kerneintritt nicht unter 850 ppm fällt /GRU 03.1/.

8 Schlussfolgerungen

Die Szenarien und deren Phänomene, die zu Deborierungsstörfällen führen können, sind weitgehend in Experimenten (PKL, UPTF, ROCOM) untersucht worden. Es bestehen jedoch Unsicherheiten bei der Übertragung der Versuchsergebnisse auf die Realanlagen wegen Skalierungseffekten. Die TÜV-GRS-Stellungnahme /TÜV 03/ hat Obergrenzen für die kritische Bor-Konzentration bei Leckstörfällen (800 ppm für kaltseitiges

Leck, 850 ppm heißseitiges Leck) festgelegt, die Unterkritikalität sicherstellen. In der Kernausslegung bestehen Tendenzen zu höheren kritischen Borkonzentrationen. Falls bei Leckstörfällen die kritische Borkonzentration, die oben beschriebenen sind, überschritten werden, muss die Einhaltung der Unterkritikalität anlagenspezifisch nachgewiesen werden.

9 Literatur

- /BUR 02/ M.J. Burwell, H. Glaeser, G. Lerchl, W. Pointner, H.G. Sonnenburg Thermohydraulische Untersuchungen zur Deborierung;
GRS-A-3068, Juli 2002

- /CSN95/ Meeting Summary, Proceedings of the OECD Specialist Meeting on Boron Dilution Reactivity Transients, State College Pennsylvania, USA, October 1995

- /FRA 02/ Framatome ANP, OECD/SETH, Test PKL III, E2.2, FANP TGTI/02/en/44

- /FRA 03.1/ Framatome ANP, OECD/SETH, Test PKL III, E2.3, FANP TGTI/03/en/47

- /FRA 03.2/ Framatome ANP, OECD/SETH, Test PKL III, E3.1, FANP TGTI/03/en/10

- /FRA 04.1/ Framatome ANP, PKL III Versuchsvorhaben, 42. Sitzung der AG PKL III, Versuch F 1.3, März 2004

- /FRA 04.2/ Framatome ANP, PKL III Versuchsvorhaben, 43. Sitzung der AG PKL III, Versuche F 1.1 und F 1.4, Dezember 2004

- /FRA 05/ Framatome ANP, PKL III Versuchsvorhaben, 44. Sitzung der AG PKL III Versuch F 1.2, April 2005

- /GRU 03.1/ G. Grunwald, et. al., Forschungs- und Entwicklungsvorhaben des SA „Anlagentechnik“, "Experimentelle Untersuchung unter den Bedingungen wieder anlaufenden Naturumlaufs", VGB-Kennziffer: SA "AT" 29/01, März 2003

- /GRU 03.2/ G. Grunwald, et al.. Kühlmittelvermischung in Druckwasserreaktoren, Experimentelle Ausrüstung und Simulation der Vermischung, FZR-367, Februar 2003, ISSN 1437-322X
- /POI 04/ W. Pointner, Thermohydraulische Analysen im Rahmen der Bundesaufsicht, GRS-A-3154, April 2004
- /SON 02/ H. G. Sonnenburg, Auswertung der Strömungs- und Vermischungsvorgänge im Ringraum und unteren Plenum an Hand des Versuchs UPTF C3, GRS-A-3091, Mai 2002
- /TES 01/ V. Teschendorff et. al., Verbesserung und Absicherung der analytischen Methoden zur Analyse von Deborierungsereignissen, GRS-A-2972, Oktober 2001
- /TÜV 03/ <http://ln-gar03/grs/portal/gensi.nsf>

Borverdünnungsszenarien und ihre sicherheits- technische Bedeutung

KTG-Fachtagung

Aktuelle Themen der Reaktorsicherheitsforschung in Deutschland

Winfried Pointner

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH

Forschungszentrum Rossendorf, 03.-04.04.2006

Inhalt

- Problemstellung
- Charakterisierung von Borverdünnungsstörfällen
- Szenarien mit inhomogener Borverdünnung
- Bedeutung der Szenarien mit inhomogener Borverdünnung für Deutsche DWR
- Phänomene bei Störfällen mit interner Deborierung
- Störfälle mit interner Deborierung
- Experimentelle Untersuchungen
- Regulatorische Randbedingungen
- Nachweisführung zur Aufborierung von Kondensat bei Störfällen mit Reflux-Condenser-Betrieb
- Zusammenfassung

Problemstellung

- In Druckwasserreaktoren wird mit Hilfe von Borsäure die Reaktivität kontrolliert und der Abbrand und Xenonvergiftung innerhalb vorgegebener Reaktivitätsmargen kompensiert.
- Im Nichtleistungsbetrieb wird mit Hilfe von Borsäure die geforderte Unterkritikalität eingestellt.
- Wenn die Borkonzentration im Kern unter die kritische Borkonzentration fällt, erfolgt Rekritikalität mit einem Anstieg der Reaktorleistung.
- Ein schneller und starker Abfall der Borkonzentration kann zu einer prompten Kritikalität führen, bei der Kernschäden nicht ausgeschlossen werden können.

Charakterisierung von Borverdünnungsstörfällen (1)

- Homogene Borverdünnung
 - Die Strömungsbedingungen im Kühlmittelkreislauf reichen aus das zugeführte niedrig borierte Kühlmittel oder Deionat effektiv mit dem vorhandenen borierten Kühlmittel zu vermischen.
 - Langsame Borverdünnung im Kern und langsamer Leistungsanstieg bei bestehender Kühlmittelumwälzung
- Inhomogene Borverdünnung
 - Im Kühlmittelkreislauf herrscht eine Strömungsstagnation und das zugeführte niedrig borierte Kühlmittel oder Deionat bildet einen Pfropfen.
 - Bei Wiederaufstart einer Hauptkühlmittelpumpe bzw. Wiederaufstart des Naturumlaufs erfolgt eine schnelle ausgeprägte Borverdünnung im Kern und Leistungsexkursion.

Charakterisierung von Borverdünnungsstörfällen (2)

- Eine inhomogene Borverdünnung tritt auf, wenn an der Einspeisestelle bzw. am Entstehungsort des Kondensats keine erzwungene Strömung bzw. kein Naturumlauf vorhanden ist.
- Der Naturumlauf wird unterbrochen, wenn
 - das Kühlmittelinventar im Primärkreis soweit abgesenkt wurde, dass kein Kühlmittel über die U-Rohrbögen strömen kann (z.B. Leckstörfälle),
 - die Dampferzeuger-U-Rohre ausdampfen (Abfahrvorgänge) oder
 - treibende Kräfte für den Naturumlauf nicht ausreichend sind (vor Anfahren der Anlage).

Szenarien mit inhomogener Borverdünnung

- Einspeisung aus Deionat führenden Systemen (z.B. Volumenregelsystem, Dichtungssperwasser)
- Lecks bzw. Leckagen aus angrenzenden Deionat führenden Systemen (z.B. Dampferzeugerheizrohrleck, Nachwärmekühler)
- Falsche Borkonzentration in angrenzenden Behältern und Leitungen (z.B. Flutbehälter, Notkühlsysteme)
- Bildung von niedrig boriertem Kühlmittel durch Kondensation von Dampf im Reflux-Condenser-Betrieb (interne Deborierung)

Bedeutung der Szenarien mit inhomogener Borverdünnung für deutsche DWR (1)

- Die Eintrittswahrscheinlichkeit von Störfällen mit inhomogener Borverdünnung wird minimiert durch z.B.
 - Verriegelungen im Volumenregelsystem
 - Verriegelungen beim Anfahren der Hauptkühlmittelpumpen
 - Inspektionen der Dampferzeuger-U-Rohre
 - administrative Maßnahmen
- Bei Störfällen mit Reflux-Condenser-Betrieb (z.B. kleines Leck) ist die Bildung und Ansammlung von Kondensat in den Kühlmittelschleifen nicht zu vermeiden.

Bedeutung der Szenarien mit inhomogener Borverdünnung für deutsche DWR (2)

- In deutschen DWR ist die Borverdünnung bei kleinen Lecks (interne Deborierung) von größerer Bedeutung als in anderen DWR
 - Druckstaffelung der Einspeisesysteme
 - Abfahrgradient
 - kombinierte Einspeisung
 - Berücksichtigung von Einzelfehlern und Instandhaltung

Phänomene bei Störfällen mit interner Deborierung

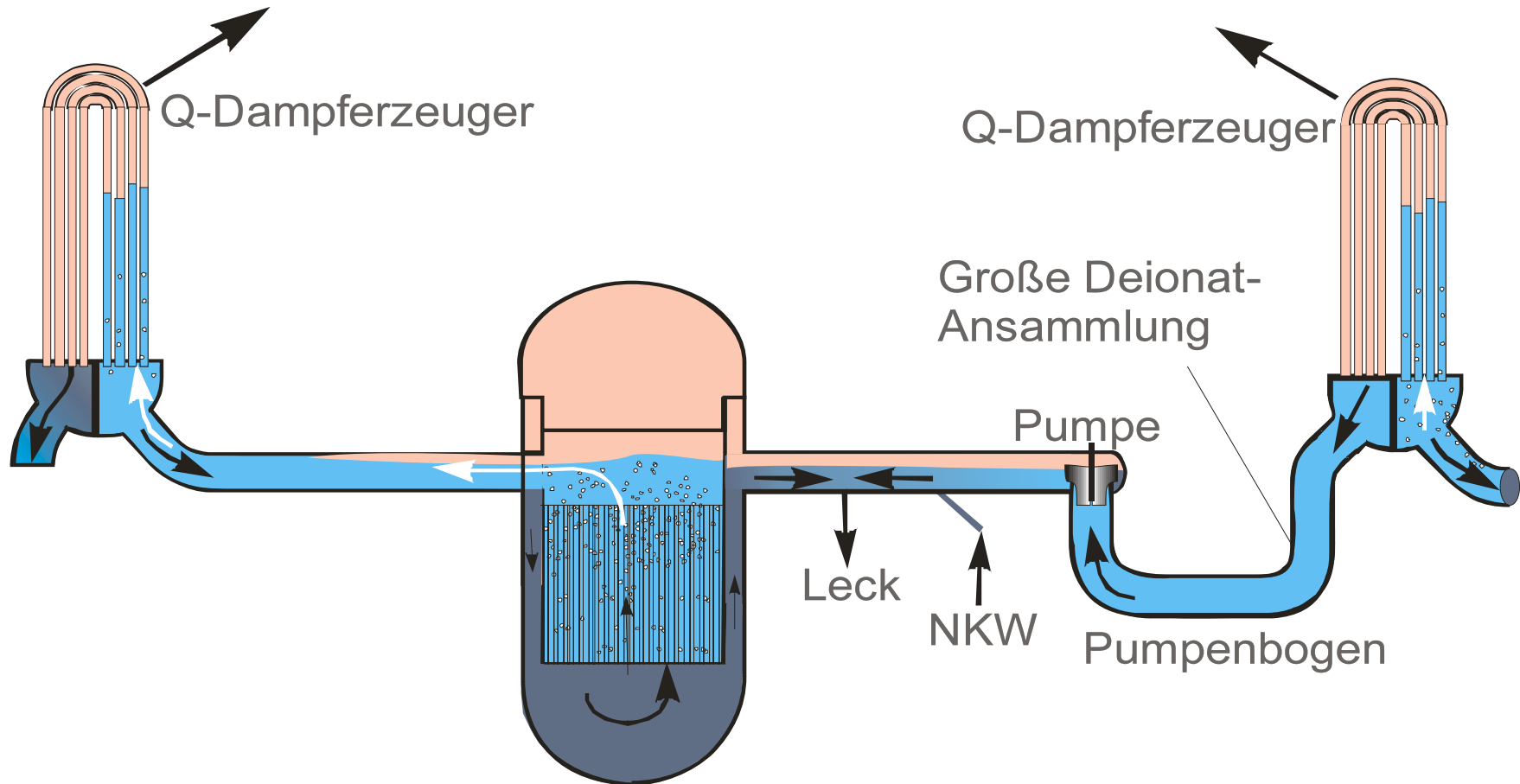
- Bildung von Kondensat
- Ansammlung des gebildeten Kondensats
- Transport des Kondensats zum Kern
- Vermischung des Kondensats mit dem umgebenden borierten Kühlmittel
- Reaktivitätszufuhr und Leistungsexkursion im Kern
- Wärmeabfuhr aus dem Kern

Störfälle mit interner Deborierung

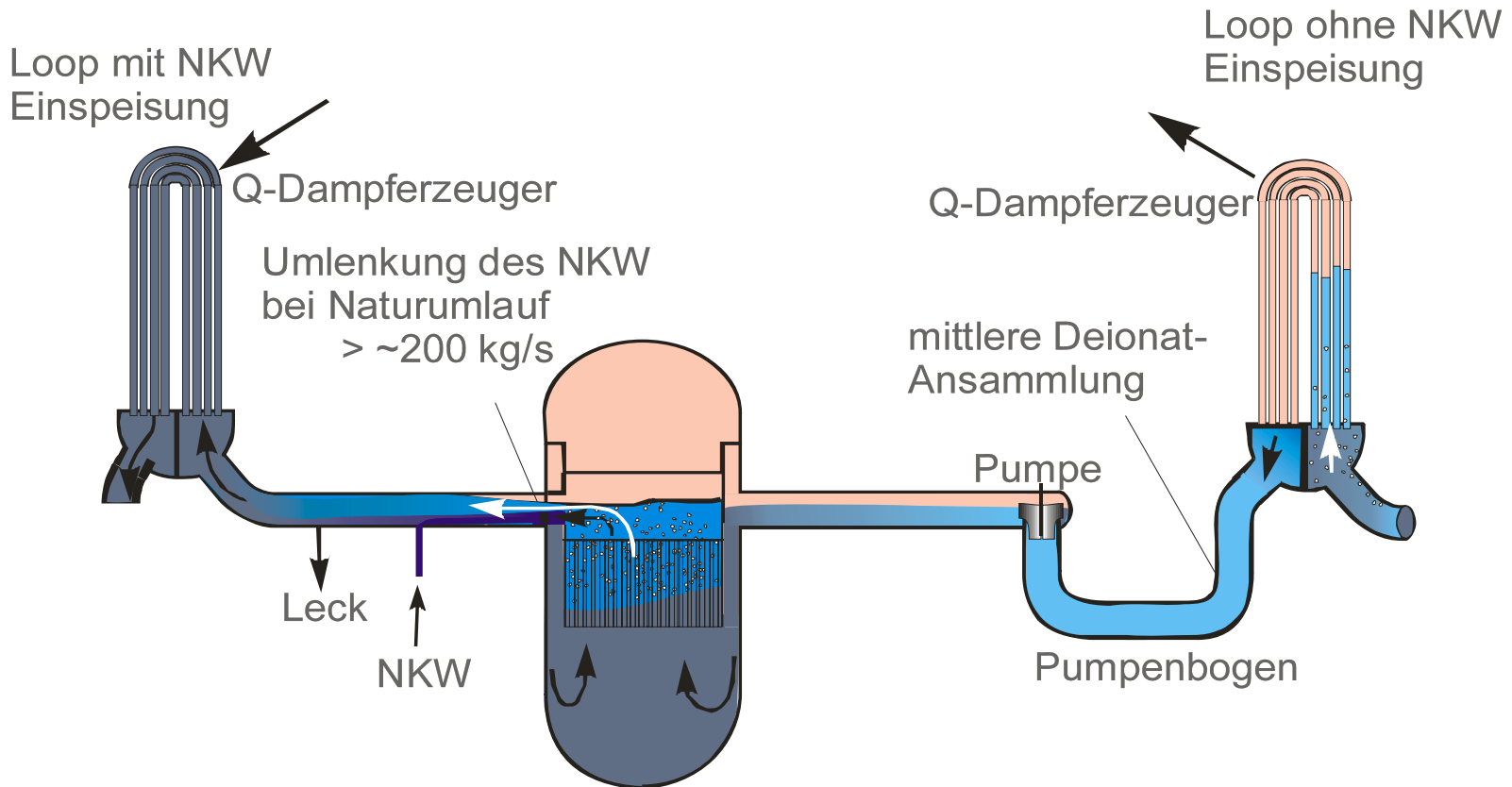
Folgende Störfälle führen unter Genehmigungsrandbedingungen zu einer großen Ansammlung von niedrig boriertem Kondensat Primärkreislauf

- Kleines Leck im kalten Strang mit kaltseitiger Sicherheitseinspeisung
- Heißseitiges Leck mit heißseitiger Sicherheitseinspeisung und bestehen bleibendem Naturumlauf in den bespeisten Kühlkreisläufen
- Ausfall der Nachwärmeabfuhr im abgeschalteten Zustand bei Mitte-Loop-Betrieb

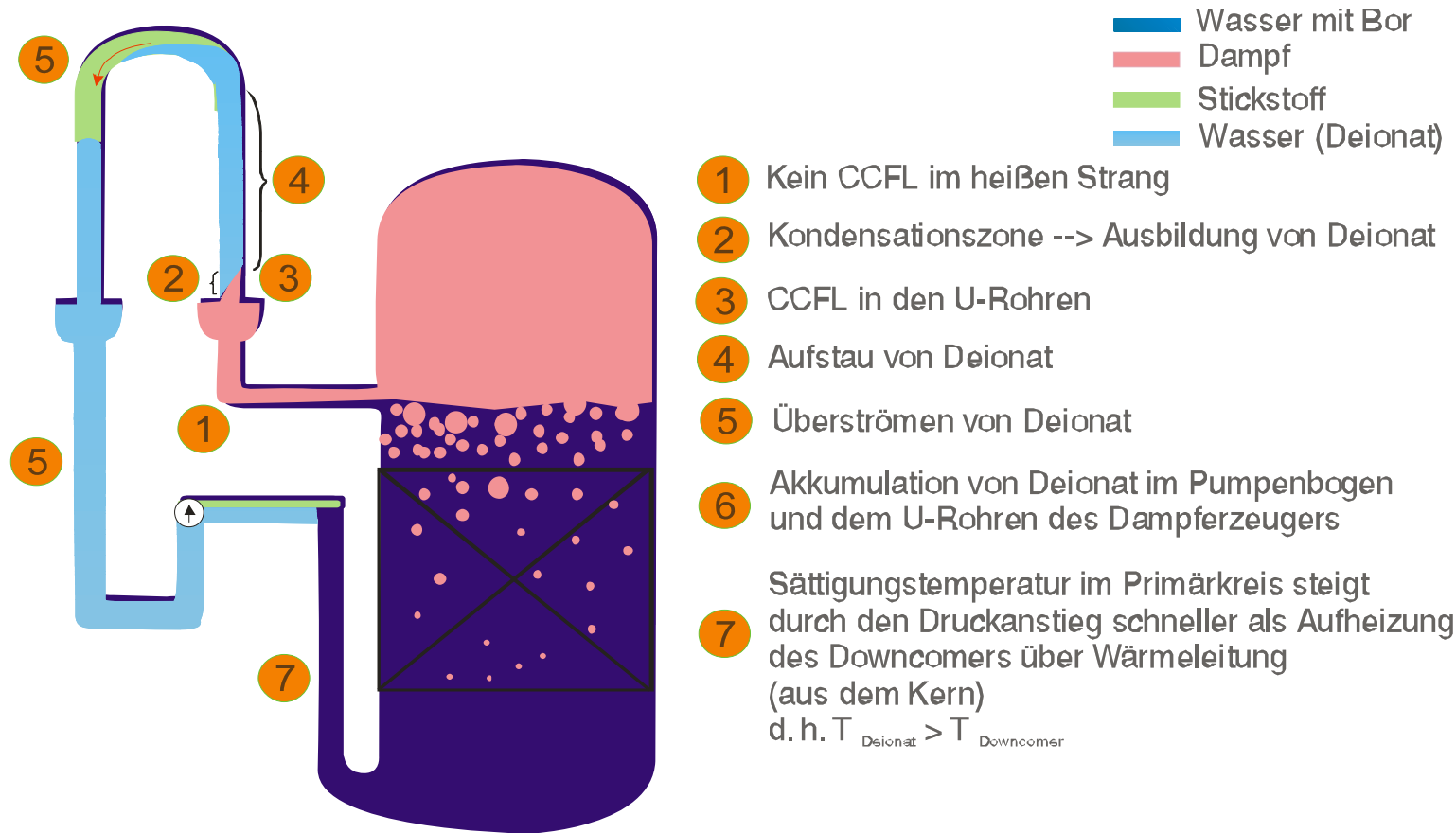
Kleines Leck im kalten Strang mit kaltseitiger Sicherheitseinspeisung



Kleines Leck im heißen Strang mit heißseitiger Sicherheitseinspeisung und bestehen bleibendem Naturumlauf in den bespeisten Kühlkreisläufen (LOBI/GRS PKL III 2.3-Szenario)



Ausfall der Nachwärmeabfuhr im abgeschalteten Zustand bei Mitte-Loop-Betrieb



Experimentelle Untersuchungen (1)

Versuchsziele

- PKL-Versuchsserie E und F
 - Erzeugung und Ansammlung von Kondensat im Primärkreislauf bei Reflux-Condenser-Betrieb
 - Vermischungsphänomene im Kühlkreislauf bei Wiederauffüllung des Primärkreislaufs
 - Bestimmung der Größe des Naturumlaufs
- UPTF-TRAM
 - Vermischung von Einspeisemassenstrom mit umgebendem Kühlmittel im kalten Strang
 - Vermischung kalter Strahlen (Notkühlwasser) und warmen Wasser (Kondensat) im Ringraum
- ROCOM
 - Vermischung im Reaktordruckbehälter beim Start einer Hauptkühlmittelpumpe bzw. beim Anlauf des Naturumlaufs

Experimentelle Untersuchungen (2)

Versuchsergebnisse

- Die angesammelte Kondensatmenge wird im Wesentlichen durch die Geometrie des Pumpenbogens begrenzt.
- In den Pumpenbögen sammelt sich bis zu 7.5 t Kondensat an.
- Die Borkonzentration am Ringraumeintritt beträgt minimal 350 ppm (bei maximaler Pfropfengröße) und 450 ppm (bei Genehmigungsrandbedingungen) für ein kaltseitiges Leck mit kaltseitiger Sicherheitseinspeisung (PKL).
- Die minimale Borkonzentration am Kerneintritt beträgt 850 ppm (Konservative analytische Randbedingungen) bzw. 1200 ppm (PKL Randbedingungen) für ein heißseitiges Leck mit heißseitiger Sicherheitseinspeisung (ROCOM).

Regulatorische Randbedingungen

- BMI Kriterien: Der Reaktorkern muss so ausgelegt sein, dass prompte Rückkopplungseigenschaften schnelle Reaktivitätsanstiege soweit abfangen, dass keine sicherheitstechnisch bedeutsamen Schäden am Reaktorkern und im Kühlkreislauf auftreten.
- RSK-Leitlinie: Die RSK-Leitlinie erlaubt die Rekritikalität bei Störfällen mit maximaler Abkühlgeschwindigkeit (z.B. Frischdampfleitungsbruch). Für Borverdünnungsstörfälle wird keine Ausnahmeregelung getroffen.
 - Rekritikalität wird bei Borverdünnungsstörfällen nicht zugelassen.

Nachweisführung zur Aufborierung von Kondensat beim kaltseitigen Leck mit kaltseitiger Einspeisung (1)

- Eine Umschaltung der Sicherheitseinspeisung auf die heiße Seite erfolgt nicht.
- Die minimale Borkonzentration des Kondensats beträgt 60 ppm (Borgehalt der Dampfphase).
- Die maximale Kondensatmenge überschreitet nicht 7 t pro Kühlkreislauf und hat eine Borkonzentration von mindestens 350 ppm am Eintritt zum Ringraum (PKL III E 2.2).

Nachweisführung zur Aufborierung von Kondensat beim kaltseitigen Leck mit kaltseitiger Einspeisung (2)

- Zur Vermischung des niedrig borierten Kondensats mit dem umgebenden Kühlmittel im Ringraum werden die Versuchsergebnisse von UPTF-TRAM C1 und C3 herangezogen.
- Die Versuchsergebnisse von PKL und UPTF werden mit dem Programm ATHLET auf den Reaktor übertragen.
 - Die Produktion, die Akkumulation und Transport von Kondensat wird von ATHLET ausreichend genau beschrieben (Nachrechnung PKL).
 - Die Vermischung von Kondensat mit Kühlmittel im Ringraum wird mit ATHLET ausreichend beschrieben (Nachrechnung UPTF).
 - ⇒ Belastbare Aufborierung von Kondensat für die ungünstigsten Strömungsbedingungen im Reaktor auf 800 ppm bis zur Ringraumunterkante

Nachweisführung zur Aufborierung von Kondensat bei kaltseitigem Leck mit kaltseitiger Einspeisung (3)

- Bei Einbeziehung der Vermischung im unteren Plenum ist mit einer Erhöhung der nachweisbaren Borkonzentration zu rechnen.
- Für Reaktoranlagen die eine höhere minimale kritische Borkonzentration aufweisen als 800 ppm, ist eine Einzel-fallprüfung vorzunehmen.

Nachweisführung zur Aufborierung von Kondensat bei heißseitigem Leck und heißseitiger Einspeisung (1)

- Eine Umschaltung der Sicherheitseinspeisung auf die kalte Seite erfolgt nicht.
- Die minimale Borkonzentration des Kondensats beträgt 60 ppm (Borgehalt der Dampfphase).
- Die maximale Kondensatmenge überschreitet nicht 6 t pro Kühlkreislauf und hat eine minimale Borkonzentration von 60 ppm in den Pumpenbögen (PKL E 2.3).
- In den bespeisten Kühlkreisläufen bleibt der Naturumlauf bestehen. Die Borkonzentration in den bespeisten Kühlkreisläufen beträgt mindestens 2000 ppm (PKL E 2.3).
- Die ROCOM Anlage ist für die Untersuchung von Vermischungsvorgängen geeignet (Skalierung entsprechend der Strouhal- und Froude-Zahl). Ein Beitrag zur Unsicherheit bei der Übertragung der Ergebnisse auf den Reaktor liefert die Nichteinhaltung der Reynoldszahl.
- Nach Ansicht der GRS und TÜVe wird die Unsicherheit wegen der Nichteinhaltung der Reynoldszahl durch die Vernachlässigung des erhöhten Dichteeinflusses (1,25 % statt 2 %) abgedeckt.

Nachweisführung zur Aufborierung von Kondensat bei heißseitigem Leck und heißseitiger Einspeisung (2)

- Für die von der GRS prognostizierten Randbedingungen wurde in der ROCOM-Versuchsanlage eine Aufborierung des Kondensats auf 850 ppm bis zum Kerneintritt gemessen.
- Unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten zwischen den Kühlkreisläufen, wie in PKL III E 2.3 gemessen, können die Aufborierung des Kondensats verstärken (siehe ROCOM Versuch mit Randbedingungen aus PKL III E 2.3, Aufborierung auf 1200 ppm).
- Für Reaktoranlagen, die eine höhere minimale kritische Borkonzentration aufweisen, ist eine Einzelfallprüfung vorzunehmen.

Deborierung beim Ausfall Nachwärmeabfuhr im Nichtleistungsbetrieb

- Die Deborierung auf der kalten Seite erfolgt frühestens nach 2 Stunden.
- Eine Bespeisung des Primärkreislaufs in den ersten 2 Stunden führt zu einem frühen Naturumlauf und vermeidet somit die Ansammlung von niedrig boriertem Kondensat.

Zusammenfassung

- Bei kaltseitigen Lecks mit kaltseitiger Sicherheitseinspeisung ist eine minimale Borkonzentration von 800 ppm an der Ringraumunterkante abgesichert.
- Bei heißseitigen Lecks mit heißseitiger Sicherheitseinspeisung ist eine minimale Borkonzentration von 850 ppm am Kerneintritt abgesichert.
- Beim Ausfall der Nachkühlung im abgeschalteten Zustand und Mitte-Loop Betrieb kann durch Druckspeicher oder Niederdruckeinspeisung in den ersten 2 Stunden eine Deborierung verhindert werden
- Noch nicht berücksichtigte Aufborierungsphänomene müssen noch über Versuche quantifiziert werden.
- Unsicherheiten bei der Übertragung von Versuchsdaten auf den Reaktor müssen noch quantifiziert werden (werden derzeit durch nicht berücksichtigte Aufborierungs-Phänomene kompensiert).
- Für Reaktoranlagen, die eine höhere kritische Borkonzentration aufweisen, ist eine Einzelfallprüfung vorzunehmen.

Fachtagung "Aktuelle Themen der Reaktorsicherheitsforschung in Deutschland"
Einführungsvortrag

Forschungsbedarf zum Betrieb laufender Anlagen aus Sicht der RSK

Michael Sailer, Öko-Institut e. V., Darmstadt

Forschungsbedarf zum Betrieb laufender Anlagen aus Sicht der RSK

Michael Sailer, Vortrag auf dem KTG-Fachtag 3.-4. April 2006, FZ Rossendorf

Die RSK befasst sich in „Stellungnahmen“ und „Empfehlungen“ mit aktuellen Fragen der Reaktorsicherheit und der Endlagerung. Aus diesen Stellungnahmen und Empfehlungen ergibt sich oft konkreter Bedarf an Forschung zur Reaktorsicherheit.

Ein Teil betrifft Fragen mit übergreifenden Charakter. Ein Beispiel ist die rechnerische Nachweisführung, bei der vor allem im Bereich der Validierung und der Basis für die erforderlichen Unsicherheitsanalysen Forschungsbedarf gesehen wird. Weitere Beispiele sind das Alterungsmanagement, hier ist das Verständnis für Alterungsprozesse zu verbessern, und der übergreifende Sicherheitsansatz, bei dem eine Weiterentwicklung der Methoden des Sicherheitsmanagements und vor allem die systematische Auswertung der bisherigen Erfahrungen erforderlich ist.

Aus den Beratungen der RSK ergibt sich auch weiterer Forschungsbedarf in Einzelgebieten, z.B. in den Bereichen Festlegung von Prüffristen, Verifikation von Annahmen bei Werkstoffen, softwarebezogenen Fehlermöglichkeiten und der Regelanwendung in der internationalen Praxis.



Forschungsbedarf zum Betrieb laufender Anlagen aus Sicht der RSK

M. Sailer

Herangehensweise der RSK



- Die RSK berät den BMU in Fragen der Reaktorsicherheit und der Entsorgung
- Themen ergeben sich durch Beratungsaufträge des BMU oder durch eigene Initiative der RSK
- Typisches Beratungsergebnis sind „Stellungnahmen“ und „Empfehlungen“, veröffentlicht unter www.rskonline.de
- Beratungsergebnisse befassen sich mit aktuellen Ereignissen und Fragestellungen sowie mit generischen Fragen

Empfehlungen der RSK 2005/2004



- Beherrschung eines Kühlmittelverluststörfalls bei DWR unter Berücksichtigung von Totvolumina im Reaktorsicherheitsbehälter - technisch-naturwissenschaftliche Aspekte, 10.11.2005
- Gestaffeltes Sicherheitskonzept, 08.09.2005
- Anforderungen an die Nachweisführung bei Kühlmittelverluststörfall-Analysen, 21.07.2005
- Beherrschung von Alterungsprozessen in Kernkraftwerken, 22.07.2004

Stellungnahmen der RSK 2005/2004 (1)



- 15./16.12.2005 Beherrschung eines Kühlmittelverluststörfalls bei DWR unter Berücksichtigung von Totvolumina im Reaktorsicherheitsbehälter – Sicherheitsmanagement-Aspekte
- 15./16.12.2005 Derzeitige Vorgehensweise bei zerstörungsfreien Prüfungen, die im Rahmen der wiederkehrenden Prüfungen an ferritisch-austenitischen Mischschweißnähten erfolgen (Stellungnahme zum Schwerpunktthema 1 des Untersuchungsvorhabens SR 2360 des BMU)
- 06.10.2005 Einstufung von "VO-Ereignissen" in die Sicherheitsebenen des gestaffelten Sicherheitskonzepts und Konzept zur Neubestimmung von Vorsorgemaßnahmen (VM)
- 08.09.2005 Festlegung von Versagenspostulaten für Komponenten
- 08.09.2005 Spezifikation der Fa. Areva/Cogema zu hochdruckkompaktierten radioaktiven Abfällen (CSD-C) aus der Wiederaufarbeitung von deutschen LWR-Brennelementen
- 07.07.2005 Stellungnahme der RSK zum Abschalten der Hauptkühlmittelpumpen bei ATWS-Ereignissen in Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktor
- 07.07.2005 Wirbelstrombefunde an Steuerelementen - Meldepflichtige Ereignisse 02/2003 im Kernkraftwerk Brokdorf, 02/2004 im Kernkraftwerk Neckarwestheim, Block 2, und 08/2004 im Kernkraftwerk Emsland
- 02.06.2005 Genehmigungsverfahren zur Stilllegung und zum Rückbau des Kernkraftwerks Stade
- 28.04.2005 Untersuchungsvorhaben SR 2392 des BMU "Einsatz von Thermoelementen zur Erfassung der Temperatur von Rohrleitungswandungen in Kernkraftwerken im Rahmen der Ermüdungsanalyse" und Berücksichtigung des Medieneinflusses bei Ermüdungsanalysen nach dem KTA-Regelwerk

Stellungnahmen der RSK 2005/2004 (2)



- 31.03.2005 Sicherheitstechnische Aspekte konzeptioneller Fragestellungen zur Endlagerung von bestrahlten Brennstäben mittels Kokillen in Bohrlöchern anhand eines Vergleiches mit dem Konzept „Streckenlagerung von dickwandigen Behältern“
- 27.01.2005 Gase im Endlager
- 27.01.2005 Sicherheitsaspekte des Einsatzes hochabgebrannter Brennelemente unter Reaktivitätsstörfall-Bedingungen
- 27.01.2005 Untersuchungsvorhaben SR 2318 des BMU "Bewertung der Aussagefähigkeit von Ultraschall- und Wirbelstromprüfung austenitischer Plattierungen von Reaktordruckbehältern"
- 16.12.2004 Stellungnahme der RSK zur Erweiterung der Urananreicherungsanlage Gronau
- 16.12.2004 Meldepflichtiges Ereignis "Absturz eines Brennelementes beim Beladen des Transportbehälters" im Kernkraftwerk Biblis, Block B, am 06.08.2001
- 22.07.2004 Anforderungen an den Nachweis der Notkühlwirksamkeit bei Kühlmittelverluststörfällen mit Freisetzung von Isoliermaterial und anderen Stoffen
- 27.05.2004 KTA-Regel 2201.1: "Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen; Teil 1: Grundsätze"; Fassung 6/90 - Empfehlungen für die Überarbeitung der Regel
- 04.03.2004 Vorkommnis der INES-Kategorie 3 im amerikanischen Kernkraftwerk Davis Besse vom 6. März 2002, Borsäurekorrosion am Reaktordruckbehälterdeckel und Schlussfolgerungen für deutsche Anlagen

Identifizierung von Forschungsbedarf



- Schon vorliegende Erkenntnisse reichen nicht immer aus, um die Fragestellung im eigentlich notwendigen Umfang bearbeiten zu können
- Zur Erfüllung von Empfehlungen sind implizit weitere Forschungsarbeiten erforderlich
- Stellungnahmen und Empfehlungen halten weitere Forschungsarbeiten für erforderlich
- Direkte Bewertung von Forschungsprogrammen erfolgt nur in Einzelfällen



- Übergang zu Best-Estimate-Rechnungen als Basis der Nachweisführung
- Hinsichtlich Abbrand, Anfangsanreicherung, Leistung, MOX-Einsatz heute andere Betriebsweisen vorgesehen als in der Anfangsphase der Anlagen
- Notwendig: Verifizierung und Validierung der im Nachweis verwendeten Rechenverfahren für alle bestehenden und angestrebten Fahrweisen und Erweiterung der Basis für die Unsicherheitsanalyse

Alterungsmanagement



- RSK hat umfassend die Anforderungen an Alterungsmanagement zusammengestellt
- Bei vielen Prozessen muss das Alterungsverhalten von Materialien und Komponenten hinreichend gut verstanden werden.
- Notwendig: Untersuchungen zum Alterungsverhalten auf Material- und Komponentenebene, Auswertung der allgemeinen Betriebserfahrung in Hinsicht auf Alterungsprozesse

Grundlagen für die Festlegung von Prüffristen



- Ausgangslage: Prüffristen (z.B. bei ZfP, WKP, Dokuprüfungen) werden heute auf sehr unterschiedliche Weise festgelegt (z.B. Berichte aufgrund von KTA-Regelfestlegungen, Herstellervorgaben, Zuverlässigkeitsermittlungen, Festlegungen im Genehmigungsverfahren)
- Notwendig:
 - Aufarbeitung der bisherigen Vorgehensweise und der jeweils zugrundeliegenden „Teil“systematik, insbesondere unter Aspekten der Korrelation zwischen Festlegungsmethode und relevanten Schutzzielen
 - Erarbeitung der Grundlagen für durchgehend systematische Ansätze bei der Festlegung von Prüffristen (→ Vorschläge für Festlegungen im Regelwerk)

Verifikation von Annahmen bei Werkstoffen



- Ausgangspunkt: bei der Beurteilung der Vorsorge hinsichtlich Werkstofffehlern und –versagen Zugrundelegung der „üblichen“ Annahmen
- Durch die Stilllegung kommerzieller Anlagen (KKS, KWO) nach langjährigem Betrieb erstmals Möglichkeiten, Voraussagen und Annahmen hinsichtlich Werkstoffkennwerten, Alterungseffekten und Erkennungsmöglichkeiten durch verschiedene Prüfmethode an realen Werkstoffstücken zu überprüfen
- Erforderlich: rechtzeitige Erstellung von Verifikationsprogrammen, rechtzeitige Klärungen hinsichtlich zu entnehmender Probestücke, Durchführung der Verifikationsprogramme, dann Überprüfung des einschlägigen Regelwerks



- Das Zusammenwirken der Faktoren Mensch, Technik und Organisation ist in den Mittelpunkt der Sicherheitsbetrachtungen zu stellen
- Erforderlich:
 - Weiterentwicklung von Methoden des Sicherheitsmanagements
 - Systematische Auswertung der Erfahrungen mit Sicherheitsmanagement

Systematisierung von softwarebezogenen Fehlermöglichkeiten



- Ausgangssituation: Bei der Regelwerkserstellung zu digitaler Leittechnik fehlt teilweise Basis für systematische Regelungen hinsichtlich Fehlervermeidung bzw. Folgenbegrenzung bei Fehlern
- Erforderlich: Problembezogene Auswertung aller bekannten einschlägigen Ereignisse unter den Fragestellungen
 - Fehlerentstehung, insbesondere unter Aspekten der Verletzungsmöglichkeiten von Sicherheitsprinzipien und Sicherheitsebenen
 - mögliche generelle Strategien zur Vermeidung bzw. zur Folgenbegrenzung
 - Fassung der Strategien als Regeltexte

Durchführung einer probabilistischen Erdbebenanalyse



- Ausgangssituation: Eine systematische probabilistische Einschätzung der Erdbebengefährdung für Nuklearstandorte in Deutschland fehlt
- Die RSK hat mit ihrer Stellungnahme aus der 372. Sitzung zur Überarbeitung der KTA 2201.1 zusätzlich empfohlen, eine probabilistische Erdbebengefährdungsanalyse für einen deutschen Standort durchzuführen. Hierbei sollten die Empfehlungen aus NUREG-6372 und die Erfahrungen aus dem kürzlich in der Schweiz abgeschlossenen Projekt PEGASOS eine zentrale Rolle spielen. Nach Auffassung der RSK sind solche Analysen nach dem Stand von W & T erforderlich

Belastbarkeit von Leckageerkennungssystemen



- Ausgangslage: Im Rahmen von Bewertungen von Lasten aus Strahl- und Reaktionskräften werden unter Anwendung bruchmechanischer Nachweise die wirksamen Leckflächen mit dem Hinweis auf verbesserte Leckageerkennungssysteme verkleinert
- Die Eignung und Qualifizierung solcher Systeme wird sehr unterschiedlich gehandhabt, ohne dass dafür systematische Maßstäbe vorliegen
- Erforderlich: Rahmenbedingungen des Einsatzes und sicherheitstechnische Bedeutung müssen aufgearbeitet werden (unter Berücksichtigung der bisherigen Praxis). Daraus müssen konkrete Anforderungen an Eignungsnachweise erarbeitet werden, aus denen die Grundlage für eine Regel zur Beurteilung von Leckageerkennungssystemen abgeleitet werden kann

Rahmenbedingungen für Brandschutz nach EVA



- Nach KTA 2101.1 Konzept für Rahmenbedingungen und erforderliche Maßnahmen der Sicherstellung des Brandschutzes bzw. der Brandbekämpfung nach Erdbeben und anderen EVA erforderlich
- Beurteilungsmaßstäbe für umfassende und schlüssige Prüfung fehlen aber
- Notwendig: Erarbeitung von technischen, personellen und organisatorischen Mindestanforderungen als Basis für Festlegung einer einheitlichen Vorgehensweise bei der Bewertung von entsprechenden Brandschutzkonzepten

Regelanwendungen in der internationalen Praxis



- Bei der Erstellung von RSK-Empfehlungen stellt sich immer wieder die Frage, wie Anwendung einer konkreten Regel in anderen Ländern in der Praxis erfolgt
→ Wichtig für die Frage „internationaler Stand von W & T“
- Beispiele: Annahmen bei der Sumpfsiebfrage; Geltungsumfang des 2-F-Bruch-Konzeptes, ATWS-Beherrschung
- Theoretischer Vergleich der Regelwerke dafür nicht ausreichend, da oft erst die praktische Anwendung wichtige Randbedingungen sichtbar macht
- Notwendig: Vergleich der praktischen Nachweisführung und deren Randbedingungen in relevanten Ländern bei ausgewählten Fragestellungen

Fachtagung "Aktuelle Themen der Reaktorsicherheitsforschung in Deutschland"
Einführungsvortrag

Forschungsbedarf zum Betrieb laufender Anlagen aus Sicht der RSK

Michael Sailer, Öko-Institut e. V., Darmstadt

Borverdünnungsszenarien und ihre sicherheitstechnische Bedeutung

Winfried Pointner,
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH, Garching

Kenntnisstand zu unterstellten Borverdünnungsszenarien in DWR

Borverdünnung durch Störfälle mit Reflux-Condenser-Betrieb:

Erkenntnisgewinn und sicherheitstechnische Einordnung aus Betreibersicht

Ralf Wohlstein, E.ON Kernkraft GmbH, Hannover

Volker Noack, RWE Power AG, Essen

SITZUNG I

Sitzungsleiter: V. Teschendorff (GRS)

Kenntnisstand zu unterstellten Borverdünnungsszenarien in DWR

PKL-Experimente zur Deborierung durch Reflux-Condenser-Betrieb

Klaus Umminger, Thomas Mull, Framatome ANP GmbH, Erlangen

Kenntnisstand zu unterstellten Borverdünnungsszenarien in DWR

Experimente an der Versuchsanlage ROCOM zur Kühlmittelvermischung bei Wiederaanlauf der Naturzirkulation

Sören Kliem, Tobias Sühnel, Hans-Michael Prasser, Frank-Peter Weiß,
Forschungszentrum Rossendorf e. V., Dresden

Das Barsebäck-Ereignis: Ablauf, Bedeutung und Folgen

Michael Maqua
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH, Köln

**Untersuchungen zu DWR:
Freisetzung des Isoliermaterials,
Transport zum Sumpf, Verhalten im
Sumpf, Siebbelegung und
Langzeiteffekte**

Ulrich Waas, Framatome ANP GmbH, Erlangen

Vorsorge- und Nachrüstmaßnahmen in deutschen Kernkraftwerken: Auswirkungen auf den Anlagen- betrieb und die Störfallbeherrschung

Volker Noack, RWE Power AG, Essen

Hermann Ohlmeyer, Vattenfall Europe Nuclear Energy GmbH, Hamburg

Computational Fluid Dynamics and Computational Multi-Fluid Dynamics for Reactor Safety: Prospects and Examples

George Yadigaroglu

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETH), Schweiz

Der deutsche CFD-Verbund: Ziele und Vorhaben

Martina Scheuerer,
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH, Garching

CFD-Analysen zur Kühlmittelvermischung in DWR

Tobias Höhne, Sören Kliem, Ulrich Rohde, Frank-Peter Weiß,
Forschungszentrum Rossendorf e. V., Dresden

Volker Noack, RWE Power AG, Essen

CFD-Simulation von Mineralwollpartikeln in der Sumpfstromung

Eckhard Krepper, Alexander Grahn,
Forschungszentrum Rossendorf e. V., Dresden

Sören Alt, Wolfgang Kästner, Alexander Kratzsch, Andre Seeliger,
Hochschule Zittau/Görlitz, IPM, Zittau

Entwicklung und Validierung von CFD-Modellen für Zweiphasenströmungen

Thomas Frank, ANSYS Germany GmbH, Otterfing

Dirk Lucas, Hans-Michael Prasser, Eckhard Krepper, Jun-Mei Shi,
Forschungszentrum Rossendorf e. V., Dresden