

Sicherstellung der Kernnotkühlung bei Kühlmittelverluststö- rungen mit Freisetzung von Isoliermaterial

Abschlussbericht

Sicherstellung der Kernnotkühlung bei Kühlmittelverluststörfällen mit Freisetzung von Isoliermaterial

Abschlussbericht

W. Pointner
A. Bröcker

Januar 2012

Auftrags-Nr.: 800027

Anmerkung:

Das diesem Bericht zu Grunde liegende FE-Vorhaben 3610R01331 wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Auftragnehmer.

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

Kurzfassung

Im Projekt 3610R01331 wird die Methodik zur Nachweisführung der gesicherten Notkühlung bei Kühlmittelverluststörfällen mit Freisetzung von Isoliermaterial und anderen Stoffen weiterentwickelt.

Die Auswertung des internationalen Standes von Wissenschaft und Technik ergab keine Erkenntnisse, die Auswirkungen auf die in Deutschland von der RSK empfohlene Nachweisführung zur Beherrschung von Kühlmittelverluststörfällen mit Isoliermaterialfreisetzung haben. Der Schwerpunkt internationaler Untersuchungen lag auf chemischen Effekten und daraus resultierend auf „Downstream“ Effekten. Diese Aktivitäten sollten weiter beobachtet werden, ob sich daraus Erkenntnisse auf deutsche Anlagen ableiten lassen.

Die vertiefte Auswertung der deutschen Versuche zur Freisetzung von Isoliermaterial (Battelle-KAEFER) zeigte, dass das RSK-NRC-Kegelmodell die Freisetzungsmenge integral abdeckend bestimmt, aber nicht die örtliche Verteilung, da Sekundäreffekte, wie das Abschälen von Isoliermaterialkassetten oder das Zerstören von Kassetten durch herumfliegende Teile nicht berücksichtigt werden. Dies kann für Frischdampfleckts beim Siedewasserreaktor von Bedeutung sein, da der Dampfstrahl eine andere Aufweitung als ein Wasserstrahl hat.

Ein Vergleich der Versuchsergebnisse zwischen Ringleitungsversuchen und Wannenversuchen zeigte eine starke Unterschätzung der normierten Druckverluste bei Ringleitungsversuchen. Auch die Druckverluste stromabwärts wie an den Brennelementen werden bei Ringleitungsversuchen stark unterschätzt. Dies ist bei der Übertragung von Ergebnissen aus Ringleitungsversuchen auf die Realanlage zu berücksichtigen.

Die RSK-Stellungnahme zur gesicherten Kernkühlung bei Kühlmittelverluststörfällen mit Freisetzung von Isoliermaterial kann weitgehend vom DWR auf den SWR übertragen werden. Anpassung ist jedoch in Bezug auf die Bewertung der Freisetzungsmengen, der Berücksichtigung der Kondensationskammer, der Strömungsverteilung im Kern und der Anforderungen an die Kernkühlung erforderlich.

Belastbare, experimentelle Ergebnisse für die Nachweisführung beim SWR liegen für den Transport von Isoliermaterial zur Kondensationskammer, den Druckverlusten an

Rückhaltevorrichtungen (Siebkörbe), der Penetration durch die Rückhaltevorrichtungen und der Begrenzung von Druckverlusten an Siebkörben vor. Die gemessenen Druckverluste an Abstandshaltern von SWR Brennelementen sind entsprechen der sich unterschiedlich in Ringleitungsversuchen und Integralversuchen ausbildenden normierten Druckverluste zu bewerten und auf die reale Anlage zu übertragen. Der Einfluss von Korrosionsprodukten wurde bei SWR Randbedingungen nur belastbar für Ablagerungen an Abstandshalter gemessen. Der Korrosionseinfluss wurde erst eine Woche nach Versuchsbeginn sichtbar und führte in der folgenden Woche maximal zu einer Druckverlusterhöhung um den Faktor in der Größenordnung von 20.

Es liegen zum Transport von Isoliermaterial in den Wasservorlagen des Steuerstabantriebsraums und der Kondensationskammer keine experimentellen Ergebnisse vor. Die Analyseergebnisse mit dem Rechenprogramm TISA bilden die Strömungsverhältnisse in den Wasservorlagen unzureichend nach (zu grobes Netzwerk, unvollständige Nachbildung aller Einströmungen und deren Impulse) und enthalten kein validiertes Sedimentations- und Resuspensionsmodell. Das Programm TISA ist unzureichend für den Fasertransport validiert.

Analytische Untersuchungen mit dem Analysesimulator des KKW Philippsburg 1 zeigten, dass die Kernkühlung bei einer konservativen Belegung der Abstandshalter von $2,1 \text{ kg/m}^2$ und einer Druckerhöhung durch Korrosion um den Faktor 9 immer gewährleistet bleibt. Eine weitere Erhöhung der Belegung auf 21 kg/m^2 bis 31 kg/m^2 zeigt, dass auch unter diesen Voraussetzungen die Kernkühlung nicht unzulässig beeinträchtigt wird. Diese große Reserve wird jedoch teilweise zur Kompensation der in den Analysen nicht berücksichtigten Anpassung der normierten Druckverluste an Ergebnissen von Integralanlagen und der Unterschätzung des Korrosionseinflusses aufgebraucht.

Aus den Ergebnissen des gesamten Projekts haben sich Empfehlungen für die Nachweisführung beim SWR zu folgenden Arbeitsschritten ableiten lassen:

- Freisetzung von Isoliermaterial
- Transport im Sicherheitsbehälter
- Transport in der Wasservorlage des Steuerstabantriebsraums und Kondensationskammer
- Druckverluste und Penetration an Rückhaltevorrichtungen

- Druckverlust im Kern
- Langzeitverhalten
- Sauberkeit im Sicherheitsbehälter und
- anlageninterne Notfallmaßnahmen.

Die Ergebnisse des Projekts haben dazu beigetragen, dass mit Berücksichtigung der Empfehlungen der GRS, das Nachweisverfahren zur gesicherten Kernkühlung beim SWR im Wesentlichen als abgesichert betrachtet werden kann. Der Nachweis zum Transport von Isoliermaterial in der Wasservorlage des Steuerstabantriebsraums und der Kondensationskammer ist experimentell nicht abgesichert. Die analytischen Nachweise hierfür sind nicht ausreichend belastbar.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|----------|
| 1 | Zielsetzung | 1 |
| 2 | Arbeitsprogramm | 2 |
| 2.1 | Aufbereitung des relevanten Standes von W+T für DWR (AP 1)..... | 2 |
| 2.2 | Verfolgung und Bewertung des nationalen und internationalen Standes von W+T (AP 2)..... | 2 |
| 2.3 | Aktualisierung von Empfehlungen für die Nachweisführung bei DWRs..... | 3 |
| 2.4 | Übertragbarkeit der Ergebnisse von DWR auf SWR (AP 4) | 3 |
| 2.5 | Bewertung generischer Untersuchungen zur gesicherten Kernkühlung beim SWR (AP 5)..... | 3 |
| 2.6 | Bestimmung der Grenzbelegung der Abstandshalter für eine gesicherte Kernkühlung bei SWR Anlagen (AP 6) | 4 |
| 2.7 | Entwicklung von Empfehlungen für die Nachweisführung bei SWR- Anlagen (AP 7)..... | 4 |
| 3 | Arbeitsergebnisse..... | 6 |
| 3.1 | Aufbereitung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik (AP 1) | 6 |
| 3.2 | Verfolgung und Bewertung des nationalen und internationalen Standes von Wissenschaft und Technik (AP 2) | 9 |
| 3.2.1 | Deutschland | 9 |
| 3.2.2 | USA..... | 11 |
| 3.2.3 | Kanada..... | 13 |
| 3.2.4 | Frankreich | 13 |
| 3.2.5 | Bewertung der internationalen Entwicklungen | 16 |
| 3.3 | Aktualisierung von Empfehlungen für die Nachweisführung bei DWRs (AP 3) | 17 |
| 3.3.1 | Isoliermaterial Freisetzung | 17 |
| 3.3.2 | Einfluss des Typs einer Versuchsanlage auf den Druckverlust über Ablagerungen..... | 18 |

| | | |
|---------------------------|--|-----------|
| 3.4 | Übertragbarkeit der Ergebnisse von DWR auf SWR (AP 4) | 20 |
| 3.4.1 | RSK-Stellungnahmen..... | 20 |
| 3.4.2 | Einfluss des Typs der Versuchsanlage auf Druckverluste an Sieben und Abstandshalter | 23 |
| 3.5 | Bewertung generischer Untersuchungen zur gesicherten Kernkühlung beim SWR (AP 5)..... | 25 |
| 3.5.1 | Transport im Sicherheitsbehälter | 25 |
| 3.5.2 | Transport von Isoliermaterial in der Kondensationskammer und im Steuerstabantriebsraum..... | 26 |
| 3.5.3 | Druckverluste an Siebkörben | 28 |
| 3.5.4 | Begrenzung der Druckverluste über Rückhaltevorrichtungen..... | 29 |
| 3.5.5 | Penetration durch Rückhaltevorrichtungen | 29 |
| 3.5.6 | Druckverluste an Abstandshalter im Kern..... | 30 |
| 3.5.7 | Einfluss von Korrosionsprodukten auf die Druckverluste über Ablagerungen beim SWR..... | 32 |
| 3.5.8 | Freisetzung von Isoliermaterial | 33 |
| 3.6 | Bestimmung der Grenzbelegung der Abstandshalter für eine gesicherte Kernkühlung beim SWR (AP 6) | 33 |
| 3.7 | Entwicklung von Empfehlungen für die Nachweisführung bei SWR- Anlagen (AP 7)..... | 37 |
| 4 | Zusammenfassung | 44 |
| Literatur | | 47 |
| Technische Notizen | | 49 |

Anlagen

| | |
|----------|--|
| Anlage 1 | Freisetzungsversuche von Battelle-KAEFER |
| Anlage 2 | Übertragbarkeit der RSK-Anforderungen an die Nachweisführung von DWR auf SWR |
| Anlage 3 | ATHLET-Rechnungen zur Nachwärmeabfuhr bei Belegung der BE-Abstandshalter mit Isoliermaterial |

1 Zielsetzung

Hauptziel des Vorhabens ist es, die Methodik zur Nachweisführung der gesicherten Kernnotkühlung bei Kühlmittelverluststörfällen mit Freisetzung von Isoliermaterial und anderen Stoffen für Siedewasserreaktoren weiter zu entwickeln.

Die Nachweisführung soll entsprechend den RSK-Empfehlungen [/RSK04/](#) und [/RSK08/](#) auch für den SWR auf Postulaten, auf Versuchen und auf Analysen aufbauen. Allerdings decken die RSK-Empfehlungen nicht alle SWR-spezifischen Phänomene ab.

Die Weiterentwicklung des nationalen und internationalen Standes von Wissenschaft und Technik wird beobachtet und bewertet. Daraus gewonnene Erkenntnisse werden bei den Methoden der Nachweisführung insbesondere bei SWR berücksichtigt.

Die generische Bewertung neuerer Versuchsergebnisse zu SWR-spezifischen Fragestellungen und zur Übertragbarkeit der Untersuchungsergebnisse von DWR auf SWR-Anlagen ist eine Aufgabe im Rahmen des Vorhabens. Es werden Empfehlungen für die Nachweisführung zur Störfallbeherrschung und zur gesicherten Kernkühlung insbesondere für den SWR, abgeleitet.

Die Methodik der Nachweisführung wird durch folgende analytische Tätigkeiten weiter abgesichert: Für den SWR wird mit ATHLET die Grenzbelegung der Abstandshalter mit Isoliermaterial bestimmt, bei der es noch nicht zur Freilegung der Brennelemente kommt. Die Berechnung erfolgt mit bzw. ohne Annahme einer Verstopfung der Bohrungen an den Brennelementfüßen mit Isoliermaterial.

2 Arbeitsprogramm

Das Arbeitsprogramm dieses Vorhabens gliedert sich in folgende Arbeitsschwerpunkte:

- Aufbereitung des relevanten Standes von W+T für DWR
- Verfolgung und Bewertung des nationalen und internationalen Standes von W+T
- Aktualisierung von Empfehlungen für die Nachweisführung bei DWRs
- Übertragbarkeit der Ergebnisse von DWR auf SWR
- Bewertung generischer Untersuchungen zur gesicherten Kernkühlung beim SWR
- Bestimmung der Grenzbelegung der Abstandshalter für eine gesicherte Kernkühlung bei SWR-Anlagen
- Entwicklung von Empfehlungen für die Nachweisführung bei SWR-Anlagen

2.1 Aufbereitung des relevanten Standes von W+T für DWR (AP 1)

Die GRS hat den in den Vorläuferprojekten SR 2444, SR 2554 und 3608R01326 erfassten Stand von W+T für DWR-Anlagen zusammengefasst und in geschlossener Form dargestellt.

2.2 Verfolgung und Bewertung des nationalen und internationalen Standes von W+T (AP 2)

Die GRS hat die vom BMWi geförderten Projekte 1501360 und 1501363 „Isolationsmaterialbelastete Kühlmittelströmung im Kern“ ausgewertet, in denen experimentelle und analytische Grundlagenuntersuchungen mit CFX zu Transport und Ablagerung von Isoliermaterial durchgeführt wurden. Die GRS nahm an den Fachkolloquien zur Vorstellung der Forschungsergebnisse teil. Der Arbeitsbericht und Kolloquiumsvorträge wurden ausgewertet. Es wurde geprüft, ob die Forschungsergebnisse auf das von der RSK empfohlene Nachweisverfahren einen Einfluss haben.

Es wurden internationale Versuchsdaten ausgewertet. Insbesondere in den USA, Japan und Frankreich gibt es Forschungsaktivitäten zu chemischen Effekten, die hinsichtlich ihrer Relevanz für deutsche DWR- und SWR-Anlagen beurteilt wurden.

Die unterschiedlichen regulatorischen Anforderungen der einzelnen Länder wurden beobachtet. Die Übertragbarkeit der Maßnahmen auf deutsche Anlagen wurde bewertet.

Die GRS hat an 3 Sitzungen der OECD/CSNI Arbeitsgruppe „Sump Screen Clogging“ teilgenommen. Ziel der Arbeitsgruppe ist eine Überarbeitung des Statusberichts, der einen Überblick über die internationalen Entwicklungen gibt. Durch die Aktivitäten innerhalb der Arbeitsgruppe soll die Zusammenarbeit der Sachverständigen gefördert werden.

2.3 Aktualisierung von Empfehlungen für die Nachweisführung bei DWRs

Die Anforderungen an die Nachweisführung zur gesicherten Kernkühlung im DWR bei Kühlmittelverluststörfällen mit Freisetzung von Isoliermaterial wurden entsprechend neuerer Erkenntnisse nach Stand von W+T überprüft und bewertet.

Es wurde geprüft, inwiefern sich aus den Forschungsaktivitäten der BMWi Projekte 15011360 und 15011363 des Forschungszentrum Dresden-Rossendorf und der Hochschule Zittau/Görlitz Notwendigkeiten zur Anpassung der Anforderungen an die Störfallbeherrschung bei DWRs ergeben. Der Schwerpunkt lag bei der Untersuchung von Korrosionseffekten.

2.4 Übertragbarkeit der Ergebnisse von DWR auf SWR (AP 4)

Ausgehend von den experimentellen Ergebnissen und den Nachweisen zur Störfallbeherrschung für DWR-Anlagen wurde geprüft, inwiefern die dort gewonnenen Erkenntnisse auch für SWR-Anlagen von Bedeutung sind. Grundlage hierfür war die RSK-Empfehlung [/RSK04/](#), welche eine Übertragung anwendbarer Anforderungen an die Nachweisführung empfiehlt.

2.5 Bewertung generischer Untersuchungen zur gesicherten Kernkühlung beim SWR (AP 5)

Die GRS hat die von den Betreibern bereitgestellten Berichte zu den SWR-spezifischen Versuche und Analysen ausgewertet. Die Eignung dieser Versuche und Analysen für

die Nachweisführung einer gesicherten Kernkühlung bei Kühlmittelverluststörfällen mit Freisetzung von Isoliermaterial wurde bewertet.

2.6 Bestimmung der Grenzbelegung der Abstandshalter für eine gesicherte Kernkühlung bei SWR Anlagen (AP 6)

Beim Kühlmittelverluststörfall freigesetztes Isoliermaterial, das nicht in der Kondensationskammer bzw. im Steuerstabantriebsraum sedimentiert oder an den Rückhaltevorrichtungen (Siebkörbe) zurückgehalten wird, gelangt über die Notkühlsysteme in den Reaktordruckbehälter. Brennelementversuche haben gezeigt, dass sich dieses Isoliermaterial an Abstandshaltern der SWR-Brennelemente ablagert.

Die Belegung der unteren Abstandshalter ist ein entscheidendes Kriterium für die Kühlbarkeit des Kerns. Die Grenzbelegung der unteren Abstandshalter wurde für folgende Szenarien bestimmt:

- Das in den RDB eingetragene Isoliermaterial lagert sich nur am unteren Abstandshalter ab, die Bohrungen an den Brennelementfüßen bleiben offen. Entsprechend der Druckverhältnisse stellt sich eine Bypassströmung ein. Eine Belegung der oberen Abstandshalter durch Einstromen aus dem oberen Plenum wird nicht unterstellt.
- Zusätzlich zu den zuvor genannten Bedingungen erfolgt eine Verstopfung der Bohrungen an den Brennelementfüßen.

Die Grenzbelegung der Abstandshalter wird erreicht, wenn die Freilegung im oberen Bereich der Brennelemente gerade beginnt. Bei der Berechnung der Grenzbelegung wurden belegungspezifische Druckverluste verwendet, die eine Erhöhung der spezifischen Druckverluste durch Einlagerung anderer Stoffe (Staub, Korrosionsprodukte etc.) berücksichtigt.

2.7 Entwicklung von Empfehlungen für die Nachweisführung bei SWR-Anlagen (AP 7)

Die Nachweisführung zur gesicherten Kernkühlung im SWR bei Kühlmittelverluststörfällen mit Freisetzung von Isoliermaterial beruht wie beim DWR auf Postulaten, Versuchen und Analysen.

Aus den Erkenntnissen der zuvor beschriebenen Arbeitspunkte zu den SWR-Anlagen wurden Empfehlungen für die Nachweisführung zur Störfallbeherrschung abgeleitet.

Grundlage der Nachweisführung sind die RSK-Empfehlungen für den DWR [/RSK04/](#). Neue Empfehlungen wurden für den SWR in die Struktur der RSK-Empfehlungen eingebaut.

Insbesondere wurde geprüft, wie bei der Nachweisführung SWR-spezifische Phänomene berücksichtigt werden können. Hierzu zählten:

- Eintrag von Isoliermaterial in die Kondensationskammer
- Sedimentation von Isoliermaterial in der Kondensationskammer und im Steuerstabantriebsraum (SAR) bei den SWR-typischen Betriebsweisen (Druckabbau in der Kondensationskammer beim Blow-down und Kernnotkühlen mit konstantem Bruchmassenstrom, Rückführung aus SAR, Kondensationskammerkühlen und Notkühlbetrieb)
- Kühlung der Brennelemente bei Belegung der Abstandshalter und eingeschränkter Bypassströmung

3 Arbeitsergebnisse

3.1 Aufbereitung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik (AP 1)

Die Verstopfung der Ansaugsiebe der Not- und Nachkühlsysteme im KKW Barsebäck (1992) und einige Ereignisse in amerikanischen Siedewasserreaktoren Anfang der 90er Jahre haben aufgezeigt, dass die Rückhaltevorrichtungen für Isoliermaterial im Sumpf bzw. in der Kondensationskammer (SWR) nicht in allen Kernkraftwerksanlagen ausreichend ausgelegt sind. In den deutschen SWR-Anlagen wurden deshalb Anfang der 90er Jahre Veränderungen an den Rückhaltevorrichtungen vorgenommen. Für DWR-Anlagen wurde zunächst kein Handlungsbedarf gesehen.

Neuere internationale Untersuchungen haben gezeigt, dass z. B. bei KKW mit Sprühen im Sicherheitsbehälter bis zu 100% des freigesetzten Isoliermaterials in den Sumpf gelangen können. Außerdem kann entsprechend der Karlstein-Versuche das Isoliermaterial bei der Freisetzung fein fragmentiert werden. Wenn ein großer Anteil dieses fein fragmentierten Isoliermaterials zu den Sumpfsieben gelangt, dann kann entsprechend der GKSS-/Erlanger-Wanne-Transportversuche, auch ein großer Teil dieses Materials durch die Siebe hindurch zum Kern transportiert werden.

Die Anforderungen an die Nachweisverfahren zur Sicherstellung der Kernkühlung bei Kühlmittelverluststörfällen unter Berücksichtigung des Eintrags von Isoliermaterial und anderen Stoffen in den Sicherheitsbehälter wurden im Reg. Guide 1.82 der US-NRC [/NRC03/](#) und RSK-Stellungnahmen der 320. Sitzung [/RSK98/](#), der 374. Sitzung [/RSK04/](#) und der 406. Sitzung [/RSK08/](#) festgeschrieben.

Aus den RSK Stellungnahmen ergibt sich, dass mobilisierte Stoffe, bzw. während des Störfalls entstehende Stoffe (durch Erosion, Korrosion, chemische Reaktionen) die Druckverluste über die Sumpfsiebe und im Kern nicht signifikant erhöhen, die Rückhaltevorrichtungen und sonstigen Sicherheitseinrichtungen für Kernkühlung und Aktivitätsrückhaltung nicht unzulässig beeinträchtigen und die Borkonzentration im Kühlmittel nicht unzulässig verringern dürfen. Das freigesetzte Isoliermaterial und andere Stoffe sollen am Sumpfsieb weitgehend zurückgehalten werden. Die Nachweisführung muss den gesamten Zeitraum des Nachkühlbetriebs umfassen.

Beschreibungen des Standes von W+T sind in Abschlussberichten zu den Projekten SR 2444, SR 2554 und 3608R01326 enthalten.

International wurden unter anderem folgende entscheidenden Erkenntnisse gewonnen:

- Sehr fein fragmentiertes Isoliermaterial, insbesondere kombiniert mit der Einlagerung von feinen Partikeln („thin bed“-Effekt), kann zu sehr hohen Druckverlusten an den Sumpfsieben führen.
- Chemische Reaktionsprodukte (Ausfällprodukte) können erheblich zur Erhöhung der Druckverluste über die Sumpfsiebe beitragen.

Experimentelle Untersuchungen zu DWRs wurden an der Erlanger Wanne (AREVA) und dem GKSS-Versuchsstand durchgeführt. Deren Bewertung erfolgt innerhalb der Projekte SR 2554 und 3608R01326.

Die Auswertung von Versuchen der Erlanger-Wanne ergab, dass Korrosionsprodukte die Druckverluste über die Ablagerungen von Isoliermaterial so stark erhöhen können, dass aktive Maßnahmen zur Begrenzung der Druckverluste über Sumpfsiebe erforderlich werden. Bei unvollständiger Belegung der Sumpfsiebe gelangen erhebliche Mengen an Isoliermaterial und anderer Materialien in den Kern und können die Kernkühlung beeinträchtigen. Daraus ergibt sich die Forderung, dass der Kern nahezu frei von Isoliermaterial und anderen Stoffen bleiben muss.

Die im Rahmen der Vorhaben durchgeführten Analysen mit ATHLET zur Kernkühlung zeigten, dass für entsprechend geringe Ablagerungen im Kern die Kernkühlung gesichert ist. Solche geringen Ablagerungsmengen im Kern wurden experimentell für Sumpfsiebe mit 2 x 2 mm Maschenweite gemessen. Zusätzlich weisen die Analysen darauf hin, dass Dampfbildung im Kern ohne Kernfreilegung ein Ablösen von Ablagerungen an den oberen Abstandshaltern bewirkt und somit eine ausreichende Kernkühlung durch Zuströmen von Kühlmittel aus dem oberen Plenum in den Kern sichergestellt ist.

Aus den Versuchsergebnissen der Erlanger Wanne und der GKSS-Versuchsanlage konnten Abhängigkeiten von Prozessparametern abgeleitet werden, die die Streubreite der Messergebnisse für die Transportraten und Druckverluste auch unter Berücksichtigung von Skalierungseffekten deutlich verringern. Bei Berücksichtigung dieser Abhängigkeiten wurde aufgezeigt, dass für die Nachweisführung nach W+T (RSK-

Empfehlung) für deutsche DWR das Rückspülen der Sumpfsiebe erforderlich ist. Auch bei weniger konservativen Annahmen (z. B. geringere Freisetzung bzw. geringere Transportraten im Sicherheitsbehälter) kann demzufolge die Notwendigkeit des Rückspülens der Sumpfsiebe nicht ausgeschlossen werden. Diese Auswertung bestätigt die Empfehlung der RSK von 2008, der zufolge das Rückspülen der Sumpfsiebe im Rahmen der Störfallbeherrschung vorzusehen ist.

Die Analysen mit ATHLET/COCOSYS zeigten, dass auch bei konservativ berechneten Randbedingungen für Druck und Temperatur im Sumpf nicht mit Kavitation der Nachkühlpumpen zu rechnen ist, solange die Druckverluste über die Sumpfsiebe die Auslegungsgrenzen nicht überschreiten.

Die Analysen mit dem CFD Programmen CFX weisen darauf hin, dass die Strömungsbedingungen im realen Sumpf zu größeren Transportraten führen können, als diese in der Erlanger Wanne gemessen wurden. Die Analysen mit dem CFD-Programm ANSYS CFX zum Transport und zur Sedimentation von Isoliermaterial im Sumpf zeigen allerdings trotz der Entwicklung eines Modells zur turbulenten Dispersion noch erhebliche Modellierungsdefizite. Das Programm kann noch nicht zur Nachweisführung eingesetzt werden und Versuche nicht ersetzen.

Die Analysen mit Adina haben gezeigt, dass die Bewegung der Rohrleitung beim Abriss zur Bestimmung der Freisetzungsmenge von Isoliermaterial zu berücksichtigen ist.

Einige Vorgänge lassen sich physikalisch und somit analytisch nicht ausreichend beschreiben, wie z. B. Transportvorgänge im Sicherheitsbehälter. Bei anderen Vorgängen ist eine experimentelle Absicherung nicht möglich. In diesen Fällen werden Anforderungen an die Nachweisführung postuliert.

Die Auswertung der Zittauer-Wannen-Versuche unter SWR-Randbedingungen ergab, dass die belegungsspezifischen Druckverluste über Isoliermaterialablagerungen an den Lochblechen deutlich größer waren als bei den älteren KKB-Versuchen, die bisher zur Nachweisführung beim SWR herangezogen wurden.

Ausgehend von den Ergebnissen der Länderumfragen entspricht die Nachweisführung der Betreiber zum SWR weitgehend den Anforderungen aus der RSK-Stellungnahme von 2004 /[RSK04](#)/. Nach Ansicht der GRS sind für SWR allerdings noch folgende Punkte zu klären:

- Begrenzung des Isoliermaterialeintrags in die Kondensationskammer auf 10 %
- Übertragbarkeit der DWR Versuchsergebnisse zu Sedimentation und spezifischen Δp Kerneintrag bei teilbelegten Sumpfsieben
- Kernkühlung bei eingeschränkter Bypassströmung
- Einfluss der Erosionskorrosion auf Δp von Ablagerungen
- Wirksamkeit der Maßnahmen zur Δp Begrenzung.

3.2 Verfolgung und Bewertung des nationalen und internationalen Standes von Wissenschaft und Technik (AP 2)

Ausgewertet wurden neben dem BMWi Forschungsvorhaben vor allem Beiträge aus der OECD/NEA Task Group on Sump Clogging. Diese Beiträge sind sehr aktuell, da die Arbeitsgruppe seit Herbst 2010 aktiv ist und derzeit den State-of-the-Art-Report "Knowledge Base for Emergency Core Cooling System Recirculation Reliability" [/OECD95/](#) aktualisiert.

International ist die Nachweisführung zur Beherrschung von Kühlmittelverluststörfällen mit Freisetzung von Isoliermaterial noch nicht abgeschlossen.

3.2.1 Deutschland

Der Stand von W+T wurde in Deutschland im Rahmen der BMWi Forschungsvorhaben 15011360 und 15011363 am Forschungszentrum Dresden-Rossendorf und der Hochschule Zittau/Görlitz weiter entwickelt. Die durchgeführten Arbeiten waren weitgehend Grundlagenuntersuchungen, die auf DWR und SWR anwendbar sind.

Die Arbeiten zur CFD-Modellierung des Transports von Isoliermaterialien im Sumpf durch das IPM Zittau-Görlitz und das Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf wurden weitgehend abgeschlossen.

Die Ergebnisse wurden in Beiträgen in der Kerntechnik 76/1 dargestellt. Im Beitrag von Krepper et al. werden Ergebnisse zur CFD-Analyse des Transport und der Sedimentation von Isoliermaterialfasern bei einem in eine Wanne strömenden Wasserstrahl beschrieben [/KT05/](#). Bei diesen Rechnungen wurde eine sehr gute Übereinstimmung mit

dem experimentell ermittelten Sedimentationsverhalten erreicht. Insbesondere konnte die Ausbildung der Wirbel in der Wanne rechnerisch nachgebildet werden.

In [/KT06/](#) werden die Ergebnisse zu CFD-Rechnungen für den Transport und die Ablagerung von Isoliermaterial bei DWRs beschrieben. Damit wurden Durchbruchkanäle ermittelt, die „*experimentell unter ähnlichen Randbedingungen an der Versuchsanlage UPTF beobachtet wurden*“ [/KT06/](#). Dabei wurde gezeigt, dass im Bereich der Durchbruchkanäle zunächst eine bevorzugte Ablagerung des Isoliermaterials erfolgt.

Die Untersuchungen zu den Korrosionseffekten und den daraus resultierenden Druckverlusten wurden im Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf fortgesetzt. Eine geschlossene Theorie zu den Wirkungsmechanismen, den daraus resultierenden Korrosionsprodukten und deren Einfluss auf die Druckverluste an Sieben und Abstandshaltern existiert bisher jedoch noch nicht. In [/KT07/](#) wird für die Korrosion unter DWR-Bedingungen ausgeführt: *„Zunächst erfolgt eine Auflösung der Zinkschicht in der Bor-säure-Lösung. Die dabei entstehenden Zn^{2+} -Ionen können, bei Überschreiten der Sättigungskonzentration, zur Kristallisation von Zinkborat führen. Während der zweiten Stufe erfolgt die Auflösung des Basismaterials, welches in weiterer Folge zu unlöslichen Korrosionspartikeln (Rost) reagiert. Diese lagern sich an den mit Isoliermaterial-Fasern belegten Sumpfsieben ab und führen so zu einem weiteren Differenzdruckaufbau. Haupteinflussfaktoren des Gesamtprozesses sind die Aufprallkraft des Leckstrahls auf die Materialoberfläche, die Wasserchemie sowie das Verhältnis der Korrosions-Oberfläche zum Kühlmittel-Volumen.“*

Der Einfluss von Korrosionsprodukten auf den Druckverlust an BE-Abstandshaltern wurde experimentell untersucht. Dazu wurde Isoliermaterial aus dem Sekundärbehälter der Zittauer Fragmentierungsanlage an den BE-Abstandshaltern angelagert. Zur Modellierung der Korrosionseffekte wurden verzinkte Trittgitterroste in den Wasserstrahl eingebracht. Die Wassertemperatur betrug langfristig 35 °C. Der Druckverlust über den BE-Dummy stieg von ca. 10 mbar auf 110 mbar. Auch in einem Vorgängerexperiment vom März 2010 wurde eine Erhöhung des Druckverlustes über den BE-Dummy nachgewiesen. Bei diesem Versuch stieg der Druckverlust sofort mit dem Einbringen der Trittgitter (vollständig mit Wasser bedeckt und im Wasserstrahl) an. Allerdings ist ein Vergleich der Ergebnisse schwierig, da die Zinkkonzentrationen im Wasser zu Versuchsbeginn erheblich unterschiedlich waren.

Die Bewertung der SWR-spezifischen Versuche und Analysen wird im Kap. 3.5 „Bewertung generischer Untersuchungen zur gesicherten Kernkühlung beim SWR (AP 5)“ beschrieben.

3.2.2 USA

In den USA wird davon ausgegangen, dass der „Generic Safety Issue“ GSI-191 mit verschiedenen Optionen abgeschlossen werden kann. Neben der geschlossenen Nachweisführung werden ein risiko-informierter Lösungsansatz und die Anwendung des Leak-before-break (LBB)-Konzepts nach wie vor diskutiert. Eine ausführliche Darstellung dieser 3 Lösungsansätze befindet sich in SECY-10-0113 „CLOSURE OPTIONS FOR GENERIC SAFETY ISSUE – 191, ASSESSMENT OF DEBRIS ACCUMULATION ON PRESSURIZED WATER REACTOR SUMP PERFORMANCE“ /[SCY0113](#)/. Die Nutzung des LBB-Konzepts in der Nachweisführung wird wegen der möglichen Inanspruchnahme auch bei anderen Themen als problematisch angesehen. Außerdem wird die Inanspruchnahme des LBB-Konzepts als Aufweichung der Defence-in-depth-Prinzipien betrachtet. Entsprechend der NRC bedeutet das LBB-Konzept (leak-before-break) eine Erweiterung des GDC4 (general design criterion) und deshalb ist zur Anwendung des LBB-Konzepts eine Grundsatzentscheidung bei den Auslegungsanforderungen notwendig. Eine Mischung aus einer geschlossenen und risiko-informierten Nachweisführung erscheint möglich.

Empfohlen wird der zügige Nachweis für kleine Lecks mit einer höheren Eintrittswahrscheinlichkeit und entsprechend größerem Zeitraum für den Nachweis für größere Lecks.

Aktuell laufen Forschungsprojekte für die Untersuchung von chemischen Effekten und Effekten hinter den Sumpfsieben (Downstream-Effekte).

Die Reduzierung der Freisetzungszone um eine Leckstelle wird zwischen Betreibern, PWROG und NRC noch intensiv diskutiert. Von 15 Betreibern wurde in der Nachweisführung Kredit genommen von der teilweisen Sedimentation des freigesetzten Isoliermaterials. Dieses Vorgehen wird bisher durch die NRC nicht akzeptiert, da die Übertragbarkeit von den Versuchsanlagen auf die Realanlagen noch nicht nachgewiesen wurde /[NRC10](#)/.

Nach wie vor diskutiert wird der Austausch von Isoliermaterial zur Reduzierung der möglichen Freisetzungsmengen. Dabei wird durch die NRC das ALARA-Prinzip angewendet, auch wenn es hierfür keine einzelne Vorschrift gibt. Die Betreiber gehen davon aus, dass durch Umisolierungsarbeiten eine sehr hohe Kollektiv-Dosis zu erwarten ist. Für die notwendigen Arbeiten an DWR-Anlagen werden 100 – 600 Personen-rem (1 – 6 Sv) abgeschätzt /[SCY0113](#)/. In Deutschland beträgt die maximal erlaubte Jahresdosis für beruflich strahlenexponierte Personen 20 mSv. Damit würden also für die entsprechenden Arbeiten pro DWR mehr als 100 Personen benötigt werden. Die NRC hat Untersuchungen zur Kollektiv-Dosis bei Umisolierungsmaßnahmen durchgeführt. Dabei wurde eine durchschnittliche Kollektiv-Dosis von 18,7 Personen-rem (0,187 Personen-Sv) ermittelt. Die von der NRC abgeschätzten Werte sind also deutlich niedriger als die von den Betreibern angegebenen Kollektiv-Dosen. In den USA wird an die Kollektiv-Dosis ein entsprechender finanzieller Aufwand gekoppelt. Die NRC geht davon aus, dass die aus der Kollektiv-Dosis ermittelten Kosten 88.000 \$ betragen. Im Einzelfall können die notwendigen Kosten aber auch höher sein. Die möglichen Kollektiv-Dosen und entsprechenden Kosten werden von der NRC aber nicht als limitierend für eine Umisolierung angesehen.

18 DWR-Anlagen verwenden entsprechend /[SCY0113](#)/ weiterhin asbesthaltige Isoliermaterialien innerhalb der Freisetzungszonen. In den meisten Fällen ist das entsprechende Material asbesthaltige Cal-Sil-Isolierung. Allerdings soll die Erfüllung des GSI-191 für 11 dieser 18 Anlagen gegeben sein. Die Umisolierung wird wahrscheinlich nicht wegen der möglichen Ausfällungsprodukte von Cal-Sil, sondern wegen der Gesundheitsgefährdung durch Asbestfasern diskutiert.

Die Anwendung der Berechnungsformel für den Druckverlust (NUREG/CR-6224 Head-loss Correlation) wurde von der NRC eingeschränkt. Die Formel darf nur noch für Auslegungsbetrachtungen oder zur Festlegung des Untersuchungsumfanges herangezogen werden. Voraussetzung für die Anwendung der Formel ist ein strukturell gleichmäßig aufgebauter und gleichmäßig über den Filter verteilter Filterkuchen. Die Formel wird hinsichtlich des Einflusses der Wassertemperatur und der Einlagerung weiterer Stoffe (Cal-Sil, Farbpartikel, Ausfällungsprodukte, latente Verschmutzungen) als nicht abdeckend angesehen. Außerdem geht die NRC davon aus, dass Einflüsse der Fragmentierung und Beimischungen zum Wasser in den Testanlagen nicht hinreichend berücksichtigt werden. Außerdem wurde die Formel ursprünglich für ebene Siebe entwickelt und nicht für eine komplexe Siebgeometrie. Es soll eine neue Formel zur Berechnung der Druckverluste in NUREG-1862 eingeführt werden.

3.2.3 Kanada

Ein Arbeitsschwerpunkt liegt im Moment bei chemischen Effekten. Dabei werden folgende Aspekte untersucht:

- Quellen für den Eintrag chemischer Substanzen
- Reaktionsmechanismen
- Wechselwirkung der Ausfällungsprodukte mit dem Filterkuchen

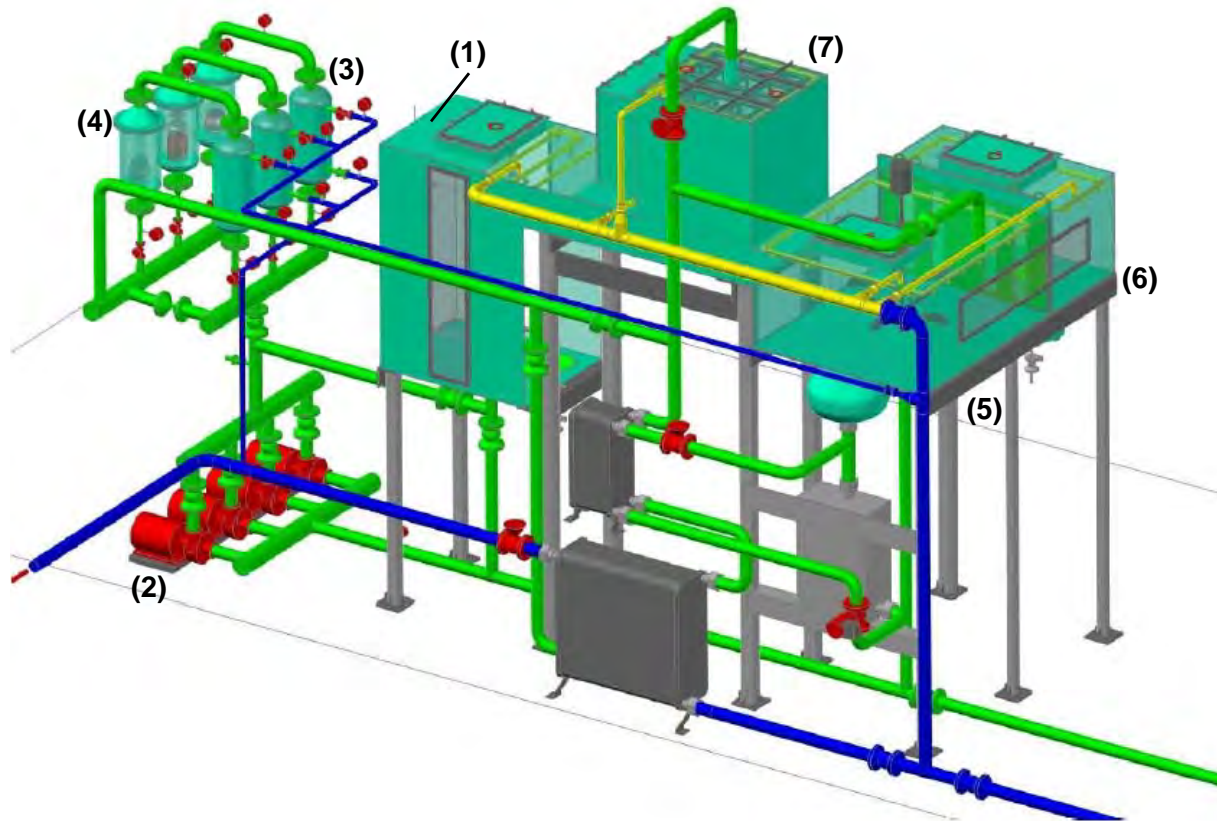
Zu Korrosion und Lösung chemischer Substanzen wurde ein umfangreiches Untersuchungsprogramm (ICET) durchgeführt. Neben Aluminium, Kalzium und Silizium werden insbesondere Pufferlösungen (Buffer) zur pH-Wert-Einstellung, wie beispielsweise NaOH und TSP untersucht. Noch nicht geklärt ist die Frage der ex-situ- oder in-situ-Präparierung der Lösungen für die Versuche. Entsprechend der WCAP-Prozedur sind die Lösungen beispielsweise außerhalb der Versuchsanlage herzustellen. Bei Korrosionseffekten wird davon ausgegangen, dass die chemischen Prozesse innerhalb der Versuchsanlage stattfinden sollen.

3.2.4 Frankreich

IRSN, VUEZ und die Universität Trencin haben mit der Errichtung der VIKTORIA Versuchsanlage in Levice (Slowakei) den aktuellen internationalen Schwerpunkten der Forschung zum Sump Clogging Rechnung getragen. Die VIKTORIA Versuchsanlage dient vor allem Untersuchungen zu chemischen Effekten und zu „downstream“ Effekten. Die Versuchsanlage wurde am 15. Dezember 2011 offiziell in Betrieb genommen. Die Abb. 3-1 zeigt einen Überblick über die Versuchsanordnung.

Die Versuchsanlage hat in den Tanks 5, 6 und 7 die Möglichkeit, die durch den Bruchstrahl bzw. herabfallenden Wassers freigesetzten Isoliermaterialien und andere Stoffe der Versuchsanlage zuzuführen. Im „Leaching“ Behälter (6) können Materialien bzw. auch Kleinkomponenten dem Kühlmittel mit einer vorgegebenen Strömung ausgesetzt werden. Freigesetzte Materialien (Partikel, Lösung) bzw. chemische Produkte werden dann dem Hauptkühlkreislauf über Sumpfsieb (1), Pumpen (2), Kühler (3) und Brennelemente (4) zugeführt. Im Sprühbehälter könne Materialien (Farben, Beton, Gitterroste etc.) einem Sprühmassenstrom ausgesetzt werden. Freigesetzte Stoffe (Partikel, Lösung) werden dann dem Hauptkühlkreislauf zugeführt. Der Wärmetauscher (3) wird

gekühlt. Dort können aus Lösungen durch Abkühlung Materialien ausgefällt werden und sich an den Kühlrohren ablagern. Ähnliches kann an den beheizten Brennelementen (4) erfolgen. Die VIKTORIA Versuchsanlage ist somit eine integrale Versuchsanlage, die alle wesentlichen in einer realen Anlage vorhandenen Komponenten berücksichtigt und die realen Kühlmittelzustände (einschließlich Beheizen und Kühlen) nachbildet. Somit können für chemische Reaktionen relevante Zustände eingestellt werden und deren Verhalten in Kombination mit Isoliermaterialablagerungen untersucht werden.



- (1) Tank für Sumpfsieb
- (2) Notkühlpumpe
- (3) Nachwärmekühler (kühlbar)
- (4) Brennelementsimulator (beheizbar)
- (5) Behälter für Isoliermaterial-eintrag
- (6) „Leaching“ Behälter für das Herauslösen von Stoffen aus Materialien, die in Kontakt mit dem Kühlwasser kommen
- (7) Sprühbehälter (auch für Erosionseffekte)

Abb. 3-1 VIKTORIA Versuchsanlage

3.2.5 Bewertung der internationalen Entwicklungen

Aus den Diskussionen innerhalb der OECD/NEA-Arbeitsgruppe wurde deutlich, dass international immer noch der Schwerpunkt auf modularen Sieben mit entsprechend großen Siebflächen liegt. Der vergrößerte Kerneintrag bei nur teilweise belegten Sieben wurde innerhalb der Arbeitsgruppe als ein wichtiger Aspekt für die Downstream-Effekte identifiziert.

In Japan und Korea werden Ergebnisse aus CFD-Rechnungen anscheinend schon sehr viel intensiver in der Nachweisführung eingesetzt als in Westeuropa und Nordamerika.

Die deutsche Herangehensweise mit einer Minimierung aller Quellen für eventuelle Sumpfsieb- und Abstandshalteranlagerungen ist international nicht verbreitet. So werden beispielsweise die in Deutschland angenommenen Mengen an Staub im Sumpf eines DWR bzw. in der KoKa eines SWR von den Beteiligten der Arbeitsgruppe als sehr niedrig bewertet. Auch die Minimierung des Chemikalieneinsatzes auf Borsäure und LiOH in DWR-Anlagen und die Verwendung von Deionat in SWR-Anlagen ist spezifisch für Deutschland. Deshalb sind aus den Untersuchungen zu chemischen Effekten im Ausland kaum Erkenntnisse für deutsche Reaktoren abzuleiten. Auch die Verwendung möglichst weniger verschiedener Isoliermaterialien innerhalb einer Anlage ist international nicht ausdrücklich vorgeschrieben. Chemische Ausfällungsprodukte durch Kalzium sind im Ausland wegen der Verwendung von Cal-Sil-Isolierungen und ungeschützter Betonoberflächen weiterhin problematisch.

Insbesondere im Vergleich zu den USA ist die Nachweisführung in Deutschland sehr weit fortgeschritten. Allerdings werden die deutschen Erkenntnisse im Ausland nur wenig wahrgenommen und zum großen Teil als nicht-übertragbar angesehen.

3.3 Aktualisierung von Empfehlungen für die Nachweisführung bei DWRs (AP 3)

3.3.1 Isoliermaterial Freisetzung

Im Rahmen dieses Arbeitspunktes wurden die Battelle-KAEFER-Versuche aus dem Jahr 1995 erneut mit Berücksichtigung der Anforderungen der RSK-Stellungnahme von 2004 [/RSK04/](#) ausgewertet (Anlage 1).

Die Firma Battelle Ingenieurtechnik GmbH hat Versuche mit 6 Isoliersystemen der Firma KAEFER Isoliertechnik GmbH durchgeführt [/KAE95/](#), um den Umfang der Zerstörung von Isoliermaterial bei Kühlmittelverluststörfällen zu untersuchen. Die Versuche wurden mit Matratzenisolierung und Kassettenisolierung durchgeführt. Es wurden vier Isoliermaterialtypen untersucht: RTD2, Glasfaser, WDS-Granulat und RMI. Die Versuchsergebnisse wurden mit entsprechend dem aus dem NRC-Kegelmodell [/NRC03/](#) berechneten Freisetzungsmengen verglichen.

In deutschen KKW's wird Mineralwolle (meist MD2 von Isover) und in geringem Maße (außer KKW) mikroporöses Material (Minileit oder WDS) eingesetzt. Die entsprechenden Versuchsergebnisse sind deshalb besonders zu berücksichtigen.

In der RSK-Stellungnahme von 2004 [/RSK04/](#) wurden die analytischen Rahmenbedingungen zur Bestimmung der Freisetzungsraten mit dem NRC-Kegelmodell festgelegt. Mit der Berechnungsgrundlage der RSK-Stellungnahme von 2004 werden die gemessenen Freisetzungsmengen der Battelle-KAEFER-Versuche für Mineralwolle (RTD2) und WDS-Granulat abdeckend bestimmt. Insbesondere für die Bestimmung der Gesamtfreisetzungsmengen bei Mineralwolle ergibt sich kein direkter Mangel im Nachweisverfahren zur gesicherten Kernkühlung.

Die in den Battelle-KAEFER-Versuchen in 5 von 6 Fällen höheren Gesamtfreisetzungsmengen gegenüber dem NRC-Kegelmodell bestätigen die Zusatzanforderungen der RSK in der Stellungnahme von 2004 [/RSK04/](#) bei der Bestimmung von Gesamtfreisetzungsmengen.

Die Versuche zeigen, dass der Freisetzungsort durch das NRC-Kegelmodell nur unzureichend bestimmt wird. Insbesondere wurden bei den Battelle-KAEFER-Versuchen

erhebliche Freisetzungsmengen in Zone 3 ($L/D > 7$) gemessen, die beim NRC-Kegelmodell nicht zu erwarten wären.

Daher ist für DWRs und SWRs zu prüfen, ob durch „Abschälen“ der Isolierung an Behältern und Rohren und durch „Sekundäreffekte“ (z. B. herumfliegende Kassettenteile) zusätzliche Freisetzungsmengen erfolgen. Sollten Freisetzungsmengen in der Freisetzungszone 3 ($L/D > 7$) nicht ausgeschlossen werden können, sind diese bei der Nachweisführung zur gesicherten Kernkühlung bei Kühlmittelverluststörfällen mit Freisetzung von Isoliermaterial zu berücksichtigen.

3.3.2 Einfluss des Typs einer Versuchsanlage auf den Druckverlust über Ablagerungen

Der Einfluss von Ablagerungen auf Druckverluste über Rückhaltevorrichtungen im Sumpf (Sumpfsieb) oder im Reaktorkern (Abstandshalter) wurde in verschiedenen gestalteten Versuchsanlagen untersucht. Folgende drei Typen von Versuchsanlagen wurden eingesetzt:

- Ringleitungsversuchsanlage mit Testsektion entweder für ein Sumpfsieb oder ein Brennelementdummy (Einzeleffektversuch)
- Wannenversuch mit Testsektion für ein Sumpfsieb
- Wannenversuch mit Testsektion für ein Sumpfsieb und geschlossenen Loop über das Leck mit Testsektion für ein Brennelement (Integralversuch)

Die verfügbaren Versuchsergebnisse aller Typen von Versuchsanlagen wurden normiert. Die normierten Druckverluste, die aus den gemessenen Druckverlusten aller Typen von Versuchsanlagen abgeleitet wurden, wurden mit den normierten Messergebnissen an den Sumpfsieben der GKSS-Versuchsanlage (1:4 skalierte Wanne) verglichen.

Die normierten Druckverluste unterscheiden sich bis zu einem Faktor 100 zwischen den hohen normierten Druckverlusten an einer dünnen Schicht Isoliermaterial (z. B. am Abstandshalter des BE-Dummys gemessen an der „Erlanger Wanne“ oder bei Ablagerung bei niedriger Isoliermaterialkonzentration und der normierten Druckverluste über eine manuell aufgetragene Isoliermaterialablagerung.

Die Versuchsergebnisse zeigten, dass Isoliermaterial nicht manuell auf ein Sumpfsieb aufgebracht werden soll, da dies zu einer starken Unterschätzung der normierten Druckverluste führt.

Einzeleffektversuche in Ringleitungs-Versuchsanlagen stellen wertvolle Versuchsdaten zum Vergleich mit verschiedenen Randbedingungen und Isoliermaterialien bereit. Aber man muss sich bewusst sein, dass die normierten Druckverluste dort ungefähr um einen Faktor 3 im Vergleich zu Wannen-Versuche unterschätzt werden.

Wannen-Versuchsanlagen berücksichtigen Sedimentationsphänomene im Sumpf und Selektionsphänomene im Sumpf auf den Weg zum Sumpfsieb. Solche Versuchsanlagen sind in der Lage, die Ablagerungsmenge und Druckverluste an den Sumpfsieben mit einer höheren Zuverlässigkeit zu bestimmen.

Integrale Versuchsanlage weiten die Möglichkeiten der Wannen-Versuchsanlagen auf stromabwärts gelegene Rückhaltevorrichtungen für Isoliermaterial wie z. B. die Abstandshalter an Brennelementen aus. Diese integralen Versuchsanlagen sind die Versuchsanlagen, die die meisten im Sumpf und Reaktorkern erwarteten Phänomene während eines Kühlmittelverluststörfalls mit Freisetzung von Isoliermaterial ausreichend genau simulieren können. Die Versuche haben gezeigt, dass die normierten Druckverluste an stromabwärts gelegenen Rückhaltevorrichtungen (z. B. Abstandshalter) etwa einen Faktor 3 bis 5 größer sind, als am Sumpfsieb.

Die Auswertung von allen Versuchen der „Erlanger Wanne“ hat gezeigt, dass die normierten Druckverluste und die Sedimentation von Isoliermaterial im Sumpf (prozentualer Anteil des in den Sumpf eingetragenen Isoliermaterials, das sich am Boden des Sumpfes absetzt) stark abhängig von folgenden Randbedingungen sind:

- Konzentration von Isoliermaterial im Sumpfwasser
- Sumpfwassertemperatur
- Strömungsgeschwindigkeit am Sumpfsieb
- Wasservolumen im Sumpf und
- Bruch/Leckmassenstrom

Daher sollten die Randbedingungen der Versuche so genau wie möglich den realen Randbedingungen im realen Kernkraftwerk entsprechen.

Die Auswertung der Versuchsergebnisse von verschiedenen Typen von Versuchsanlagen hat gezeigt, dass die Konfiguration einer Versuchsanlage einen großen Einfluss auf den sich ausbildenden Druckverlust über ein abgelagertes Filterbett hat. Soweit verfügbar, sollte daher auf Versuchsergebnisse von Integralversuchen zurückgegriffen werden, die Sedimentationseffekte und somit Selektionseffekte des freigesetzten und transportierbaren Isoliermaterials realistisch simulieren können. Zusätzlich sollten nur Versuchsergebnisse verwendet werden, die mit Randbedingungen erzeugt wurden, die so nah wie möglich an den in einem Kernkraftwerk erwarteten Randbedingungen liegen.

Sollten keine Integralversuchsergebnisse mit realistischen Randbedingungen verfügbar sein, sollte ein ausreichender Sicherheitszuschlag für eine abdeckende Druckverlustberechnung herangezogen werden.

3.4 Übertragbarkeit der Ergebnisse von DWR auf SWR (AP 4)

3.4.1 RSK-Stellungnahmen

Die Anforderungen aus der RSK-Stellungnahme von der 374. Sitzung vom 22.07.2004 an „den Nachweis der Notkühlmittelwirksamkeit bei Kühlmittelverluststörfällen mit Freisetzung von Isoliermaterial und anderen Stoffen“ [/RSK04/](#), wurden für den DWR entwickelt. Diese Anforderungen sind auch für den SWR anwendbar, wenn die folgenden Ergänzungen und Anpassungen berücksichtigt werden:

- Freisetzung von Isoliermaterialien und anderen Stoffen:

Im Siedewasserreaktor herrscht mit 70 bar ein etwa halb so großer Druck wie im Druckwasserreaktor. Dies führt dazu, dass bereits bei einem geringeren Abstand zur Bruch/Lecköffnung der Druck im Bruchstrahl soweit abfällt, dass keine Kassetten mehr durch den Bruchstrahl zerstört werden können. Dies trifft für Leckpositionen im Wasserbereich zu. Bei Lecks und Brüchen im Dampfbereich ist zu berücksichtigen, dass die Aufweitung des Bruchstrahls mit etwa 30 ° wesentlich geringer ist, als bei Wasser mit etwa 90 °. Dies führt dazu, dass bei einem größeren Abstand zur Bruch/Lecköffnung, Kassetten noch zerstört werden können. Allerdings ist die Zerstörungskraft seitlich wegen der geringeren Aufweitung geringer. Es ist davon auszugehen, dass der geringere Systemdruck und die geringere Strahlaufweitung die Verlängerung des Einflussbereichs des Dampfstrahls kompensiert

(siehe Kap. 3.5.8).

Die Battelle-KAEFER-Versuche [/KAE95/](#) haben jedoch auch außerhalb der Einflusszone des NRC-Kegelmodells ($L/D > 7$) die Zerstörung von Kassetten durch Sekundäreffekte gezeigt (Anlage 1). Sekundäreffekte sind das Abschälen von Kassetten und das Zerstören von Kassetten durch herumfliegende Kassettenteile. Wegen der komplizierten Rohrleitungsführung im Bereich der Zuführungen zu den S+E-Ventilen und Hilfsdampfleitung sind die Auswirkungen der oben beschriebenen Sekundäreffekte beim SWR zu prüfen und ggf. zu quantifizieren.

– Transport im Sicherheitsbehälter:

Freigesetztes Isoliermaterial und andere freigesetzte Materialien werden auch beim SWR in den Sicherheitsbehälter (Druckkammer) freigesetzt. Die freigesetzten Materialien können sich entweder in der Druckkammer ablagern oder in den Steuerstabantriebsraum (Sumpf) und die Kondensationskammer gelangen. Das Postulat beim DWR von 50 % für den Transport in den Sumpf, kann wegen der unterschiedlichen Geometrie und der unterschiedlichen Strömungsverhältnisse nicht auf den SWR übertragen werden. Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass der größte Teil des über den Bruch/das Leck freigesetzten Dampfes in die Kondensationskammer abströmt und dass das Kühlmittel aus dem Steuerstabantriebsraum (Sumpf) in die Kondensationskammer zurückgeführt wird. Die Transportraten von Isoliermaterial und anderen Materialien sind entweder durch repräsentative Versuche zu ermitteln oder konservativ analytisch festzulegen. Des Weiteren ist der Umfang einer Mobilisierung von in der Kondensationskammer abgelagerten Materialien zu bestimmen.

– Transport im Sumpfwasser:

Beim SWR ist nicht nur der Transport im Steuerstabantriebsraum (SAR) z. B. zum Überlaufrohr zu bestimmen, sondern auch der Transport in der Kondensationskammer zu den Ansaugstutzen. Der für den DWR festgelegte Transportanteil für das Isoliermaterial MD2 (83) von 20 % bis 40% kann wegen unterschiedlicher Geometrie und Strömungsverteilung im SAR und Kondensationskammer nicht auf den SWR übertragen werden. Die Transportraten für Isoliermaterial und andere Materialien sind entweder basierend auf Experimenten oder analytisch mit für den Anwendungsbereich validierten Rechenprogrammen konservativ zu bestimmen.

Während der Druckabbauphase bzw. dem Abblasen über die S+E-Ventile ist entweder die Sedimentation und Resuspension in der Kondensationskammer experimentell zu bestimmen oder keine Sedimentation (ggf. Resuspension von am Boden abgelagerten Isoliermaterial) zu unterstellen.

- Druckverlust an den Sumpfsieben:
 Beim SWR ist der Druckverlust infolge von Ablagerungen an den Rückhaltevorrichtungen in der Kondensationskammer zu bestimmen. Für alle Rückhaltevorrichtungen gelten die gleichen Anforderungen bei der Nachweisführung wie für den DWR. Während der Druckabbauphase und dem Abblasen in die Kondensationskammer über die S+E-Ventile herrschen große Turbulenzen in der Kondensationskammer, die einen großen Einfluss auf die Ablagerung auf den Siebkörben bzw. die Penetration durch die Siebkörbe haben. Wenn nicht durch Versuche Ablagerung und Penetration quantifiziert worden sind, ist in dieser Phase für die Nachweisführung bei den Druckverlusten an den Siebkörben eine 100%ige Ablagerung zu unterstellen und für die Kernkühlung eine 100%ige Penetration
- Penetration von Isoliermaterial durch das Sieb
 Beim SWR ist die Penetration von Isoliermaterial durch alle Rückhaltevorrichtungen zu berücksichtigen. Während der Druckabbauphase bzw. des Abblasens der S+E-Ventile ist eine 100% Penetration der Siebkörbe in der Kondensationskammer zu unterstellen, solange noch keine vollständige Belegung der Siebkörbe vorliegt. Alternativ können die Penetrationsraten in dieser Phase konservativ aus Versuchen abgeleitet werden. Ansonsten können die Anforderungen für den DWR auch für den SWR übernommen werden.
- Druckverlust im Kern durch Eintrag von Isoliermaterial
 Alle Anforderungen für den DWR können auch für den SWR angewendet werden. Allerdings ist die Kernkühlung beim SWR bereits gewährleistet, wenn der aktive Kern vollständig mit zweiphasigem Kühlmittel bedeckt ist. Bei der Strömungsverteilung im SWR-Kern ist zu berücksichtigen, dass Bypassströmungen im Brennelement (Wasserkasten) und um den Brennelementkasten über Bohrungen im Brennelementfuß auftreten, die zur Nachwärmeabfuhr beitragen. Bei Berücksichtigung der Bypassströmungen ist experimentell nachzuweisen, dass eine Verstopfung dieser Strömungswege ausgeschlossen werden kann.
- Komponenten im Nachkühlkreislauf
 Die Anforderungen für den DWR können auch für den SWR angewendet werden. Zusätzlich ist auszuschließen, dass insbesondere Temperatureinflüsse in Wärmetauschern und Brennelementen nicht zu zusätzlichen Ablagerungen (z. B. Ausfällphänomene durch Änderungen der Löslichkeit von Materialien) führen, die die Druckverluste über Ablagerungen nachteilig beeinflussen.

- Langzeitverhalten
Das Kühlmittel im SWR ist Deiont. Daher sind Boreffekte nicht zu unterstellen. Trotzdem können Materialien im Kühlmittel gelöst bzw. in der Strömung durch Erosion freigesetzt und in das abgelagerte Isoliermaterial eingelagert werden. Die Änderung der Druckverluste durch die oben beschriebenen Phänomene ist zu quantifizieren.
- Sauberkeit der Anlage
Die Anforderungen für den DWR können auch für den SWR angewendet werden. Die Sauberkeit der Kondensationskammer, der Rückhaltevorrichtungen und KOKA Kühlleitungen ist zu gewährleisten. Verunreinigungen sind bei der Druckverlustberechnung über Ablagerungen zu berücksichtigen.
- Anlageninterne Notfallmaßnahmen
Die für DWR-Anlagen geltenden Anforderungen sind auch für den SWR anwendbar. Es ist allerdings nachzuweisen, dass für den auslegungsgemäßen Ablauf eines Kühlmittelverluststörfalls ein Überschreiten der Auslegungsanforderungen der Rückhaltevorrichtungen und die Kavitation der Not- und Nachkühlsysteme ausgeschlossen ist. Falls dieser Nachweis nicht vorliegt, ist auch für den SWR eine Maßnahme zur Begrenzung der Druckverluste gemäß der RSK-Stellungnahme der 406. Sitzung vom 13.03.2008 bereitzustellen [/RSK08/](#).
- RSK-Stellungnahme der 406. Sitzung
Die RSK-Stellungnahme der 406. Sitzung [/RSK08/](#) ist für den SWR nur anzuwenden, wenn für den auslegungsgemäßen Ablauf eines Kühlmittelverluststörfalls kein Nachweis vorliegt, dass das Überschreiten der Auslegungsgrenzen der Rückhaltevorrichtungen im Not- und Nachkühlsystem ausgeschlossen werden kann. Die Anforderungen der RSK Stellungnahme können in diesem Fall übernommen werden.

Eine detaillierte Beschreibung der empfohlenen Ergänzungen bzw. Anpassungen der RSK Stellungnahmen [/RSK04/](#) und [/RSK08/](#) vom DWR an den SWR ist in der Anlage 2 enthalten.

3.4.2 Einfluss des Typs der Versuchsanlage auf Druckverluste an Sieben und Abstandshalter

Freigesetztes Isoliermaterial und andere mobilisierte Materialien können während eines Kühlmittelverluststörfalls im Not- und Nachkühlkreislauf (Steuerstabantriebsraum,

Kondensationskammer, Not- und Nachkühlsystem, Druckbehälter mit Kern) sedimentieren oder an Komponenten (Sieben, Wärmetauscher, Ventilen, Kern) abgelagert werden. Durch Sedimentations- und Ablagerungsprozesse ändert sich die Zusammensetzung (Länge von Fasern und Größe von Agglomeraten von Fasern). Dadurch verändert sich auch die Zusammensetzung (Dichte bzw. Porosität) von Ablagerungen im Not- und Nachkühlkreislauf. Dieser Effekt wird deutlich sichtbar, wenn man normierte Druckverluste aus Einzeleffektversuchen (berücksichtigen keine Sedimentation bzw. Ablagerung vor der getesteten Rückhaltevorrichtung) und Integralversuchen (Sedimentation und Ablagerungen werden in skalierten Behältern und skalierten Sieben berücksichtigt) vergleicht. Einzeleffektversuchsanlagen sind meist Ringleitungsversuche mit geringem Volumen, hoher Faserkonzentration und einer skalierten Testsektion. Integralversuche sind Wannerversuche mit einem zum realen Sumpf skalierten Behälter, skalierten Sumpfsieben und einem Not- und Nachkühlsystem mit einer Testsektion für einen Brennelementdummy. Ein Vergleich der Versuchsergebnisse zeigt, dass die normierten Druckverluste an Sumpfsieben in einer Ringleitung nur etwa 1/3 betragen im Vergleich zu den normierten Druckverlusten an Sumpfsieben bei Integralversuchen. Die normierten Druckverluste an Abstandshaltern bzw. nachgelagerten Feinstdieben in Integralanlagen (große Wassermasse, geringe Faserkonzentration) sind etwa drei- bis fünfmal so groß wie an den Sumpfsieben. Eine Verringerung der Faserkonzentration in der Wanne der Integralversuchsanlage führt ebenfalls zu einer starken Erhöhung der normierten Druckverluste. Die höheren, normierten Druckverluste in Integralversuchsanlagen werden wahrscheinlich durch die verringerte Faserkonzentration, Sedimentations- und Ablagerungseffekte verursacht. Die höheren normierten Druckverluste sind ein Versuchsergebnis, die möglichen Ursachen nur eine Hypothese. Allerdings ist anzunehmen, dass die integralen Versuchsanlagen das Ablagerungsverhalten realistischer nachbilden als Einzeleffektversuchsanlagen. Die Versuchsergebnisse von Integralversuchsanlagen sind konservativ in Bezug auf die Nachweisziele im Vergleich zu Einzeleffektversuchsanlagen.

Versuchsergebnisse aus Integralversuchsanlagen liegen nur für DWR Sumpfsiebe und DWR Brennelementdummies vor. Für SWR typische Siebkörbe und SWR Brennelementdummies liegen keine Versuchsergebnisse aus Integralversuchsanlagen vor. Es wird daher empfohlen, für die normierten Druckverluste bei SWR Rückhaltevorrichtungen, die aus den DWR Versuchen abgeleiteten Erhöhungsfaktoren für Druckverluste an Sumpfsieben und Brennelementdummies bei der Nachweisführung zu berücksichtigen.

3.5 Bewertung generischer Untersuchungen zur gesicherten Kernkühlung beim SWR (AP 5)

3.5.1 Transport im Sicherheitsbehälter

In einem Siedewasserreaktor wird das bei einem Kühlmittelverluststörfall freigesetzte Isoliermaterial zunächst in die Druckkammer des Sicherheitsbehälters eingetragen. Das Isoliermaterial, das sich dort nicht ablagert, wird mit dem Dampfmassenstrom in die Kondensationskammer und in kleinen Mengen auch in den Steuerstabantriebsraum transportiert. Austretendes Notkühlwasser und Kondensatablauf schwemmen einen Teil des in der Druckkammer abgelagerten Isoliermaterials in den Steuerstabantriebsraum. Für andere beim Kühlmittelverluststörfall mobilisierte Materialien sind die gleichen Transportwege relevant.

Der Transport von Isoliermaterial in die Kondensationskammer wurde in den Versuchsanlagen von Karlshamn und des IPM untersucht. In Karlshamn wurde zusätzlich der dampfgetragene Transport von Isoliermaterial in den Steuerstabantriebsraum untersucht. Die Versuchsergebnisse aus Karlshamn zeigen einen Eintrag von Isoliermaterial in die Kondensationskammer von bis zu 5,2 % des beim Versuch am Target angebrachten Isoliermaterials. Der Isoliermaterialtyp wurde nicht dokumentiert, es wird nur von Mineralwolle gesprochen. Die Versuchsergebnisse aus der IPM Versuchsanlage zeigen für die getesteten Isoliermaterialien MD2_{alt}, MD2_{neu} und MDK Transportraten von bis zu 20 % bei einem Dampfdruck von 70 bar. Diese hohen Werte wurden erreicht, obwohl die Abblasezeit von 3 s und 13 s wesentlich kürzer waren, als die 100 s in Karlshamn. Längere Abblasezeiten führen tendenziell zu einem höheren Übertrag in die Kondensationskammer, da anzunehmen ist, dass in der kurzen Zeit das Isoliermaterial in der Druckkammer noch nicht vollständig an Wänden und Böden abgelagert ist. Der zylindrische Behälter der IPM Versuchsanlage ermöglicht keine Strömungsbereiche, die eine verstärkte Ablagerung von Isoliermaterial ermöglichen (Strömungstotgebiet). Diese Strömungsbereiche sind in Karlshamn mit seinem quaderförmigen Container und in der Realanlage mit Einbauten in größerem Umfang zu erwarten. Aus diesem Grund wird angenommen, dass die Unterschätzung der Transportrate zur Kondensationskammer infolge der verkürzten Abblasezeit durch die Unterschätzung der Strömungstotgebiete kompensiert wird. Auf Basis dieser Annahme ist es gerechtfertigt, die in der IPM-Versuchsanlage gemessenen Transportraten zur Kondensationskammer von bis zu 20 % als abdeckend für den Siedewasserreaktor anzusehen.

Die gemessenen Transportraten von 0,3 % zum Steuerstabantriebsraum in Karlshamn unterschätzen den in der realen Anlage zu erwartenden Transport. Erstens war die Dampfeinströmung in den Steuerstabantriebsraum zu gering, da der Raum nur etwa ein Drittel eines skalierten Raumes entsprach. Zweitens war der Druckaufbau in der Druckkammer zu gering, da die Abblaserohre nicht in einer Wasservorlage eingetaucht waren. Drittens wurde das Abwaschen von in der Druckkammer abgelagerten Isoliermaterial durch Wasserausströmung aus dem Leck und Kondensatabfluss zum Steuerstabantriebsraum nicht berücksichtigt. Diese Effekte wurden weder analytisch noch experimentell quantifiziert. Die Rückhaltung von Isoliermaterial auf dem Weg zum Steuerstabantriebsraum wird in der Nachweisführung der Betreiber qualitativ beschrieben und eine maximale Transportrate von 20 % angesetzt. Dieser Wert erscheint auch der GRS als abdeckend, da nicht mehr als ein Viertel der Druckkammer z.B. durch Abwaschen von Ablagerungen durch den Leckmassenstrom betroffen ist.

3.5.2 Transport von Isoliermaterial in der Kondensationskammer und im Steuerstabantriebsraum

Das in die Kondensationskammer bzw. den Steuerstabantriebsraum eingetragene Isoliermaterial wird gemeinsam mit Wasser über die Ansaugstutzen der Not- und Nachkühlsysteme dem Kühlmittelkreislauf zugeführt, soweit das Isoliermaterial nicht in diesen Räumen sedimentiert. Experimentelle Untersuchungen zur Sedimentation in der Kondensationskammer bzw. in den Steuerstabantriebsraum, wie in der RSK-Stellungnahme von 2004 /[RSK04](#)/ für den DWR gefordert, liegen für die Geometrie und die Strömungsverhältnisse im SWR nicht vor. Die Sedimentation in der Kondensationskammer bzw. im Steuerstabantriebsraum wurden mit dem Programm TISA bestimmt. TISA berechnet die 3-dimensionale Strömungsverteilung in einem Wasserkörper mit freier Wasseroberfläche und wurde für meereskundliche Aufgaben entwickelt und validiert. Eine mittlere Sinkgeschwindigkeit wurde durch Nachrechnung von Versuchen der Firma Prien abgeleitet und auf 5,8 mm/s gesetzt. Mit dieser mittleren Sinkgeschwindigkeit konnten die Versuche der Firma Prien reproduziert werden. Eine Verifizierung dieser mittleren Sinkgeschwindigkeit durch Messwerte liegt nicht vor. Da nur mit der Anpassung dieses entscheidenden Parameters für die Sedimentation die Versuchsergebnisse reproduziert werden konnten, gilt dieser Wert nur für die Versuchsanordnung und -durchführung von Prien und der Modellierung dieser Versuchsanlage mit TISA. Die Anwendung dieses Parameters für Analysen mit anderer Geometrie und anderen Strömungsverhältnissen, wie bei einer realen Kondensationskammer bzw. eines Steu-

erstabtriebsraums, ist nicht ohne weitere Nachweise möglich. Eine Validierung des Programms TISA für die Anwendung auf Sedimentationsprozesse von faserigem Isoliermaterial liegt mit der Nachrechnung der Prien-Versuche nicht vor.

Das Netzwerk für die Analyse des Sedimentationsverhaltens mit TISA ist sehr grob. Lokale Turbulenzen, die entscheidend für Sedimentation und Resuspension am Boden sind, können nicht mit dieser groben Auflösung berechnet werden.

Die mit TISA berechneten Strömungstrajektorien in der Kondensationskammer zeigen, dass die Strömung von Ansaugstutzen dominiert wird. Die Versuche der Erlanger-Wanne haben gezeigt, dass in der Erlanger-Wanne die Strömungsverhältnisse von den Zuströmbedingungen dominiert werden. Kühlmittel kann über die Abblaserohre, die Düsenkreuze der S+E-Ventile, die Überlaufrohe vom Steuerstabtriebsraum und die Sprühkränze zur Kondensationskammerkühlung in die Kondensationskammer einströmen. Das über die Sprühkränze verteilte Wasser reißt beim Eintritt in die Wasservorlage Luft mit und erzeugt damit einen der Zuströmrichtung entgegen gesetzten Strömungswirbel. Alle durch die Zuströmung verursachten Strömungsimpulse müssten bei einer analytischen Nachweisführung zur Sedimentation berücksichtigt werden. Das in das Kondensationskammerwasser eingetragene Isoliermaterial liegt in einer Verteilung von unterschiedlichen Faserlängen und Agglomeraten unterschiedlicher Größe vor, die unterschiedliche Sinkgeschwindigkeiten aufweisen. Die Sedimentation von Isoliermaterial wird bei einer Analyse mit einer mittleren Sinkgeschwindigkeit überschätzt, da die kleinen und leichten Fasern und Faseragglomerate zu schnell zu Boden sinken. Dies wird nicht durch das langsamere Absinken von schweren Teilchen kompensiert. Zusätzlich erfolgt insbesondere in der Druckabbauphase eine sekundäre Fragmentierung im Bereich der unteren Enden der Abblaserohre und Düsenkreuze der S+E-Ventilleitungen. Andererseits bilden und verändern sich Agglomerate von Fasern. All diese Phänomene werden in den TISA Analysen nicht berücksichtigt.

Die TISA Analysen sind in Bezug auf die Sedimentation in der Kondensationskammer zu optimistisch weil

- die berechneten Strömungsverteilung nicht alle Strömungsimpulse einströmender Massenströme berücksichtigt,
- die Auflösung der Strömungsverteilung am Boden der Kondensationskammer unzureichend für die Berechnung der Sedimentation- und Resuspensionsvorgänge ist,

- ein Transport von oberhalb des Bodens schwebenden Isoliermaterials nicht berücksichtigt wird (Isoliermaterial, das den Boden erreicht hat, bleibt dort liegen) und
- Isoliermaterialteilchen mit geringer Sinkgeschwindigkeit nicht berücksichtigt werden.

Es ist aus der Dokumentation zu den TISA Analysen nicht ersichtlich, ob bei den in Tab. 3-1 angegebenen Sedimentationsraten das während der Druckabbauphase (nicht mit TISA berechnet) abgezogenen Isoliermaterial berücksichtigt wurde.

Tab. 3-1 Mit TISA berechnete Sedimentationsraten in der Kondensationskammer und Steuerstabantriebsraum

| Ort | SWR | |
|------|---------------------|---------------------------|
| | 1 Not Nachkühlpumpe | 3 Not- und Nachkühlpumpen |
| KOKA | ≈ 89 % | ≈ 69% |
| SAR | > 99 % | |

Die in der Tab. 3-1 beschriebene Sedimentationsraten sind wie oben beschrieben zu optimistisch. Unter Berücksichtigung der oben beschriebenen Anforderungen müssen die Sedimentationsraten entweder mit validierten Rechenprogrammen oder experimentell neu bestimmt werden.

Die in der RSK-Stellungnahme [/RSK04/](#) beschriebenen Anforderungen sind auch für die Sedimentation im Steuerstabantriebsraum relevant. Eine Sedimentationsrate im Steuerstabantriebsraum von mehr als 99 % ist nur möglich, wenn weniger als 1 % des Isoliermaterials langfristig in Schwebelage bleibt. Dies muss gesondert nachgewiesen werden.

Die Analysen zur Sedimentation in der Kondensationskammer und im Steuerstabantriebsraum sind nicht belastbar. Die berechneten Werte werden als zu optimistisch betrachtet. Somit werden die Ablagerungsmengen an den Rückhaltevorrichtungen bzw. die Penetration durch diese Rückhaltevorrichtungen unterschätzt.

3.5.3 Druckverluste an Siebkörpern

In deutschen SWRs sind Siebkörper an den Ansaugstutzen der Kondensationskammer eingebaut. Die Siebflächen bestehen bei den Siebkörpern aus Lochblechen.

Die Druckverluste an Ablagerungen eines skalierten anlagentypischen Siebkorbs einer SWR Anlage wurden an der Versuchsanlage bei der Firma Prien quantifiziert. Das Isoliermaterial MDK wurde für die Versuche hochdruckfragmentiert. Bei Umrechnung des dort gemessenen Druckverlustes auf MD2-83 entsprechend dem Umrechnungsfaktor aus den Erlanger Wannen Versuchen ergibt sich ein normierter Druckverlust, der den Druckverlusten der Erlanger-Wanne und der GKSS-Versuchsanlage in etwa entspricht. Daher ist der quantifizierte normierte Druckverlust ohne einen Anpassungsfaktor für den Siebkorb anwendbar.

3.5.4 Begrenzung der Druckverluste über Rückhaltevorrichtungen

Die Versuche an der Versuchsanlage in Prien haben gezeigt, dass Siebkörbe beim SWR vollständig belegt werden können. Die Kernkühlung ist bei Kühlmittelverluststörfällen mit Freisetzung von Isoliermaterial nur sicher gestellt, wenn die Integrität der Rückhaltevorrichtungen auch bei Belegung mit Isoliermaterial und anderen Materialien gewährleistet bleibt und die Not- und Nachkühlpumpen nicht kavitieren. Dies ist nachzuweisen. Wenn der Nachweis nicht möglich ist, sind zuverlässige Maßnahmen zur Begrenzung/Reduktion der Druckverluste für Auslegungsstörfälle erforderlich [/RSK04/](#). Für auslegungsüberschreitende Störfälle sind entsprechende Notfallmaßnahmen vorzuhalten [/RSK08/](#).

Für die Siebkörbe bei SWR-Anlagen wurde aufgezeigt, dass durch Abschalten der Not- und Nachkühlpumpen eine Begrenzung der Druckverluste über Ablagerungen möglich ist. Dies wurde aufgezeigt für reine Isoliermaterialablagerungen (MDK) ohne Langzeiteffekte, wie Einlagerung von Korrosionsprodukten. Die Wirksamkeit der Maßnahme ist für die Anfangsphase des Kühlmittelverluststörfalls (1 Tag) nachgewiesen. Zur Zuverlässigkeit der Maßnahme entsprechen [/RSK08/](#) liegen keine Nachweise vor, d.h. diese Maßnahme kann nur für eine Notfallmaßnahme als ausreichend bewertet werden. Sollte eine Begrenzung/Reduktion der Druckverluste über Ablagerungen bereits bei einem Auslegungsstörfall erforderlich sein, müssten zusätzliche Zuverlässigkeitsnachweise geführt werden.

3.5.5 Penetration durch Rückhaltevorrichtungen

Die Penetration durch die Rückhaltevorrichtungen der Not- und Nachkühlsysteme ist von entscheidender Bedeutung für Phänomene stromabwärts von den Rückhaltevor-

richtungen. Diese Phänomene sind die Belegung bzw. Verstopfung von Brennelementen und Wärmetauschern und die mögliche Beeinträchtigung der Funktion von Ventilen/Rückschlagklappen (Dichtigkeit) und Pumpen. Die Versuche an der Versuchsanlage der Firma Prien haben für Siebkörbe und dem Isoliermaterial MDK eine Penetrationsmenge (aufgefangene Menge von Isoliermaterial an einem nachgelagerten Feinstsieb) abhängig von den Versuchsrandbedingungen von nahezu 0 % bis nahezu 100 % gezeigt.

An der Ringleitung KKB wurden für Lochbleche Untersuchungen für die Penetration von Isoliermaterial MD2 durchgeführt. Dabei wurden die Parameter der Lochbleche und die Strömungsgeschwindigkeit variiert.

Die gemessenen Penetrationsraten betragen für das Isoliermaterial MD2 bei den erwarteten Randbedingungen zwischen 35 % bis 60 %. Das eingesetzte Isoliermaterial wurde mit einem Hochdruckstrahl fragmentiert. Die Versuchsergebnisse an der Versuchsanlage von Prien und der Ringleitung von KKB zeigen, dass abhängig von den Versuchsrandbedingungen z. B. Fragmentierungsart und dem Typ der Versuchsanlage, eine Spannweite von nahezu keiner Penetration bis zur vollständigen Penetration auftreten kann. Für die Nachweisführung bedeutet dies, dass sowohl die vollständige Rückhaltung von Isoliermaterial zur Bestimmung der Druckverluste über die Ablagerung an Siebkörben und die vollständige Penetration in Bezug auf Ablagerungen im Kern zu unterstellen ist.

3.5.6 Druckverluste an Abstandshalter im Kern

Die Versuchsergebnisse der Versuchsanlage der Firma Prien haben gezeigt, dass bei Siebkörben bis zu 100 % des zu den Sieben transportierten Isoliermaterials penetrieren kann (siehe Kap. 3.5.5). Aus diesem Grund ist zu prüfen, in welchem Ausmaß das penetrierte Isoliermaterial an den Abstandshaltern zurückgehalten wird und welche Druckdifferenzen sich über diese Ablagerungen ausbilden. Dazu wurden vom IPM, von Vattenfall und GES Versuche durchgeführt. Die aus den Ablagerungen sich ergebenden Druckverluste wurden quantifiziert.

Dabei wurden folgende Ergebnisse erzielt:

- normierte Druckverluste sind abhängig vom Isoliermaterialtyp und Brennelementtyp. Der normierte Druckverlust verschiedener Isoliermaterialtypen für Atri-

um 10B beträgt bezogen auf das Isoliermaterial MD2-alt (wird auf 1 gesetzt) für die folgenden Isoliermaterialien:

- MDK: Mittelwert 0,42 (max. 0,67),
 - MD2-alt: Mittelwert 1,00 (max. 1,58),
 - MD2-neu: Mittelwert 1,38 (max. 2,25).
-
- SVEA 96 Optima 2 Brennelemente haben um bis zu 50 % niedrigere normierte Druckverluste im Vergleich zu Atrium 10B Brennelementen,
 - bei SVEA Brennelementen und bei hoher Anströmgeschwindigkeiten (SVEA und Atrium) verteilt sich das abgelagerte Isoliermaterial auf mehrere Abstandshalter,
 - der Fragmentierungsdruck und die Entnahme aus dem Primär- bzw. Sekundärbehälter der IPM-Fragmentierungsanlage hat keinen relevante Einfluss auf das Ablagerungsverhalten, jedoch zeigt Isoliermaterial aus dem Primärbehälter teilweise erhöhte normierte Druckverluste,
 - die Ablagerung und normiertes Druckverluste sind nur ein wenig abhängig von der Portionierung der Zugaben in die Versuchsanlage und der Zugabe-Zeitintervalle,
 - HD-fragmentiertes Isoliermaterial zeigt etwas verringerte normierte Druckverluste,
 - die Reproduzierbarkeit der Versuche war zufriedenstellend (Ergebnisse liegen zwischen 56 % und 164 % der Basisversuche),
 - die Abhängigkeit der Druckverluste von der Strömungsgeschwindigkeit liegt zwischen $v^{1,2}$ und $v^{1,4}$.

Die Versuchsergebnisse sind bei Berücksichtigung der Ergebnisunsicherheiten geeignet den Einfluss von Ablagerungen an Abstandshaltern auf die Kernkühlung zu quantifizieren und zu bewerten. Die Ergebnisunterschiede von Ringleitungsversuchen, wie hier eingesetzt, und von integralen Versuchen müssen jedoch bei der Nachweisführung berücksichtigt werden. Die Ringleitungsversuche liefern zuverlässige Relativwerte für normierte Druckverluste und für verschiedene Versuchsrandbedingungen und Isoliermaterialien. Im Vergleich zu Versuchsergebnissen in integralen Versuchsanlagen werden die normierten Druckverluste um den Faktor 3 bis 5 unterschätzt. Dies ist bei der Verwendung der hier diskutierten Versuchsergebnisse für die Nachweisführung zur gesicherten Kernkühlung zu berücksichtigen.

3.5.7 Einfluss von Korrosionsprodukten auf die Druckverluste über Ablagerungen beim SWR

Ein Siedewasserreaktor wird mit borfreien Kühlmittel betrieben. Aus diesem Grund können Versuchsergebnisse zu den Auswirkungen von Korrosionsprodukten auf die Druckverluste über Ablagerungen von Isoliermaterial nicht vom DWR auf den SWR übertragen werden. Bei GES und Vattenfall wurden Versuche durchgeführt, die das Korrosionsverhalten und dessen Auswirkung auf die Druckverluste untersuchen.

Die Versuche mit den Lochblechen sind nur wenig aussagekräftig, da die Versuchsdurchführung (manuelle Ablagerung von Isoliermaterial) bereits zu Beginn der Versuche zu einem atypischen Druckverlustverhalten über Isoliermaterialablagerungen (sehr geringe normierte Druckverluste; Abhängigkeit der Druckverluste, wie bei turbulenter Strömung) führte. Nur ein Versuch zeigte eine relevante Erhöhung der Druckerluste in den ersten 6 Tagen, aber nicht das charakteristische Druckverlustverhalten (starker Anstieg des Druckverlustes nach 7 Tagen). Allerdings wurde dieser Versuch bereits nach 9 Tagen abgebrochen.

Die Brennelementversuche zeigten während der ersten Tage auch ohne Einbringen von verzinkten Trittrosten eine Erhöhung der Druckverluste über Isoliermaterialablagerungen in der Größenordnung eines Faktors 2 (vermutlich durch Verdichtungseffekte). Etwa nach einer Woche zeigte sich eine weitere signifikante Erhöhung der Druckverluste bei den Versuchen, bei denen die Trittroste nicht bzw. nur teilweise getaucht waren. Bei diesen Versuchen wurden hohe Zinkkonzentrationen insbesondere an der angeströmten Oberfläche gefunden. Die Eisenkonzentration hatte sich gegenüber dem angelieferten Isoliermaterial kaum geändert. Daraus lässt sich schließen, dass neben anfänglichem Verdichtungseffekt die Zinkeinlagerung für die Erhöhung der Druckverluste verantwortlich ist. Die maximale Erhöhung der Druckverluste wurde bei einem Vattenfallversuch mit einem Faktor etwa 20 (abgeleitet aus normierten Werten) bestimmt. Dieser Faktor sollte bei der Nachweisführung zur Bestimmung der Druckverluste sowohl an den Lochblechen (keine belastbaren Versuchsergebnisse verfügbar) als auch bei Brennelementen berücksichtigt werden.

3.5.8 Freisetzung von Isoliermaterial

Im Auftrag vom VGB wurden 2001 Fragmentierungsversuche mit Kassetten am Großarmaturenprüfstand in Karlstein durchgeführt.

Ein Versuch wurde mit SWR-Randbedingungen durchgeführt. Der Bruchstrahl traf die Kasette im Abstand $L/D < 3$ auf der geschlossenen Oberseite. Die Kasette wurde deformiert und an der Innenseite aufgerissen, wobei knapp die Hälfte der enthaltenen Mineralwolle ausgespült wurde. Die dem Strahl abgewandte Seite wurde nicht zerstört.

Bei einem Versuch unter DWR-Randbedingungen wurde die strahlseitig an der Trägerkonstruktion angebrachten Kassetten (Leckstrahl trifft auf den Stoß zu den unteren Kassetten und zwischen den Kassettenhälften) wurden aufgerissen, weggeschleudert und vollständig entleert. Die strahlzugewandte untere Kasette wurde nur deformiert, obwohl der Stoß zu den oberen Kassetten getroffen wurde. Die strahlabgewandte Kasette wurde nicht beschädigt. Aus beiden Kassetten wurde kein Isoliermaterial freigesetzt.

Der Vergleich des Zerstörungsgrades von Kassetten unter SWR- und DWR-Randbedingungen für dem Bruchstrahl zugewandten Kassetten zeigt, dass der Zerstörungsgrad bei SWR-Randbedingungen gravierender ist, obwohl der Dampfdruck wesentlich niedriger ist, als der Wasserdruck unter DWR Randbedingungen. Es sollte daher geprüft werden, ob eine Vergrößerung der L/D -Werte des von der RSK modifizierten NRC-Kegelmodells für Lecks an einer Dampf führenden Leitung erforderlich ist. Die seitliche Kegelaufweitung (siehe Kap. 3.2 in Anlage 2) ist allerdings mit einem Winkel von 30° wesentlich kleiner als bei DWR –Randbedingungen mit 90° . Dieser Effekt dürfte den höheren Zerstörungsgrad im Zentrum des Dampfstrahls kompensieren. Ein Nachweis hierfür liegt jedoch nicht vor.

3.6 Bestimmung der Grenzbelegung der Abstandshalter für eine gesicherte Kernkühlung beim SWR (AP 6)

Analysen zur Grenzbelegung der Abstandshalter für eine gesicherte Kernkühlung im SWR bei Kühlmittelverluststörfällen mit Freisetzung von Isoliermaterial wurden mit dem Datensatz des Analysesimulators für das Kernkraftwerk Philippsburg 1 durchgeführt. Dabei kam das Multikanalkernmodell mit 56 Kernkanälen zum Einsatz.

Bei allen Analysen wurde angenommen, dass der innere Bypass im Brennelement (Wasserkasten) durch Isoliermaterial vollständig verstopft und nicht zur Wärmeabfuhr der Nachzerfallsleistung beiträgt. Der Kühlmittelverluststörfall wurde in allen analysierten Fällen durch ein 10 % Leck in der Frischdampfleitung ausgelöst. Die Nachzerfallsleistung wurde konservativ über die verkürzte DIN-Kurve bestimmt und um 7 % (2σ) erhöht. Die Nachzerfallsleistung wurde zusätzlich auf 106 % Reaktorleistung bezogen. Somit entsprach die Reaktorleistung den Anforderungen an die Nachweisführung für Auslegungsstörfälle der Sicherheitsebene 3.

Es wurde unterstellt, dass der Kerneintrag mit dem Anlaufen der Not- und Nachkühlsysteme beginnt und über eine Stunde erfolgt. Der gesamte Kerneintrag lagerte sich an der untersten Abstandshalterebene ab, da in der Ablagerungsphase eine positive Kerndurchströmung vorherrscht. Am obersten Abstandshalter wurde keine Isoliermaterialablagerung unterstellt, da dort nur eine oszillierende Strömung auftritt. Die Ablagerungsmenge wurde auf Basis folgender Annahmen bestimmt:

- Freisetzung am Leck: 80 kg
- Transport von der Druckkammer in die Kondensationskammer: 17,5 %
- Keine Sedimentation in der Kondensationskammer während der Notkühlphase I (Druckabbauphase)
- Transport von der Druckkammer in den Steuerstabantriebsraum: 20 %
- Sedimentation im Steuerstabantriebsraum: 80 %
- Penetration durch Rückhaltesiebe: 100 %
- Vollständige Ablagerung am untersten Abstandshalter (freie Strömungsfläche 100 cm²)

Die obigen Annahmen führen zu einer konservativ hohen Ablagerung von 2,1 kg/m² an der unteren Abstandshalterebene im Kern. Der spezifische Druckverlust (Eingabewert für ATHLET) wurde aus dem IPM BE7 abgeleitet, der den höchsten normierten Druckverlust aller Brennelementversuche aufgewiesen hat. Die Erhöhung der spezifischen Druckverluste infolge von der Einlagerung von Korrosionsprodukten wurde auf der Basis des Vattenfall-Versuchs abgeleitet, der den stärksten Einfluss von Korrosionsprodukten auf die Druckverluste zeigte. Der spezifische Druckverlust des IPM Versuchs wurde um den Faktor 9 zur Berücksichtigung von Korrosionsprodukten erhöht. Eine

nach den Analysen durchgeführte vertiefte Auswertung des Versuchs führte zu dem Ergebnis, dass auch eine Erhöhung der spezifischen Druckverluste um den Faktor 11 gerechtfertigt gewesen wäre (normierter Druckverlust des Vattenfall-Versuchs nach Einlagerung von Korrosionsprodukten geteilt durch normierten Druckverlust des ausgewählten IPM-Versuchs). Die Nachzerfallsleistung wurde für die Analyse des Einflusses von Korrosionsprodukten auf die Druckverluste auf 0,41 % (entspricht der Nachzerfallsleistung nach 18 Tagen) abgesenkt, da im Vattenfall-Versuch erst nach 18 Tagen der hohe spezifische und absolute Druckverlust erreicht wurde.

Mit den oben beschriebenen Randbedingungen wurden insgesamt 8 Analysen (Tab. 3-2) durchgeführt. Dabei wurden folgende Parameter variiert:

- Anzahl der verfügbaren Notkühlsysteme
- Belegungsichte der unteren Abstandshalter und
- Verstopfung der Bohrungen im Brennelementfuß (äußerer Bypass)

Tab. 3-2 Analysen zur Bestimmung der Grenzbelegung der Abstandshalter im Kern

| Notkühlsysteme | Belegung 2,1 kg/m ² | | Belegung 21 (31) kg/m ² | |
|----------------|--------------------------------|----------------------------|------------------------------------|----------------------------|
| | Äußerer Bypass offen | Äußerer Bypass geschlossen | Äußerer Bypass offen | Äußerer Bypass geschlossen |
| 1 TK, 4 TH | X | X | X | X |
| 3 TH | X | X | X | X |

Die Analysen wurden entweder mit allen Notkühlsystemen (4 Not- und Nachkühlsysteme TH und das Kernflutsystem TK) und mit Genehmigungsrandbedingungen entsprechend dem Einzelfehlerkonzept (3 Not- und Nachkühlsysteme) durchgeführt. Die Belegung wurde mit Beginn der Notkühlein speisung innerhalb einer Stunde auf 2,1 kg/m² hochgefahren und danach konstant gehalten. Bei Untersuchungen mit erhöhter Belegung wurde nach der Erstbelegung mit 2,1 kg/m² die Belegung auf 21 bis 31 kg/m² hochgefahren. In dem Zeitraum der weiteren Erhöhung der Belegung wurde die Nachzerfallsleistung auf etwa 1,6 % festgehalten um die Kühlbarkeit des Kerns bei sehr hohen Belegungen eine Stunde nach dem Anlaufen der Not- und Nachkühlsysteme untersuchen zu können. Bei den Analysen mit der Verstopfung des äußeren Bypass wurden nicht nur die Bohrungen im Brennelementfuß als vollständig verstopft angesetzt,

sondern auch die Schlitze vom unteren Plenum zu den Steuerstabführungsrohren. In diesen Fällen wird der Kernbypass nur vom Steuerstabspülwasser durchströmt.

Die Kernkühlung war in allen untersuchten Fällen ausreichend. Die Nachwärmeabfuhr erfolgt weitgehend durch den Kühlmittelmassenstrom im Brennelement und soweit verfügbar zusätzlich über den äußeren Bypass. Der äußere Bypass kann nach 10 Tagen (Beginn der Einlagerung von Korrosionsprodukten) einen großen Anteil der Nachzerfallsleistung abführen. Die Nachwärmeabfuhr wird auch durch einen oszillierenden Wassereinbruch vom oberen Plenum in die Brennelemente sichergestellt. Diese Kühlung ist relevant für die Fälle bei denen die Belegungsdichte auf 21 bis 31 kg/m² hochgefahren wurde.

Die Analysen zeigten, dass die Kernkühlung auch bei mehr als der 10-fachen Belegung der Abstandshalter, verglichen mit der konservativen Belegung von 2,1 kg/m² gewährleistet ist. Auch die Einlagerung von Korrosionsprodukten in die Ablagerungen verschlechterte die Kernkühlung nicht. Die Analysen zeigen, dass eine große Sicherheitsreserve für die Kernkühlung vorhanden ist, wenn man die Belastbarkeit der gemessenen Druckverluste unterstellt.

Der Vergleich aller Versuchsergebnisse für den DWR und SWR hat gezeigt, dass die aus gemessenen Druckverlusten abgeleiteten normierten Druckverluste in Integralanlagen höher sind, als bei Ringleitungsanlagen. Daher können die in den Ringleitungsanlagen ermittelten spezifischen Druckverluste zu klein sein, so dass diese bei der Übertragung auf eine reale Anlage um einen Faktor 3 bis 5 erhöht werden müssen. Dieser Effekt ist analytisch einer Erhöhung der Ablagerungsmenge um den Faktor 3 bis 5 gleichzusetzen. Für eine Erhöhung der Ablagerungsmenge um diesen Faktor, wurde durch die Analysen der Nachweis einer ausreichenden Kernkühlung erbracht.

Reale SWR Kerne sind mit unterschiedlichen Brennelementen wie z. B. SVEA und Atrium ausgerüstet. Beide Brennelementtypen weisen unterschiedliche normierte Druckverluste über Ablagerungen auf (Druckverluste Atrium doppelt so groß wie SVEA), d.h. bei gleicher Belegungsdichte würden die SVEA Brennelemente eine größere Durchströmung aufweisen, als ein Atrium-Brennelement. Erfahrungen von Versuchen und Analysen weisen darauf hin, dass bei größerer Durchströmung auch eine größere Ablagerung erfolgt, so dass sich die Druckverluste weitgehend ausgleichen. Unter der Annahme, dass dies auch für den SWR Kern zutrifft, sind die Druckverluste über Ablagerungen an Abstandshaltern im Mischkern mit SVEA und Atrium Brennelementen ge-

ringer als in einem reinen Atriumkern, der bei den Analysen unterstellt wurde. Somit ist in einem Mischkern die Kerndurchströmung größer als in einem reinen Atriumkern. Dies zeigt eine zusätzliche Konservativität der Analysen auf.

Es ist eine unzureichende Kernkühlung bei Kühlmittelverluststörfällen mit Freisetzung von Isoliermaterial und Ablagerungen im Kern auch bei Berücksichtigung der oben beschriebenen zu günstigen Annahmen zur Bestimmung der normierten Druckverluste über Ablagerungen in der Analyse nicht zu erwarten. Die Analysen wurden mit spezifischen Druckverlusten für das Isoliermaterial MD2 durchgeführt. Die Anlagen die mit der Mineralwolle MDK ausgerüstet sind, weisen abgeleitet aus den Erlanger-Wannenversuchen einen geringeren spezifischen Druckverlust auf. Für diese Anlagen sind daher noch größere Sicherheitsreserven zu erwarten.

Eine detaillierte Beschreibung der Analysen zur Grenzbelegung der Abstandshalter im SWR Kern ist in der Anlage 3 enthalten.

3.7 Entwicklung von Empfehlungen für die Nachweisführung bei SWR-Anlagen (AP 7)

In den Kapiteln 3.4 bis 3.6 wurden generische Unterlagen, Versuchsergebnisse und RSK-Dokumente, in Bezug auf deren Anwendbarkeit für die Nachweisführung der gesicherten Kernkühlung bei Kühlmittelverluststörfällen mit Freisetzung von Isoliermaterial beim SWR ausgewertet. Dabei wurden Empfehlungen für die Nachweisführung bei SWR-Anlagen abgeleitet. Daher werden in diesem Kapitel die Empfehlungen nur kurz zusammengefasst und dabei auf die Unterkapitel dieses Berichts verwiesen. Die Empfehlungen orientieren sich an der Struktur der Anforderungen an die Nachweisführung der RSK-Stellungnahme der 374. Sitzung vom 22.07.2004 für DWR /[RSK04](#)/. Der Bewertungsmaßstab der RSK für die Nachweisführung kann direkt vom DWR auf den SWR übertragen werden. Im Folgenden werden die Empfehlungen zur Nachweisführung bei SWR-Anlagen in der gleichen Reihenfolge wie bei den RSK-Anforderungen aufgelistet.

- Leckort: keine SWR spezifischen Empfehlungen
- Freisetzung von Isoliermaterial und anderen Stoffen: Beim SWR sind Leckpositionen im Wasser- und Dampfbereich des Kühlkreislaufs zu unterscheiden. Leckpositionen im Wasserbereich sind von den RSK-Anforderungen abgedeckt, da die Drü-

cke am Bruch/Leck bei SWR-Anlagen kleiner sind als bei DWR-Anlagen und die Bruchstrahlgeometrie ähnlich ist. Leckpositionen im Dampfbereich weisen eine andere Leckstrahlgeometrie (geringere Aufweitung des Leckstrahls mit 30 %, Anlage 2) auf. Dies führt dazu, dass trotz des geringeren Systemdrucks beim SWR bei gleichen L/D-Verhältnissen (Kap. 3.5.8) größere Freisetzungen an Kassetten an der Versuchsanlage in Karlstein gemessen wurden. Wegen der geringeren Aufweitung des Bruchstrahls ist allerdings seitlich von der Bruchstrahlachse ein geringerer Zerstörungsgrad von Isoliermaterial zu erwarten. Beim SWR sollte geprüft werden, ob Kassetten auf der Bruchstrahlachse außerhalb des L/D-Verhältnisses 7 getroffen werden können. Es sollte bewertet werden, ob diese Kassetten noch aufgerissen werden können. Dabei sind Abschälereffekte bei Kassetten und herumfliegende Kassettenteile, die weitere Kassetten beschädigen, zu berücksichtigen.

Der veränderte Einflussbereich des Bruchstrahls ist auch bei der Freisetzung anderer Stoffe, wie Farben und Beton, zu berücksichtigen.

Die Mobilisierung anderer Stoffe, wie z. B. Staub in der Druckkammer ist analog zum DWR zu quantifizieren. Beim SWR ist zusätzlich die Mobilisierung von Ablagerungen in der Kondensationskammer während der Druckabbauphase zu berücksichtigen. Die Mobilisierung aller Ablagerungen in der Kondensationskammer ist anzunehmen, wenn keine experimentellen Befunde vorliegen, die eine Verringerung der Mobilisierung rechtfertigen.

– Transport im Sicherheitsbehälter

Die Transportwege im Sicherheitsbehälter sind beim SWR ganz anders ausgerichtet als beim Druckwasserreaktor. Daher ist die RSK-Empfehlung für den Siedewasserreaktor nicht anwendbar. Beim Siedewasser gibt es einen Transportpfad von der Druckkammer zur Kondensationskammer und einen Transportpfad in der Druckkammer zum Steuerstabantriebsraum.

In zwei Versuchsanlagen, der Containerversuchsanlage in Karlshamn und der Fragmentierungsanlage in Zittau, wurden die Transportraten von der Druckkammer in die Kondensationskammer experimentell untersucht.

Bei beiden Versuchsanlagen liegen die Skalierungsfaktoren für das Druckkammer-volumen und den Bruchmassenstrom in einer ähnlichen Größenordnung. Es liegen aber Unterschiede in der Geometrie (Quaderförmig, zylinderförmig), dem Schutz des Isoliermaterial Targets (grobes Drahtnetz, Blech), Wasservorlage (keine, geringe) und Abblasezeit (lang, kurz) vor. Der gemessene Übertrag in die Kondensationskammer betrug in der Versuchsanlage Karlshamn bis zu 5,4 % und in der Fragmentierungsanlage Zittau bis zu 20 %. Beide Versuchsanlagen bilden eine re-

ale Druckkammer eines SWR nur eingeschränkt nach. Belastbare Erklärungen für den großen Unterschied bei der Transportrate zur Kondensationskammer liegen nicht vor. Aus diesem Grund wird der höhere Wert von 20 % für die Transportrate zur Kondensationskammer empfohlen.

Für den Transportpfad in der Druckkammer zum Steuerstabantriebsraum liegen Versuchsergebnisse aus der Versuchsanlage von Karlshamn vor. In der Versuchsanlage ist jedoch das skalierte Volumen des Steuerstabantriebsraumes um einen Faktor 2,5 zu klein und der Druckaufbau in der Druckkammer ist zu gering, da keine Wasservorlage in der Kondensationskammer simuliert wurde. Beides führte zu einer Unterschätzung der Dampfeinströmung in den Steuerstabführungsraum und somit auch zu einer Unterschätzung des Eintrags von Isoliermaterial. Zusätzlich wird das Abwaschen von abgelagertem Isoliermaterial in der Druckkammer durch herablaufendes Wasser aus dem Bruch/Leck und Kondensatablauf von Wänden und Böden, nicht berücksichtigt. Das Abwaschen von abgelagertem Isoliermaterial dürfte den dominierenden Beitrag zum Eintrag in den Steuerstabantriebsraum liefern. Die Betreiber postulieren einen abdeckenden Eintrag von 20 % des freigesetzten Isoliermaterials in den Steuerstabantriebsraum. Diese 20 % entsprechen einem Viertel des in der Druckkammer verbleibenden freigesetzten Isoliermaterials. Es ist davon auszugehen, dass das Wasser aus dem Bruch nicht mehr als ein Viertel der Druckkammer im Bereich des Bruches und darunter erreicht und durch Kondensatablauf nicht mehr als ein Viertel der darüber liegenden Ablagerungen von Isoliermaterial abwaschen wird. Damit ist plausibel begründet, dass der Eintrag von 20 % des freigesetzten Isoliermaterials in den Steuerstabantriebsraum abdeckend ist.

– Transport im Sumpfwasser:

Die von der RSK für den DWR empfohlenen Werte zum Transport im Sumpfwasser können wegen der unterschiedlichen Geometrie- und Strömungsverhältnisse nicht auf den Transport in der Kondensationskammer und im Steuerstabantriebsraum des SWRs übertragen werden. Die Empfehlungen der RSK zur experimentellen Bestimmung des Transports von Isoliermaterial und anderen Materialien zu den Rückhaltevorrichtungen der Not- und Nachkühlsysteme können auch für den SWR angewendet werden. Seit der Erstellung der RSK-Stellungnahme [/RSK04/](#) wurden die analytischen Methoden zur Berechnung des Transports von Isoliermaterial im Kühlmittel weiter entwickelt und validiert. Validierte Rechenmethoden dürfen bei der Quantifizierung des Transports von Isoliermaterial zu den Rückhaltevorrichtungen im Kühlmittel herangezogen werden, wenn

- alle zu- und abströmenden Massenströme und Impulse (einschließlich Luftmitriß) berücksichtigt werden,
- das Transportverhalten von Isoliermaterialteilchen auf experimentellen Grundlagen beruht,
- Sekundärfragmentierung und Ausbildung von Agglomeraten berücksichtigt wird,
- die Auflösung des Netzwerkes ausreicht, um die Strömungsverteilung am Boden zu berechnen,
- abgesicherte Modelle zur stabilen Sedimentation und Resuspension vorliegen und
- ein breites Spektrum von Größen von Isoliermaterial-Faser und -Agglomeraten berücksichtigt wird.

Die Randbedingungen der Analysen sind konservativ vorzugeben. Bei der Bestimmung des Transports von Isoliermaterial in der Kondensationskammer ist zu unterstellen, dass während der Druckabbauphase (Einströmen von Dampf über die Abblaserohre) und dem Abblasen von Dampf über die S+E-Ventile (Düsenkreuze) keine Sedimentation auftritt. Zusätzlich ist während dem Abblasen von Dampf über die Düsenkreuze von einer Resuspension des am Boden abgelagerten Isoliermaterial auszugehen. Wenn zum Ausmaß der Resuspension keine experimentellen Unterlagen vorliegen, ist von einer vollständigen Resuspension auszugehen.

– Druckverlust an Sumpfsieben:

Es liegen experimentelle Ergebnisse zu den Druckverlusten über Ablagerungen an den Rückhaltevorrückungen der Not- und Nachkühlssysteme beim SWR vor. Es wurden die Druckverluste an Siebkörben untersucht. Die Druckverluste wurden experimentell in der Versuchsanlage der Firma Prien untersucht. Die Versuchsanlage simuliert die Kondensationskammer mit einem nur in der Höhe skalierten Tank. Ein Vergleich der normierten Druckverluste an Rückhaltevorrückungen beim SWR mit den ermittelten Druckverlusten der Wannerversuche beim DWR zeigt Druckverluste an der unteren Grenze bzw. etwas unter denen der Wannerversuche. Die Versuchsergebnisse der Versuchsanlage der Firma Prien können daher direkt für die Nachweisführung übernommen werden. Es wird aber zusätzlich empfohlen, einen kleinen Sicherheitszuschlag einzuführen. Es wird empfohlen, dass zur Bestimmung der Druckverluste an den Rückhaltevorrückungen eine Ablagerung des gesamten

Isoliermaterials, das nicht in der Kondensationskammer bzw. im Steuerstabantriebsraum sedimentiert ist, berücksichtigt wird. Dies wird damit begründet, dass bei den Versuchen mit Siebkörben und großer Eintragsmenge die gemessene Penetration nahezu bei 0 % lag.

- Penetration von Isoliermaterial durch das Sieb:
Experimentelle Befunde zeigen für Siebkörbe eine Penetration zwischen nahezu 0 % und nahezu 100 % (Kap. 3.5.5) abhängig von den gewählten Randbedingungen (Konzentration von Isoliermaterial im Kühlmittel, Siebgröße, Fragmentierungsart). Die experimentellen Ergebnisse rechtfertigen keine Begrenzung der Penetration und somit des Kerneintrags. Es wird daher für die Nachweisführung empfohlen, dass für den Nachweis einer ausreichenden Kernkühlung das gesamte Isoliermaterial, das nicht in der Kondensationskammer bzw. Steuerstabantriebsraum sedimentiert, durch die Siebkörbe penetriert und in den Kern eingetragen wird.
- Pumpenvordruck: Keine SWR-spezifischen Empfehlungen
- Druckverlust im Kern durch Eintrag von Isoliermaterial:
Die RSK-Anforderungen zur Kühlbarkeit des Kerns können auch für den SWR angewendet werden. Beim SWR ist der Kern allerdings bereits ausreichend gekühlt, wenn der aktive Teil der Brennelemente mit Zweiphasengemisch bedeckt ist. Dampf darf aus dem Leck bzw. über die S+E-Ventile in die Druckkammer/Kondensationskammer austreten. Integralversuche zur Bestimmung der Ablagerungsmengen im Kern liegen für Siedewasserreaktoren nicht vor. Daher ist zu postulieren, dass sich das gesamte Isoliermaterial und auch andere Stoffe, die in das Not- und Nachkühlsysteme penetrieren, sich an Abstandshaltern ablagern. In Ringleitungsversuchen beim IPM wurden Druckverluste über Ablagerungen an Abstandshaltern von SVEA und Atrium Brennelementen ermittelt. Es wird empfohlen, den höchsten bei den IPM Versuchen ermittelten normierten Druckverlust als Basis für die Ermittlung von Druckverlusten über Ablagerungen an Abstandshaltern zu verwenden. Die Auswertung aller verfügbaren Versuche zur Ermittlung von Druckverlusten beim DWR (Sumpfsiebe, Brennelemente) hat ergeben, dass die normierten Druckverluste aus integralen Versuchsanlagen mit Nachbildung des Sumpfes (Wanne) wesentlich höher sind, als die, welche in Ringleitungsversuchen ermittelt werden. Die normierten Druckverluste an einem Brennelement in einer integralen Versuchsanlage sind etwa einen Faktor 3 bis 5 größer als in einer Ringleitungsversuchsanlage. Es wird daher empfohlen, den normierten Druckverlust des oben beschriebenen IPM Versuchs um den Faktor 3 bis 5 zu erhöhen.

SWR-Anlagen sind mit Brennelementen verschiedener Hersteller ausgestattet. SVEA Brennelemente weisen nur etwa halb so große normierte Druckverluste wie Atrium Brennelemente auf. Dies führt zu einer Umverteilung der Durchströmung von SWR-Brennelementen und zu einer Verschlechterung der Kühlung von Atrium Brennelementen. Inwieweit die unterschiedliche Kerndurchströmung durch eine verstärkte Ablagerung von Isoliermaterial an SVEA ausgeglichen wird, ist analytisch bzw. experimentell zu klären.

Zusätzlich ist die mögliche Verstopfung der inneren Brennelementbypässe (Wasserkasten) und des äußeren Brennelementbypasses (Bohrung im Brennelementfuß) bei der Nachweisführung zur ausreichenden Kernkühlung zu berücksichtigen.

- Komponenten im Nachkühlkreislauf:

Keine SWR spezifischen Empfehlungen: International werden der Einfluss von Temperaturänderungen an Kühlern und Brennelementen in Bezug auf Ausfällung gelöster Stoffe und Ablagerung dieser Stoffe an Kühlrohren und Brennstäben intensiv untersucht (siehe VIKTORIA LOOP, Kap. 3.2). Verstopfung dieser Komponenten aufgrund von Ablagerungen wird nicht ausgeschlossen. Die internationalen Untersuchungen sollen verfolgt werden und aus den Erkenntnissen daraus ggf. Empfehlungen für die deutschen SWR und DWR abgeleitet werden.

- Langzeitverhalten:

Das Langzeitverhalten kann vom DWR nicht auf den SWR übertragen werden, da die Wasserchemie bei SWR (reines Deionat) anders als beim DWR (Bor, LiOH) ist. Erosionseffekte und die Löslichkeit von Materialien in Wasser haben jedoch auch beim SWR einen Einfluss auf die Druckverluste über Isoliermaterialablagerungen. Die Langzeiteffekte wurden untersucht. Die Langzeitversuche zu Ablagerungen an Abstandshaltern von Brennelementen zeigen einen erheblichen Einfluss von Korrosionsprodukten, wenn ein Trittrost oberhalb des Wasserspiegels von herabfallendem Wasser getroffen wird. Die stärkste Erhöhung der normierten Druckverluste wurde bei einem Vattenfall-Versuch an den Isoliermaterialablagerungen an einem Abstandshalter eines Atrium-Brennelements gemessen. Die Erhöhung der Druckverluste beträgt einen Faktor von etwa 20. Es wird empfohlen, bei der Nachweisführung diesen Erhöhungsfaktor zu berücksichtigen. Bei der Nachweisführung zur Kernkühlung mit Korrosion ist zu berücksichtigen, dass der Anstieg der Druckverluste frühestens nach 7 Tagen erfolgt und erst nach etwa 2 Wochen voll ausgeprägt ist. In der ersten Woche sind Verdichtungseffekte zu berücksichtigen, die allerdings nur zu einer Erhöhung der Druckverluste um einen Faktor von nicht mehr als 2,5 führen.

- Sauberkeit der Anlage:
Es gibt keine SWR spezifischen zusätzlichen Anforderungen. Es ist allerdings darauf hinzuweisen, dass die Anforderungen an die Sauberkeit sowohl für die Druckkammer einschließlich Steuerstabantriebsraum als auch für die Kondensationskammer gelten.

- Anlageninternen Notfallmaßnahmen:
Maßnahmen zur Begrenzung/Reduzierung von Druckverlusten an Rückhaltevorrichtungen sind für den SWR verfügbar, wie Reduktion des Notkühldurchsatzes, Pumpenabschaltung, Betrieb mit Nulldurchsatz und Management der Notkühlsysteme. Bei Siebkörben ist ein vollständiger Abfall von der Isoliermaterialablagerung bei Pumpenabschaltung nicht zu erwarten. Das teilweise Abfallen und Wiederanlagern von Isoliermaterial beim Pumpenabschalten führt jedoch zu einer Reduktion/Begrenzung der Druckverluste bei gleichem Durchsatz. Diese in ihrer Funktion nachgewiesene Maßnahme ist jedoch nur als Notfallmaßnahme zu bewerten.
Die Versuche an der Versuchsanlage der Firma Prien haben gezeigt, dass eine vollständige Belegung von Siebkörben möglich ist. Abhängig von der Berechnungsmethode der Transportraten im Sicherheitsbehälter und in den Wasservorlagern der Kondensationskammer und im Steuerstabantriebsraum können auslegungsüberschreitende Druckverluste insbesondere an Siebkörben nicht ausgeschlossen werden. Es ist zu bewerten, ob in der Anfangsphase (1 Tag), eine Überschreitung der Auslegungsgrenzen der Rückhaltevorrichtungen erfolgen kann. Langfristig (nach 1 Woche) ist bei einer vollständigen Belegung der Rückhaltevorrichtung durch Einlagerung von Korrosionsprodukten eine starke Erhöhung der Druckverluste zu erwarten. Dann ist eine Maßnahme zur Begrenzung der Druckverluste erforderlich. Es bleibt zu prüfen, ob im Langzeitbereich (länger als eine Woche) eine Notfallmaßnahme zur Beherrschung ausreichend ist. Wenn jedoch ein auslegungsüberschreitender Zustand bereits am 1. Tag nicht ausgeschlossen werden kann, wird die Einführung einer Maßnahme zur Begrenzung/Reduktion der Druckverluste entsprechend der RSK-Stellungnahme der 406. Sitzung vom 13.03.2008 /[RSK08](#)/ empfohlen.

4 Zusammenfassung

Im Rahmen des Projekts „Sicherstellung der Kernnotkühlung bei Kühlmittelverluststürfällen mit Freisetzung von Isoliermaterial“ wurden der nationale und internationale Stand von Wissenschaft und Technik ausgewertet und analytische Methoden zum Nachweis der gesicherten Kernkühlung weiterentwickelt.

International wird der Einfluss chemischer Effekte auf das Ablagerungsverhalten und die Druckverluste über Ablagerungen untersucht. Von besonderer Bedeutung sind die „Downstream Effekte“ an Wärmetauschern und Brennelementen. Es gibt Hinweise, dass Ausfällreaktionen bei Abkühlung bzw. Aufheizen von Kühlmittel zu zusätzlichen Ablagerungen führen und die Druckverluste erhöhen. Im Dezember 2011 wurde von VUEZ und IRSN in der Slowakei die neue Versuchsanlage „VIKTORIA“ in Betrieb genommen, die diese Effekte untersuchen soll.

Die Auswertung der Battelle-KAEFER-Versuche zur Freisetzung von Isoliermaterial ergab, dass in der Summe die Freisetzungsmenge durch das RSK-NRC-Kegelmodell [/RSK04/](#) abgedeckt ist. Der Freisetzungsort stimmt nicht mit dem Freisetzungsbereich des Kegelmodells überein. Die Versuche zeigten, dass durch Abschäl-effekte und herumfliegende Kassettenteile größere Freisetzungen auch außerhalb der Zone 2 des RSK-NRC-Kegelmodells auftreten können.

Ein Vergleich der verfügbaren Versuchsergebnisse zu den Druckverlusten über Isoliermaterialablagerungen hat gezeigt, dass die normierten Druckverluste stark vom Typ der Versuchsanlage abhängen. Die normierten Druckverluste an Sieben bei Wannenversuchen waren ungefähr einen Faktor 3 größer als bei Ringleitungsversuchen. Integrale Versuchsanlagen haben gezeigt, dass an einer nachgelagerten Ablagerungsstelle wie z. B. Abstandshalter im Brennelement oder der Feinstfilter (Messung von Penetration) die normierten Druckverluste wesentlich größer sind als an den Sumpfsieben selbst. Eine Verringerung der Konzentration von Isoliermaterial im Sumpfwasser führt ebenfalls zu einer Erhöhung der normierten Druckverluste. Die Abhängigkeit der gemessenen Druckverluste vom Typ der Versuchsanlage und den Versuchsrandbedingungen muss bei der Übertragung auf die Realanlage berücksichtigt werden.

Die Anforderungen der RSK-Stellungnahmen von 2004 [/RSK04/](#) und 2008 [/RSK08/](#) an die Nachweisführung zur gesicherten Kernkühlung bei Kühlmittelverluststörfällen für den DWR sind weitgehend auf den SWR übertragbar. Anpassungen und Ergänzungen sind bei folgenden Arbeitsschritten erforderlich:

- Freisetzung (veränderter Einflussbereich durch Dampfausströmung und geringere Strahlaufweitung),
- Transport im Sicherheitsbehälter (keine Übernahme des 50 % Postulats, zusätzlicher Strömungsweg zur Kondensationskammer),
- Transport im Sumpfwasser (zusätzlicher Transport in der Kondensationskammer, Sedimentation und Resuspension während der Druckabbauphase und dem Abblasen über S+E-Ventile),
- Druckverlust an Sumpfsieben (Druckverluste an Kondensationskammersieben, Ablagerungsverhalten in der Druckabbauphase),
- Penetration von Isoliermaterial durch das Sieb (Penetration durch Kondensationskammersiebe, Penetration während Druckabbauphase),
- Druckverlust im Kern durch Eintrag von Isoliermaterial (Dampfausströmung aus dem Kern und Leck erlaubt, Verstopfung von Bypässen berücksichtigen),
- Langzeitverhalten (Bor ist nicht zu berücksichtigen) und
- Sauberkeit (mobilisierbare Materialien in der Kondensationskammer berücksichtigen).

Die Auswertung der Karlshamn und Zittauer Versuche zum Isoliermaterialeintrag in die Kondensationskammer ergab, dass der Isoliermaterialeintrag auf 20 % des freigesetzten Isoliermaterials begrenzt werden kann. Der von den Betreibern postulierte Transport zum Steuerstabantriebsraum von 20 % des freigesetzten Isoliermaterials wird von der GRS als plausibel angesehen. Zum Transport von Isoliermaterial in der Kondensationskammer und im Steuerstabantriebsraum liegen keine experimentellen Daten vor. Die Annahmen zum Transport mit dem Programm TISA wurden von der GRS als nicht belastbar angesehen, da nicht alle Strömungseinträge und -impulse ausreichend berücksichtigt wurden, das Sedimentations- und Resuspensionsverhalten unzureichend simuliert wurde und keine Validierung des Programms für faserförmiges Isoliermaterial vorlag. Für die Druckverluste an den Siebkörben beim SWR liegen experimentelle Versuchsergebnisse an einer Versuchsanlage der Firma Prien vor. Die Versuchsergebnis-

se sind belastbar und können zur Nachweisführung herangezogen werden. Die gemessenen Penetrationsraten durch die Siebkörbe betragen 0 % bis 100 % abhängig von den Versuchsrandbedingungen. Die größeren Werte sind relevant für „Downstream“ Effekte, wie die Ablagerungen im Kern. Für die Druckverluste über Ablagerungen auf Abstandshalter von SVEA und Atrium Brennelementen liegen experimentelle Messergebnisse vor. Alle Messergebnisse wurden in Ringleitungsversuchsanlagen erzielt, die im Vergleich zu Messergebnissen aus Integralversuchsanlagen zu geringe, normierte Druckverluste liefern. Die bei den Ringleitungsversuchen erzielten Druckverluste sollten über einen Sicherheitszuschlag den Werten von Integralversuchsanlagen angepasst werden. Der Einfluss von Korrosion von verzinkten Trittrosten auf die Druckverluste über Isoliermaterial an Abstandshaltern wurde von Vattenfall experimentell untersucht. Es wurde nach zwei Wochen eine Erhöhung der Druckverluste um einen Faktor von etwa 20 gemessen. Zur Auswirkung der Korrosion auf Ablagerungen an SWR Rückhaltevorrichtungen liegen keine belastbaren Versuchsergebnisse vor. Untersuchungen zur Begrenzung von Druckverlusten an Isoliermaterialablagerungen liegen für Siebkörbe vor. Das Abschalten der Not- und Nachkühlpumpen führte immer zu einer Reduktion oder zumindest Begrenzung der Druckverluste.

Zur Kernkühlung mit Isoliermaterialablagerungen an Abstandshalter wurden 8 Analysen mit Analysesimulator für das KKW Philippsburg 1 durchgeführt. Dabei wurde die Ablagerungsmenge ($2,1 \text{ kg/m}^2$ bis 31 kg/m^2), die Verfügbarkeit des äußeren Brennelementbypass und die Anzahl der verfügbaren Notkühlsysteme (alle, nur 3 TH Systeme) variiert. Die Analysen haben gezeigt, dass sowohl sehr hohe Ablagerungen bis zu 31 kg/m^2 (mehr als der 10-fache Wert einer konservativ abgeschätzten Ablagerungsmenge von $2,1 \text{ kg/m}^2$) als auch die Einlagerung von Korrosionsprodukten die Kernkühlung nicht gefährden.

Zur Nachweisführung einer gesicherten Kernkühlung bei Kühlmittelverluststörfällen mit Freisetzung von Isoliermaterial, wurden Empfehlungen für den SWR abgeleitet. Die Empfehlungen beziehen sich auf die Freisetzung von Isoliermaterial, den Transport im Sicherheitsbehälter, den Transport in der Wasservorlage des Steuerstabantriebsraums und der Kondensationskammer, den Druckverlusten und der Penetration an den Rückhaltevorrichtung, den Druckverlust im Kern, das Langzeitverhalten, die Sauberkeit im Sicherheitsbehälter und auf anlageninterne Notfallmaßnahmen.

Literatur

- /KAE95/ Wenzel, H., Geiß, M. Ruppert, B., Blow-down Investigations on the Performance of Insulating Systems, KAEFER Isoliertechnik GmbH & Co. KG, B.I.G. V-32.608, August 1995
- /KT05/ E. Krepper et al., CFD analyses of fiber transport and fiber deposition at plunging jet conditions, Kerntechnik 76/1, 2011
- /KT06/ T. Höhne et al., CFD simulation of fiber material transport in a PWR core under loss of coolant conditions, Kerntechnik 76/1, 2011
- /KT07/ H. Kryk et al. Influence of corrosion processes on the head loss across ECCS sump strainers, Kerntechnik 76/1, 2011
- /NRC03/ U.S. NRC, Regulatory Guide 1.82 "Water Sources for Long-term recirculation Cooling following a Loss-of-coolant accident", Revision 3, November 2003
- /NRC10/ Letter to the PWROG, Nuclear Regulatory Commission Conclusions regarding Pressurized Water Reactor Owners Group Response to request for additional Information dated January 25, 2010 regarding Licensee Debris Generation Assumptions for GSI-191, J. Rowley, NRC, 31.03.2010, <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1005/ML100570364.pdf>
- /OECD95/ State-of-the-Art-Report NEA/CSNI/R(95)11, Knowledge Base for Emergency Core Cooling System Recirculation Reliability, OECD/NEA, Februar 1996, <http://www.oecd-nea.org/nsd/docs/1995/csni-r1995-11.pdf>
- /RSK98/ Stellungnahme, Wirksamkeit der Notkühlsysteme bei Freisetzung von Isoliermaterial bei KMV-Störfällen, Anlage 3 zum Ergebnisprotokoll der 320. Sitzung der RSK, RSK, 16.09.1998

- /RSK04/ Stellungnahme, Anforderungen an den Nachweis der Notkühlwirksamkeit bei Kühlmittelverluststörfällen mit Freisetzung von Isoliermaterial und anderen Stoffen, Anlage 2 zum Ergebnisprotokoll der 374. Sitzung der RSK, RSK, 22.07.2004, <http://www.rskonline.de/downloads/stnsumpf.pdf>
- /RSK08/ Stellungnahme, Kühlmittelverluststörfälle mit Freisetzung von Isoliermaterial und anderen Stoffen in Druckwasserreaktoren – Ablösung der Ablagerungen auf den Sumpfsieben, Anlage 2 zum Ergebnisprotokoll der 406. Sitzung der RSK, RSK, 13.03.2008, <http://www.rskonline.de/downloads/sumpfsiebe.pdf>
- /SCY0113/ Policy Issue SECY-10-0113, Closure options for generic Safety Issue – 191, Assessment of Debris Accumulation on Pressurized Water Reactor Sump Performance, NRC, 26.08.2010, <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/commission/secys/2010/secy2010-0113/2010-0113scy.pdf>

Technische Notizen

Anlagen 1 bis 3

Anlage 1

Technische Notiz

Freisetzungsversuche von
Batelle-KAEFER

W. Pointner

Mai 2011

Auftrags-Nr.: 800027

GRS-A-3643, Anlage 1

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung..... | 1 |
| 2 | Versuchsanlage..... | 1 |
| 3 | Versuchsdurchführung | 5 |
| 4 | Versuchsergebnisse | 6 |
| 5 | Bewertungsgrundlage | 15 |
| 6 | Bewertung..... | 16 |
| 7 | Bisherige Bewertung der Battelle-KAEFER Versuche in RSK- Protokollen | 17 |
| 8 | Zusammenfassung | 18 |
| 9 | Literatur..... | 19 |

1 Einleitung

Die Firma Battelle Ingenieurtechnik GmbH hat Versuche mit 6 Isoliersystemen der Firma KAEFER Isoliertechnik GmbH durchgeführt [/KAE95/](#), um den Umfang der Zerstörung von Isoliermaterial bei Kühlmittelverluststörfällen zu untersuchen. Die Versuche wurden mit Matratzenisolierung und Kassettenisolierung durchgeführt. Es wurden vier Isoliermaterialtypen untersucht: RTD2 (Mineralwolle), Glasfaser, WDS-Granulat und RMI. Die Versuchsergebnisse wurden mit entsprechend dem aus dem NRC-Kegelmodell [/NRC85/](#) berechneten Freisetzungsmengen verglichen.

2 Versuchsanlage

Die Versuchsanlage besteht aus einem Druckbehälter (5,7 m³), einer Rohrleitung (23 m) und einer Ausströmdüse mit einem Durchmesser von 143 mm. Die Leckfläche beträgt somit etwa 3,6 % der Querschnittsfläche einer Hauptkühlmittleitung eines deutschen Druckwasserreaktors.

Abb. 2-1 und Abb. 2-2 zeigen schematisch die Versuchsanordnung. Das Isoliermaterial wurde in Form von Matratzen oder in Kassetten gekapselt an den Rohrleitungen oder am Boden der Versuchsanlage befestigt. Eingesetzt wurden Standardkassetten vom Typ 304 der Firma KAEFER.

Die Isolierung war so angeordnet, dass bezüglich des Leckstrahls unterschiedliche Einflusszonen entsprechend dem NRC-Kegelmodell untersucht werden konnten. Das NRC-Kegelmodell definiert drei Einflusszonen, in denen ein unterschiedlicher Zerstörungsgrad der Isolierung angenommen wird. Die Einflusszonen werden über das Verhältnis „Abstand von der Leckstelle/hydraulischer Durchmesser der Bruchfläche“ (L/D) definiert. Bei $L/D < 3$ wird eine völlige Zerstörung des Isoliermaterials angenommen. Bei $3 < L/D < 7$ wird bei Kassettenisolierung eine eingeschränkte Zerstörung und bei Matratzenisolierung eine vollständige Zerstörung angenommen. Bei $L/D > 7$ wird bei Matratzenisolierung und bei Kassetten keine Zerstörung angenommen.

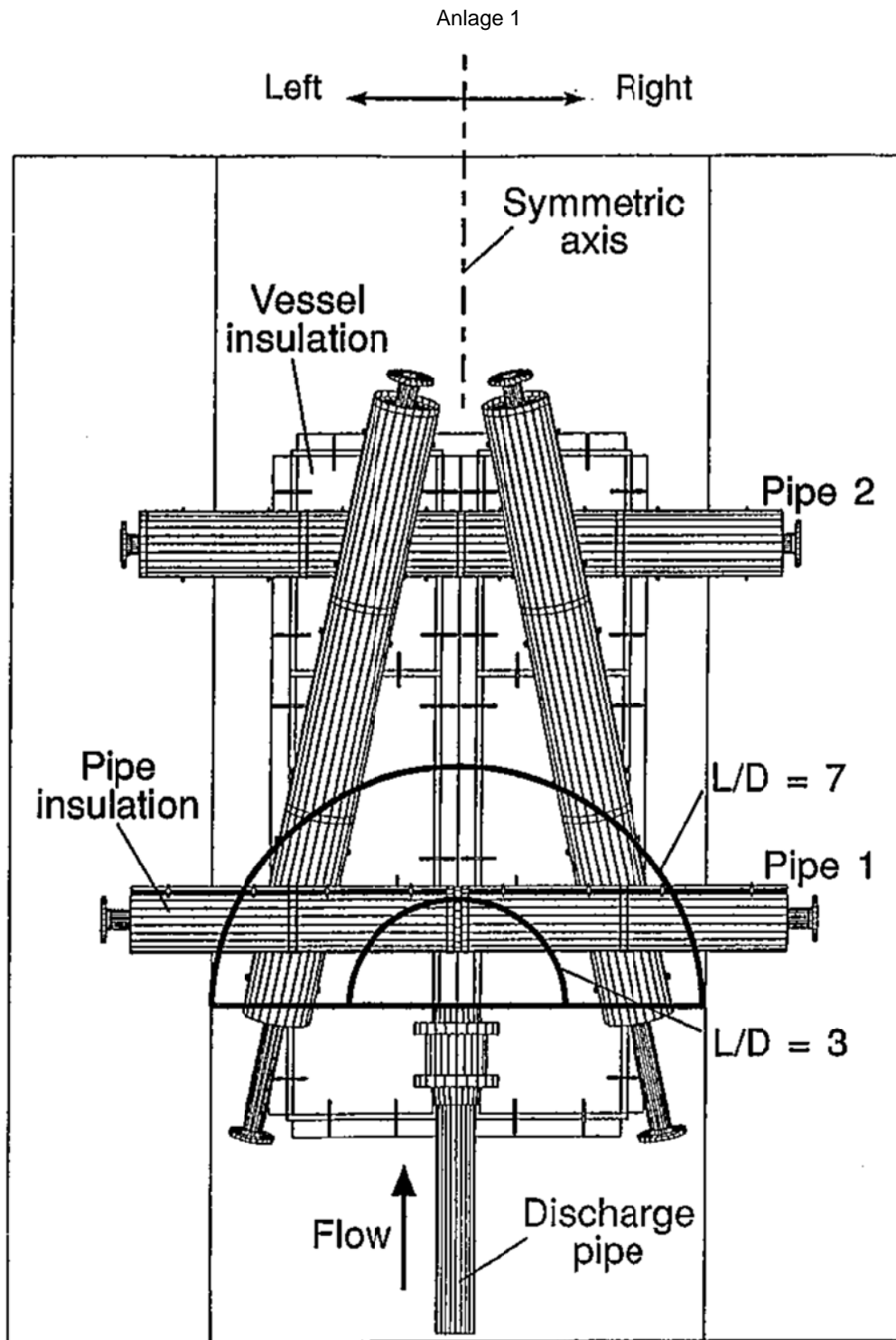


Abb. 2-1 Versuchsanordnung, Draufsicht mit Zonen entsprechend NRC-Kugelmodell /[KAE95/](#)

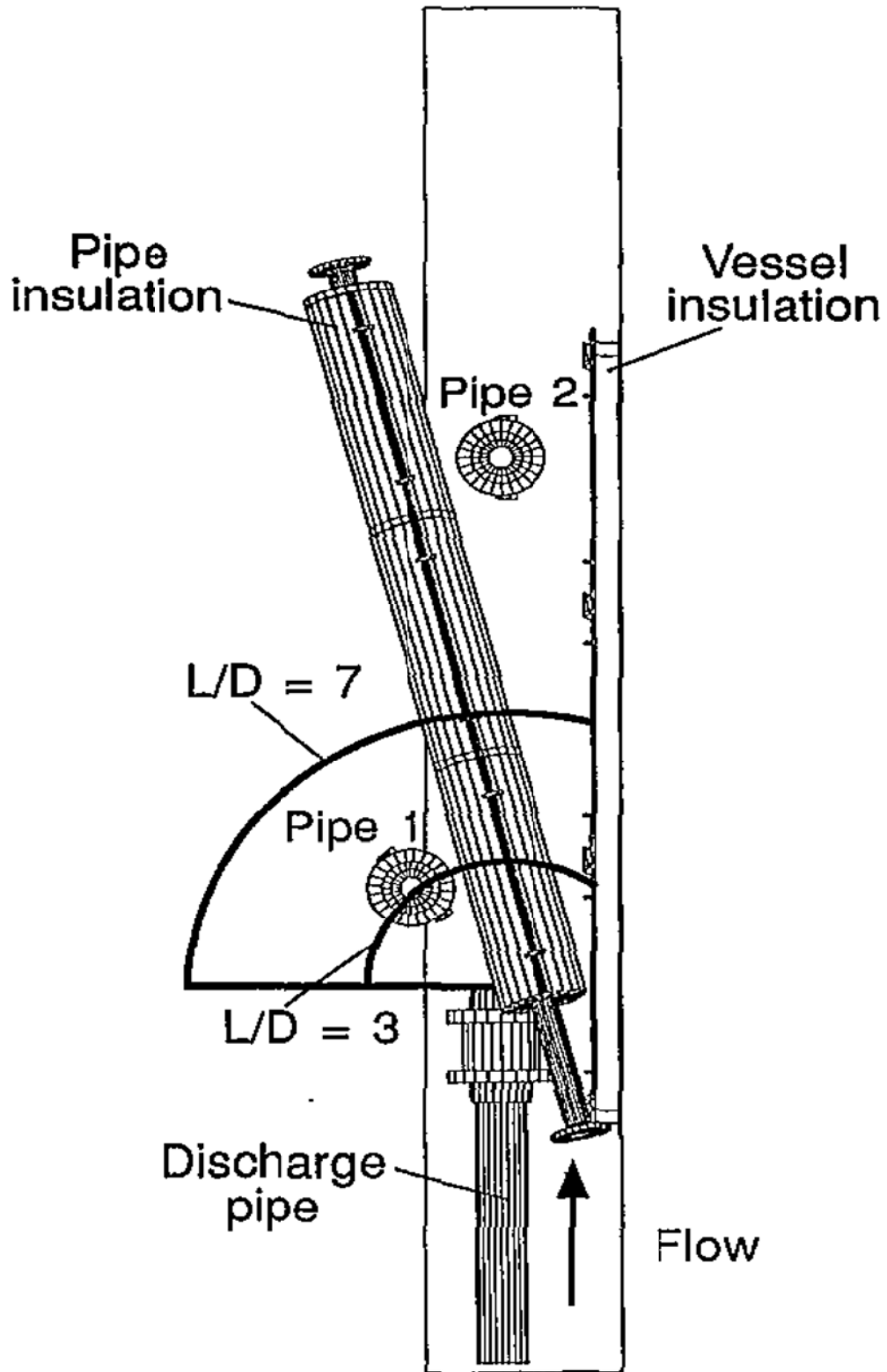


Abb. 2-2 Versuchsanordnung Seitenansicht /[KAE95](#)/

Anlage 1

Die untersuchten Isoliermaterialpakete wurden auf vier Rohren und am Boden der Versuchsanlage montiert (Abb. 2-1 und Abb. 2-2). Zwei Rohre befanden sich horizontal vor der Ausströmdüse in den Einflusszonen $L/D < 3$ (Rohr 1) und $L/D > 7$ (Rohr 2). Rohr 1 befand sich leicht oberhalb der Düse (Abb. 2-2), um die Ausbreitung des Leckstrahls nicht zu behindern. Das Rohr 2 lag direkt auf der Achse des Leckstrahls, um dort eine maximale Belastung durch den Leckstrahl zu ermöglichen. Die beiden seitlich verlaufenden Rohre wurden mit einer leichten Steigung im Vergleich zum Leckstrahl angeordnet, reichten aber nicht in die Achse der Rohrleitung der Ausströmdüse (discharge line) hinein. Die Isolierung an den Rohren deckt alle Einflusszonen des NRC-Kegelmodells ab.

Die Behälterisolierung am Boden der Versuchsanlage war längs zum Leckstrahl angeordnet. Diese lag in allen Einflusszonen des NRC-Kegelmodells.

3 Versuchsdurchführung

In der Versuchsanlage wurden insgesamt 4 Versuche (Tab. 4-1) durchgeführt. Im Versuch K1 betrug der Druck vor Versuchsbeginn etwa 95 bar, in den Versuchen K2 bis K4, 140 bar. Die Temperatur des Wassers betrug bei den Versuchen zwischen 293 °C und 300 °C. Nach dem Brechen der Berstscheiben stellte sich an der Ausströmdüse (= Lecköffnung) ein Druck von 54 bar an der Berstscheibe ein. Analytisch wurde berechnet, dass sich bei einem Leck an einer Hauptkühlmittelleitung an der Bruchstelle ein Druck von 81 bar einstellen würde. In einem realen Druckwasserreaktor beträgt der Druck etwa 155 bar, im Siedewasser etwa 70 bar. Somit liegt der Druck an der Ausströmdüse in der Versuchsanlage zwischen den Drücken, die an einer Leckstelle in einem Druckwasser- bzw. Siedewasserreaktor zu erwarten sind.

Die geplanten Versuchsrandbedingungen (Druck 140 bar, Bruchfläche 100 %) konnten nur bei den Versuchen K3 und K4 eingehalten werden. Bei den Versuchen K1 und K2 öffneten sich die Berstscheiben nur etwa zur Hälfte. Beim Versuch K1 öffnete sich die Berstscheibe bereits bei 95 bar. Aufgrund der geringeren Öffnungsfläche ist der hydraulische Durchmesser kleiner und somit die Einflusszonen für den erwarteten Umfang der Zerstörung von Isoliermaterial ebenfalls kleiner. Bei einer halb so großen Bruchfläche ist entsprechend dem NRC-Kegelmodell ein um 30 % verringerter Einflussbereich zu erwarten.

4 Versuchsergebnisse

In Tab. 4-1 sind die Freisetzungsmengen der 4 Versuche zusammengefasst, bei denen in Kassetten eingekapseltes Material untersucht wurde. Die Ergebnisse zu Matratzenisolierungen werden nicht diskutiert, da diese Form der Isolierung in deutschen KKWs nicht eingesetzt wird.

Bei den 4 Versuchen (Tab. 4-1) wurden auf den linken und rechten Rohren immer zwei verschiedene Isolationstypen eingesetzt. Dies ist möglich, da beide Seiten symmetrisch sind. Bei den ersten beiden Versuchen K1 und K2 wurden auf der rechten Seite Matratzenisolierungen angebracht und auf der linken Seite Kassettenisolierungen. Bei den Versuchen K3 und K4 wurden auf beiden Seiten Kassettenisolierungen mit unterschiedlicher Füllung angebracht.

Tab. 4-1 Freisetzung aus Kassetten Typ 304

| Test | Isoliermaterial | Druck [bar] | Leckfläche [%] | Freisetzungsmenge | |
|---------------|----------------------|----------------|-------------------|---------------------|-----------------------|
| | | | | NRC- Kegelmodell | Versuch ⁵⁾ |
| K1, links | CIS-RI ¹⁾ | 95,6 | ≈ 50 % | 30 % | 69 % |
| K2, links | CIS-MW ²⁾ | 139,1 | ≈ 50 % | 30 % | 2 % |
| K3, links | CIS-FG ³⁾ | 139,6 | 100 % | 60 % | 280 % |
| K3, rechts | CIS-SI ⁴⁾ | 139,6 | 100 % | 60 % | 107 % |
| K4, links | CIS-MW ²⁾ | 139,2 | 100 % | 60 % | 77,5 % |
| K4, rechts | CIS-RI ¹⁾ | 139,2 | 100 % | 60 % | 326 % |

¹⁾ Reflective Metal Insulation (RMI)

²⁾ Mineralwolle, Rockwool (RTD2)

³⁾ Glasfaser (Knauf)

⁴⁾ WDS-Granulat (Wacker)

⁵⁾ bezogen auf den Inhalt von zwei Kassettenhälften am Rohr 1

Der Zerstörungsgrad der Isoliermaterialkassetten bei den Versuchen K3 und K4 ist in Abb. 4-1 bzw. Abb. 4-2 veranschaulicht. In Abb. 4-3 sind die Freisetzungszonen farblich gekennzeichnet. Die Freisetzungszone 1 ($L/D < 3$) ist rot, die Freisetzungszone 2 ($3 \leq L/D < 7$) ist blau und die Freisetzungszone 3 ($L/D \geq 7$) ist grün gekennzeichnet. Die gemessenen prozentualen Freisetzungsmengen der Versuche K3 und K4 sind in Abb. 4-4 dargestellt.

Abb. 4-4 zeigt, dass für verschiedene in Kassetten gekapselte Isoliermaterialien unterschiedliche Freisetzungsmengen und -orte ermittelt wurden. Nur bei Kassetten mit Mineralwolle (RTD2) erfolgte eine Freisetzung in der nach dem NRC-Kegelmodell zu erwartenden Zone 1 ($L/D < 3$). Bei Kassetten mit Glasfaser, WDS-Granulat und RMI erfolgte eine Freisetzung auch in den Zonen 2 und 3 ($L/D > 3$), wobei die größten Freisetzungsmengen in Zone 3 ($L/D > 7$) erfolgten.

Die großen Freisetzungsmengen in den Zonen 2 und 3 können auf „Abschälereffekte“ an der Behälterisolierung und den geneigten Rohrleitungen und auf „Sekundäreffekte“ an Rohr 2 zurückgeführt werden. „Abschälereffekte“ können auftreten, wenn eine Isoliermaterialkassette so beschädigt wird, dass an der nächsten Kassette die Stirnseiten vom Bruchstrahl getroffen und zerstört werden. „Sekundäreffekte“ sind Beschädigungen von Kassetten aufgrund von abgerissenen und herumfliegenden Kassettenteilen und Isoliermaterialien.

Die Freisetzungsmengen sind vom Zerstörungsgrad der Kassetten abhängig. Die Kassetten werden durch das Aufreißen der Schweißnähte derart beschädigt, dass Isoliermaterial freigesetzt wird. Im Versuchsbericht wird ausgesagt, dass das Aufreißen der Schweißnähte an den Kassetten von der Stabilität des eingeschlossenen Isoliermaterials bestimmt wird. Diese Aussage wird allerdings im Versuchsbericht nicht weiter diskutiert. Es gibt keine Wiederholungsversuche, die aufzeigen, dass sich ein vergleichbares Verhalten der Kassetten reproduzieren lässt. Somit beruht die Aussage auf einer empirischen Erkenntnis, die nur auf einem Versuch für einen Isoliermaterialtyp beruht.



Abb. 4-1 Zerstellungsgrad der Kassettenisolierung bei Versuch K3 /[KAE95/](#)

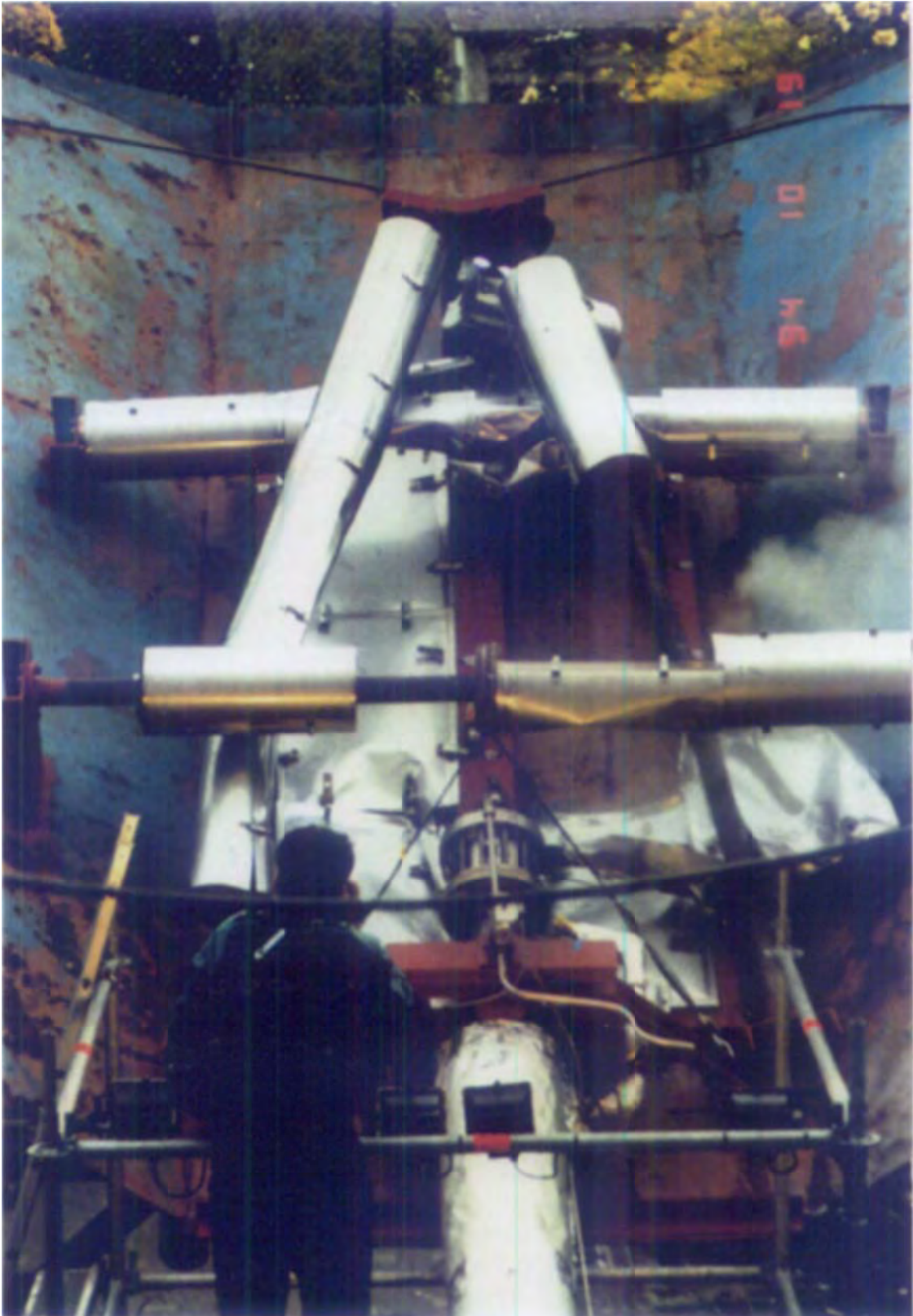


Abb. 4-2 Zerstörungsgrad der Kassettenisolierung bei Versuch K4 /[KAE95/](#)

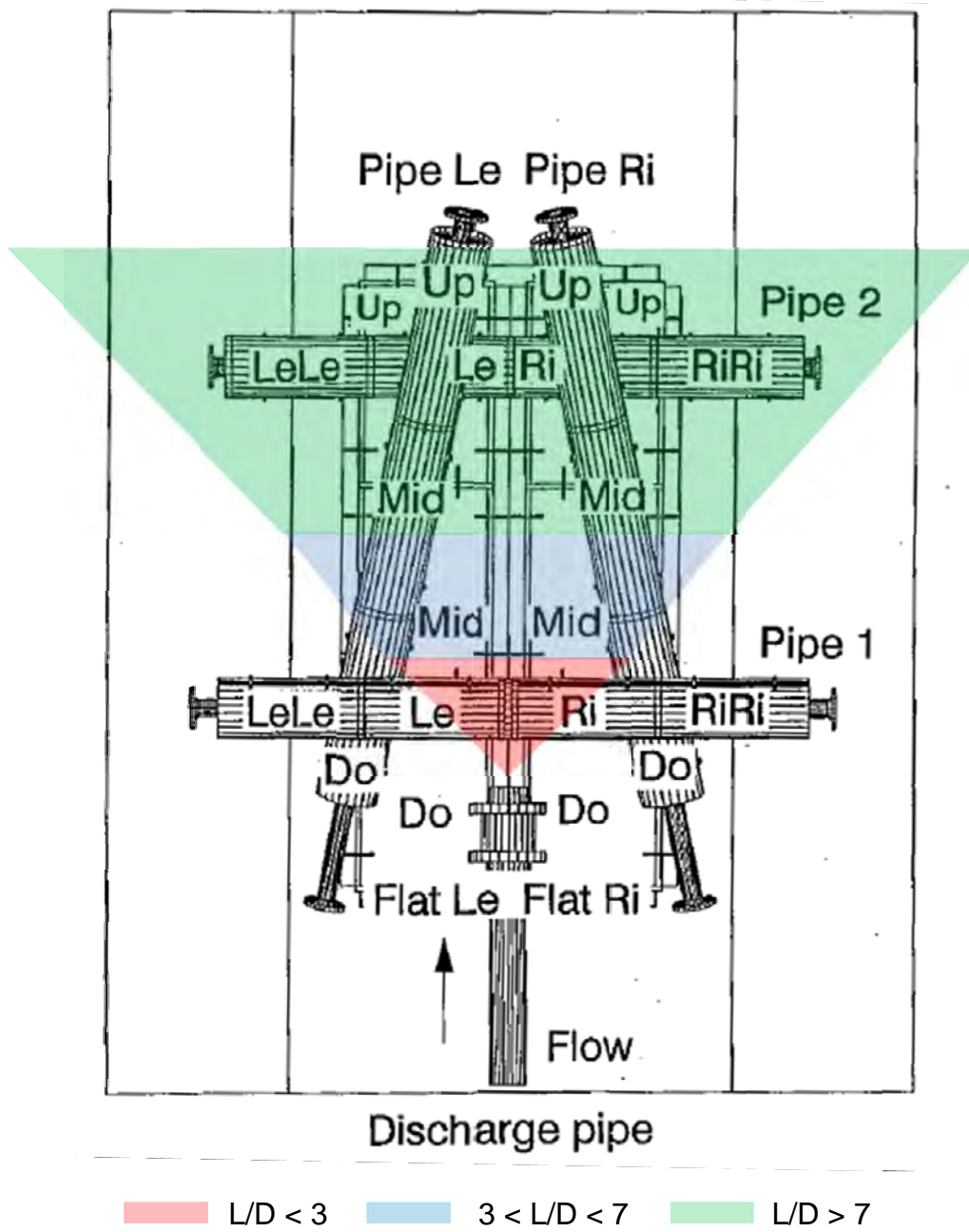
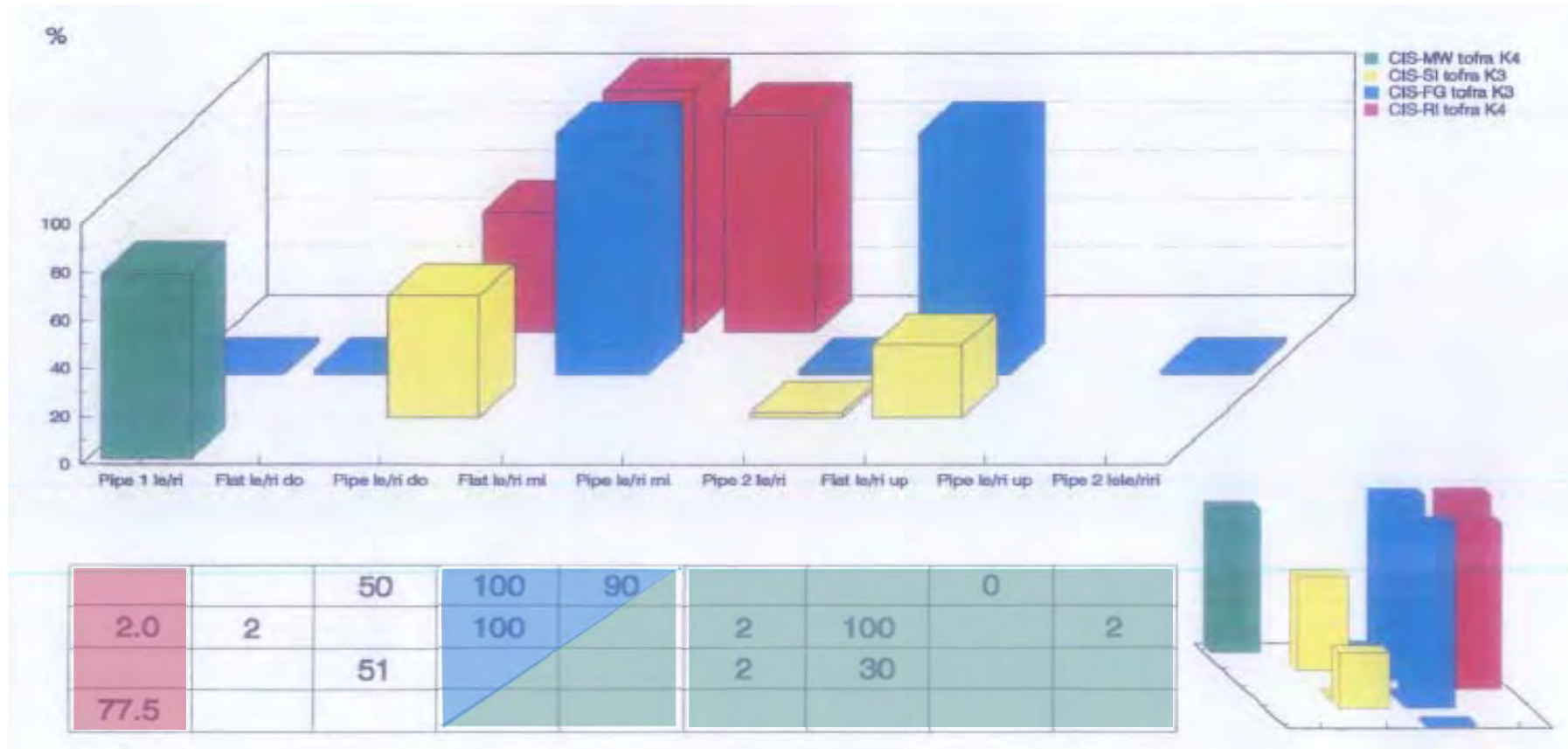


Abb. 4-3 Einflusszonen entsprechend NRC-Kegelmodell



$L/D < 3$
 $3 < L/D < 7$
 $L/D > 7$

Abb. 4-4 Vergleich der Freisetzung aus Kassettenisolierung (Versuche K3 und K4) /[KAE95](#), Fig. 6-14/

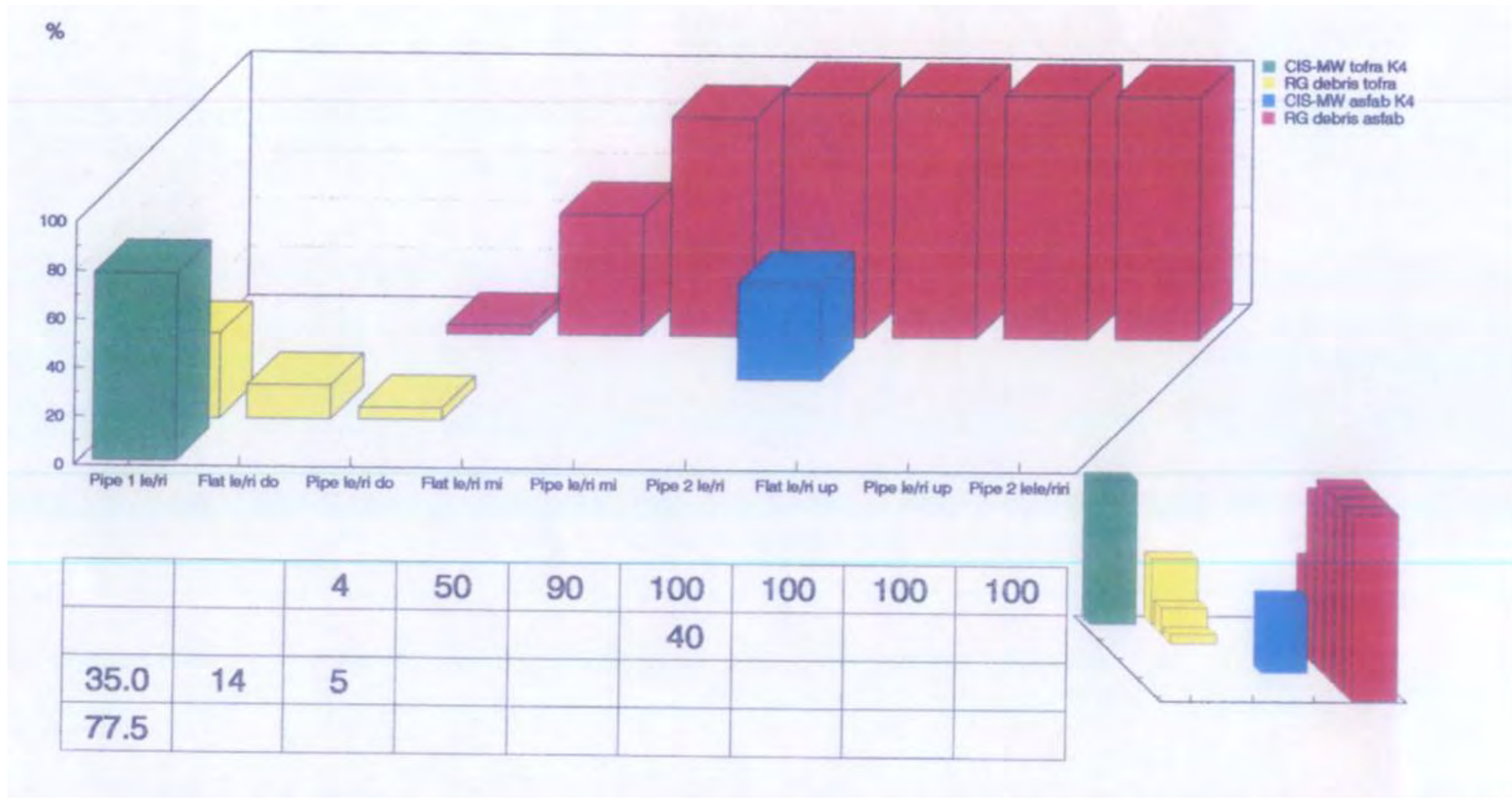


Abb. 4-5 Freisetzung von Mineralwolle aus Kassetten, Versuch K4 /KAE95/

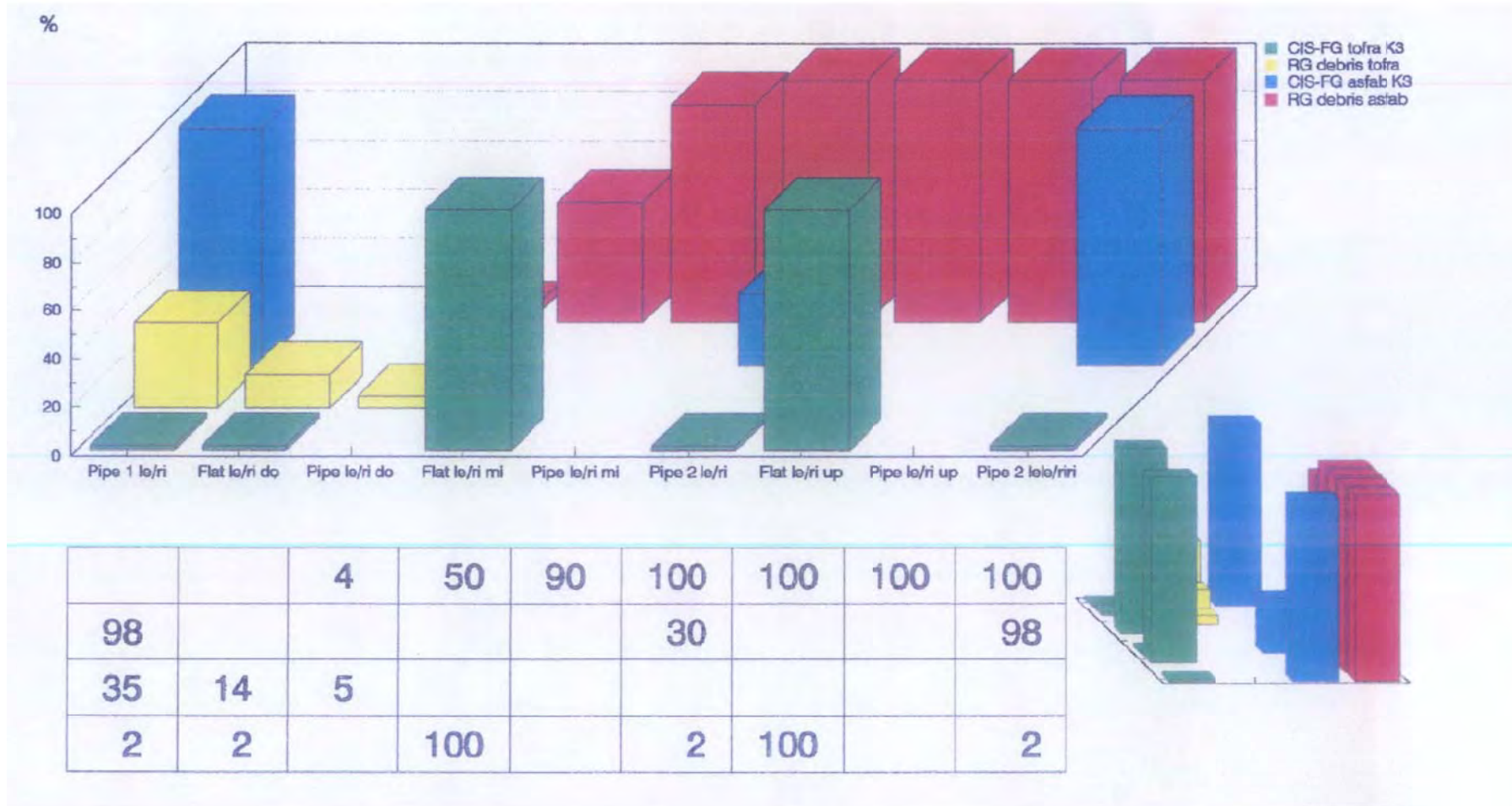


Abb. 4-6 Freisetzung von Glasfasern aus Kassetten, Versuch K3 /[KAE95](#)/

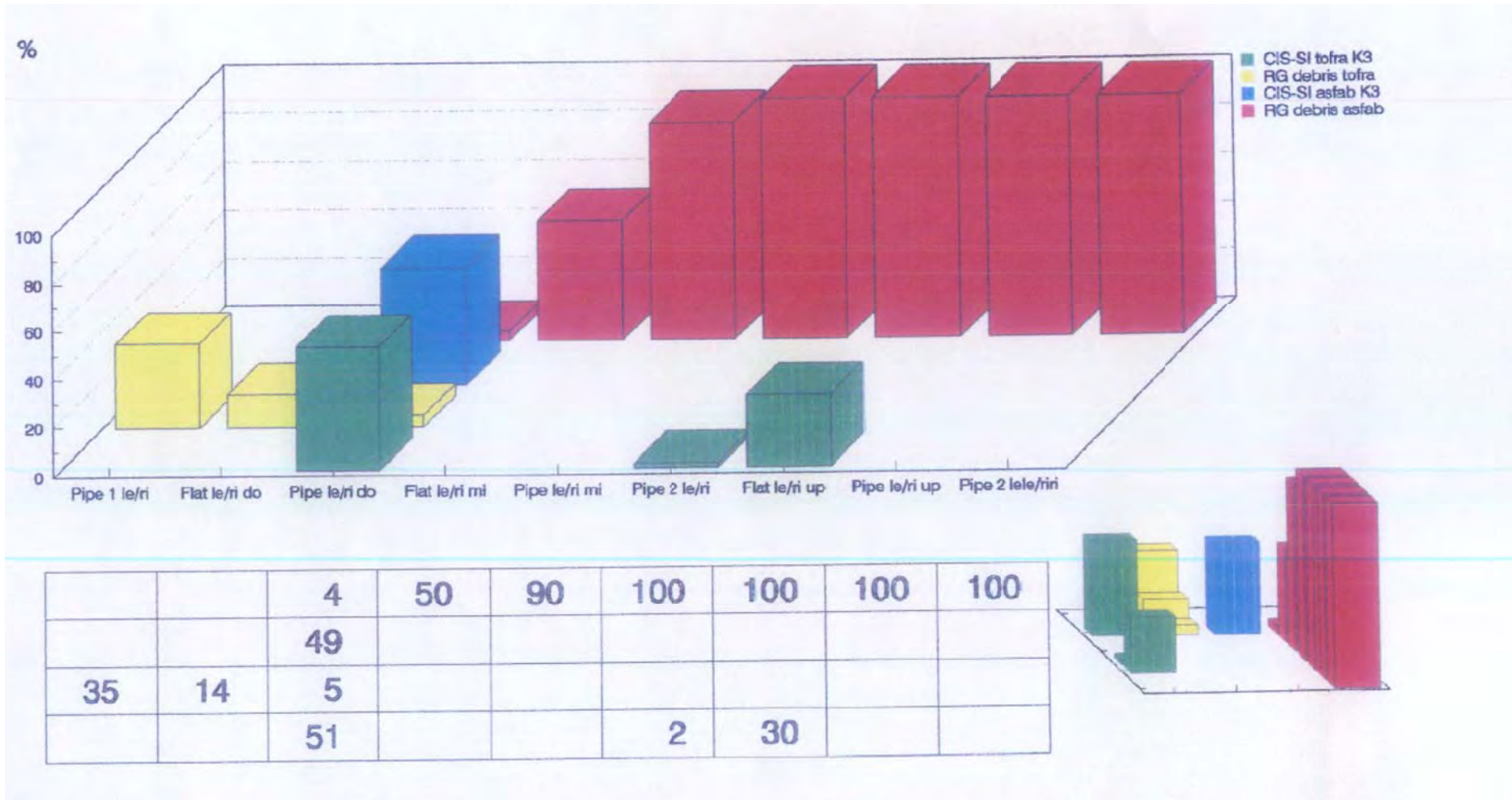


Abb. 4-7 Freisetzung von WDS-Granulat aus Kassetten, Versuch K3 /[KAE95](#)/

5 Bewertungsgrundlage

In der Stellungnahme der RSK vom 23.07.2004 zu den „Anforderungen an den Nachweis der Notkühlwirksamkeit bei Kühlmittelverluststörfällen mit Freisetzung von Isoliermaterial und anderen Stoffen“ [/RSK04/](#) wurde zur Berechnung der Freisetzungsmengen festgelegt:

„Die Berechnung der freigesetzten Isoliermaterialmenge soll nach dem so genannten NRC-Kegel-Modell erfolgen [...]. Dabei wird die freigesetzte Menge abhängig von der Leckgröße (äquivalenter Durchmesser D), dem Abstand vom Leckort (Entfernung L) und der Isoliermaterialart analog folgender Tabelle mit einem Öffnungswinkel des Kegels von 90° berechnet:

| | Abstand | Freisetzung | | |
|-------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------------|
| Zone | | Kassettenisolierung | Matratzenisolierung | Konventionelle Isolierung |
| 1 | $L \leq 3D$ | 100 % | 100 % | 100 % |
| 2 | $3D \leq L \leq 7D$ | 50 % | 100 % | 100 % |
| 3 | $7D \leq L \leq 30D$ | 0 % | 0% | 100 % |

Zur Belegung der Gültigkeit dieser Annahmen wurden Versuche [...] durchgeführt. Bei der Berechnung der freigesetzten Isoliermaterialmenge sind beim Vorhandensein von Kassettenisolierungen zusätzlich die Halb-Kassette(n) vollständig zu berücksichtigen, die die kreisförmig angenommene Leckstelle auf der betroffenen Rohrleitung umgibt bzw. umgeben.

Bei Kassetten, die vom Strahlkegel in Zone 1 und 2 teilweise getroffen werden und die zum größten Teil außerhalb des Strahlkegels liegen, ist der außerhalb des Strahlkegels liegende Kassettenbereich der Zone 2 zuzurechnen. Für zusätzlich innerhalb der Kassetten z.B. durch Gewebetaschen geschütztes Isoliermaterial ist im Einzelfall zu bewerten, ob ein Zuschlag für außerhalb des Strahlkegels liegende Bereiche erforderlich ist.“

6 Bewertung

Nur bei dem Versuch K4 mit Mineralwolle stimmt der Freisetzungsort im Experiment mit dem vom NRC-Kegelmodell vorgegebenen Ort weitgehend überein (Abb. 4-5). Bei diesem Versuch erfolgte keine Freisetzung in den Zonen 2 und 3. Bei allen anderen Isoliermaterialien (Glasfaser, WDS-Granulat, RMI) erfolgte die Freisetzung in Bereichen, in denen das NRC-Kegelmodell [/NRC85/](#) keine Zerstörung von Kassetten und Freisetzung von Isoliermaterial erwarten lässt.

In Tab. 4-1 sind die gemessenen Freisetzungsmengen und die Vorhersagen entsprechend NRC-Kegelmodell gegenübergestellt. Dieser Vergleich zeigt, dass in 5 von 6 Fällen die gemessenen Gesamtfreisetzungsmengen durch das NRC-Kegelmodell unterschätzt wurden. Die freigesetzten Isoliermaterialmengen waren bei Glasfaser um 280 % und bei RMI um 320 % größer als mit dem NRC-Kegelmodell berechnet. Bei Mineralwolle waren die gemessenen Mengen mit 77,5 % und bei WDS-Granulat mit 107 % nur etwas größer als mit dem NRC-Modell berechnet. Die mit dem RSK-NRC-Modell berechneten Freisetzungsmengen betragen etwa 300 % und decken die experimentell ermittelten Freisetzungsraten für alle Isoliermaterialarten weitgehend ab.

Abb. 4-5, Abb. 4-6 und Abb. 4-7 zeigen, dass der Freisetzungsort durch das NRC-Kegelmodell nur unzureichend bestimmt wird. Insbesondere wurden bei den Battelle-KAEFER-Versuchen für WDS-Granulat, Glasfaser und RMI erhebliche Freisetzungsmengen in der Zone 3 ($L/D > 7$) gemessen, die beim NRC-Kegelmodell nicht zu erwarten wären. Diese sind durch „Abschälereffekte“ und „Sekundäreffekte“ bedingt. Ein Abschälen und Zerstören von Kassetten längs zum Leckstrahl kann auftreten, wenn eine näher an der Lecköffnung befindliche Kassette zerstört wird. Sekundäreffekte sind die Entfernung und Zerstörung von Kassetten durch herumfliegende Kassetten.

In deutschen KKW's wird nicht mehr RTD2, sondern Mineralwolle MD2 oder MDK und mikroporöse Material Minileit und WDS eingesetzt. Für MD2, MDK und Minileit liegen keine Versuchsergebnisse vor. Für Mineralwolle RTD2 wurde nur ein Versuch durchgeführt. Es liegt kein experimenteller Beleg vor, dass der Zerstörungsgrad der Kassetten (gleiches Modell bei allen Versuchen) von der Festigkeit des eingeschlossenen Isoliermaterials abhängt. Aus den Battelle-KAEFER-Versuche kann deshalb nicht geschlossen werden, dass bei den in deutschen KKW's eingesetzten Kassettenisolierungen keine Freisetzungen in der Freisetzungszone 3 ($L/D > 7$) möglich sind.

7 Bisherige Bewertung der Battelle-KAEFER Versuche in RSK-Protokollen

Ergebnisprotokoll der 307. Sitzung vom 19.02.1997 der RSK:

„Ergänzend zu den Ausführungen der GRS informierte ein Betreiber (PE) über Versuche, die insbesondere die Wirkung von Strahlkräften auf Isolationskassetten betrafen. Bei diesen Versuchen des schwedischen Betreibers Vattenfall wurde auch in relativ großer Entfernung vom Bruchstutzen eine Zerstörung von Isolationskassetten beobachtet. Allerdings sind die Ergebnisse wegen abweichender Geometrien und unrealistischer Randbedingungen nicht auf deutsche Anlagen übertragbar. Hinsichtlich der bereits o.g. Kaefers-Versuche wurde als wichtigstes Ergebnis dargestellt, dass das Modell zum Austrag des Isolationsmaterials gem. NUREG-0182 als konservative Abschätzung gewertet werden kann.“ [/RSK97/](#)

Ergebnisprotokoll der 145. Sitzung von 17.09.1997 des RSK-Ausschusses LWR:

„Versuche bei Battelle Ingenieurtechnik, deren Anordnung und Durchführung den Verhältnissen in einer realen Anlage nahe kamen, zeigten, dass die in deutschen Anlagen verwendeten Kassetten sich deutlich günstiger verhielten, als nach dem NUREG-Modell ermittelt. Die experimentell ermittelten Freisetzungsraten waren wesentlich niedriger als die mit dem NUREG-Modell rechnerisch bestimmten.“ [/RSK97/](#)

8 Zusammenfassung

In deutschen KKW's wird Mineralwolle (meist MD2 von Isover) und in geringem Maße (außer KKW) mikroporöses Material (Minileit oder WDS) eingesetzt. Die entsprechenden Versuchsergebnisse sind deshalb besonders zu berücksichtigen.

In der RSK-Stellungnahme von 2004 /[RSK04](#)/ wurden die analytischen Rahmenbedingungen zur Bestimmung der Freisetzungsraten mit dem NRC-Kegelmodell festgelegt. Mit der Berechnungsgrundlage der RSK-Stellungnahme von 2004 werden die gemessenen Freisetzungsmengen der Battelle-KAEFER-Versuche für Mineralwolle (RTD2) und WDS-Granulat abdeckend bestimmt. Insbesondere für die Bestimmung der Gesamtfreisetzungsmengen bei Mineralwolle ergibt sich kein direkter Mangel im Nachweisverfahren zur gesicherten Kernkühlung.

Die in den Battelle-KAEFER-Versuchen in 5 von 6 Fällen höheren Gesamtfreisetzungsmengen gegenüber dem NRC-Kegelmodell belegen, dass die Zusatzanforderungen der RSK in der Stellungnahme von 2004 /[RSK04](#)/ bei der Bestimmung von Gesamtfreisetzungsmengen berechtigt sind. Die Versuchsergebnisse von Battelle-KAEFER widersprechen den Aussagen in den Protokollen der 307. RSK-Sitzung und der 145. RSK-LWR-Sitzung.

Die Versuche zeigen, dass der Freisetzungsort durch das NRC-Kegelmodell nur unzureichend bestimmt wird. Insbesondere wurden bei den Battelle-KAEFER-Versuchen erhebliche Freisetzungsmengen in Zone 3 ($L/D > 7$) gemessen, die beim NRC-Kegelmodell nicht zu erwarten wären.

Daher ist für DWRs und SWRs zu prüfen, ob durch „Abschälen“ der Isolierung an Behältern und Rohren und durch „Sekundäreffekte“ zusätzliche Freisetzungsmengen erfolgen. Sollten Freisetzungsmengen in der Freisetzungszone 3 ($L/D > 7$) nicht ausgeschlossen werden können, sind diese bei der Nachweisführung zur gesicherten Kernkühlung bei Kühlmittelverluststörfällen mit Freisetzung von Isoliermaterial zu berücksichtigen.

9 Literatur

- /KAE95/ Wenzel, H., Geiß, M. Ruppert, B., Blow-down Investigations on the Performance of Insulating Systems, KAEFER Isoliertechnik GmbH & Co. KG, B.I.G. V-32.608, August 1995
- /NRC85/ U.S. Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Guide 1.82 "Water Sources for Long-term recirculation Cooling following a Loss-of-coolant accident", Revision II, November 1985
- /RSK04/ RSK, Stellungnahme, Anforderungen an den Nachweis der Notkühlwirksamkeit bei Kühlmittelverluststörfällen mit Freisetzung von Isoliermaterial und anderen Stoffen, Anlage 2 zum Ergebnisprotokoll der 374. Sitzung der RSK, RSK, 22.07.2004
- /RSK97/ RSK, Protokoll der 307. Sitzung, 19.02.1997

Anlage 2

Technische Notiz

Übertragbarkeit der RSK-
Anforderungen an die
Nachweisführung zur
Beherrschung von KMV-
Störfällen mit Isolierma-
terialfreisetzung von
DWR auf SWR

A. Bröcker
W. Pointner

Dezember 2011
Auftrags-Nr.: 800027

GRS-A-3643, Anlage 2

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 1 | Übertragbarkeit der RSK-Anforderungen von DWR auf SWR | 1 |
| 2 | Leckort | 2 |
| 3 | Freisetzung von Isoliermaterial und anderen Stoffen | 3 |
| 4 | Transport im Sicherheitsbehälter | 6 |
| 5 | Transport im Sumpfwasser | 8 |
| 6 | Druckverlust an den Sumpfsieben | 10 |
| 7 | Penetration von Isoliermaterial durch das Sieb | 12 |
| 8 | Pumpenvordruck..... | 13 |
| 9 | Druckverlust im Kern durch Eintrag von Isoliermaterial..... | 15 |
| 10 | Komponenten im Nachkühlkreislauf..... | 17 |
| 11 | Langzeitverhalten..... | 18 |
| 12 | Sauberkeit der Anlage | 20 |
| 13 | Anlageninterne Notfallmaßnahmen..... | 22 |
| 14 | Anforderungen an Maßnahmen zur Begrenzung/Reduzierung von Druckdifferenzen an den Sieben der Not- und Nachkühlpumpen | 23 |
| 15 | Zusammenfassung | 26 |
| 16 | Literatur..... | 27 |

1 Übertragbarkeit der RSK-Anforderungen von DWR auf SWR

Die Übertragbarkeit der von der RSK mit den Stellungnahmen von 2004 und 2008 getroffenen Anforderungen für die Nachweisführung zur Notkühlwirksamkeit bei Kühlmittelverluststörfällen mit Isoliermaterialfreisetzung [/RSK04/](#) [/RSK08/](#) von DWR-Anlagen auf SWR-Anlagen wurde geprüft. Dabei wurden bauliche Unterschiede, Unterschiede in der Betriebsweise und auch solche in der Nachweisführung zu berücksichtigen.

Im Folgenden werden die Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen DWR-Anlagen und SWR-Anlagen und daraus resultierende Konsequenzen für die Anforderungen an die Nachweisführung dargestellt.

2 Leckort

2.1 Anforderung für DWR-Anlagen

In [/RSK04/](#) wird hierzu ausgeführt: *„Bei der Bestimmung der Leckorte sind diejenigen bei der Nachweisführung zu berücksichtigen, bei denen das freigesetzte Isoliermaterial zu den ungünstigsten Bedingungen hinsichtlich des Druckverlustes an den Sieben bzw. des Eintrags in den Kern führt. Dies muss in der Analyse anlagenspezifisch und nachvollziehbar dargestellt sein.“*

2.2 Übertragbarkeit

Die Anforderungen hinsichtlich der Bestimmung der Leckorte sind auf SWR-Anlagen übertragbar.

2.3 Anforderung für SWR-Anlagen

Die Anforderungen zur Bestimmung der Leckorte sind auch für SWR-Anlagen anwendbar.

3 Freisetzung von Isoliermaterial und anderen Stoffen

3.1 Anforderung für DWR-Anlagen

In [/RSK04/](#) wird hierzu ausgeführt:

„Der Ist-Zustand der Isolierung und der verwendeten Materialien ist zu erfassen und zu dokumentieren.

Die Berechnung der freigesetzten Isoliermaterialmenge soll nach dem so genannten NRC-Kegel-Modell erfolgen [...]. Dabei wird die freigesetzte Menge abhängig von der Leckgröße (äquivalenter Durchmesser D), dem Abstand vom Leckort (Entfernung L) und der Isoliermaterialart analog folgender Tabelle mit einem Öffnungswinkel des Kegels von 90° berechnet:

| | Abstand | Freisetzung | | |
|-------------|------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------------|
| Zone | | Kassettenisolierung | Matratzenisolierung | Konventionelle Isolierung |
| 1 | $L \leq 3D$ | 100 % | 100 % | 100 % |
| 2 | $3D < L \leq 7D$ | 50 % | 100 % | 100 % |
| 3 | $7D < L \leq 30$ | 0 % | 0 % | 100 % |

Zur Belegung der Gültigkeit dieser Annahmen wurden Versuche [...] durchgeführt. Bei der Berechnung der freigesetzten Isoliermaterialmenge sind beim Vorhandensein von Kassettenisolierungen zusätzlich die Halb-Kassette(n) vollständig zu berücksichtigen, die die als kreisförmig angenommene Leckstelle auf der betroffenen Rohrleitung umgibt bzw. umgeben. Bei Kassetten, die vom Strahlkegel in Zone 1 und 2 teilweise getroffen werden und die zum größten Teil außerhalb des Strahlkegels liegen, ist der außerhalb des Strahlkegels liegende Kassettenbereich der Zone 2 zuzurechnen. Für zusätzlich innerhalb der Kassetten z. B. durch Gewebetaschen geschütztes Isoliermaterial ist im Einzelfall zu bewerten, ob ein Zuschlag für außerhalb des Strahlkegels liegende Bereiche erforderlich ist.

Der Effekt von Verlagerungen der Strahlrichtung beim Abriss von Leitungen, die zu einer Vergrößerung der getroffenen Isoliermaterialfläche führen könnten, ist anlagenspezifisch bei der Ermittlung der Freisetzung zu berücksichtigen.

Infolge der Leckausströmung können auch andere Stoffe (wie z. B. Anstriche, Betonteilchen, Staub, Folien, Brandschutzmaterial) in den Sumpf gespült werden. Die Freisetzungsmenge dieser Stoffe ist anlagenspezifisch abzuschätzen und bei der Bewertung zu berücksichtigen.“

3.2 Übertragbarkeit

Freisetzung von Isoliermaterial

Lecks und Brüche können bei SWR-Anlagen an dampfführenden oder wasserführenden Leitungen auftreten.

Beim NRC-RSK-Kegelmodell für DWR wird von einem Betriebsdruck von 155 bar ausgegangen. Bei SWR-Anlagen beträgt der Betriebsdruck etwa 70 bar. Bei SWR-Anlagen sind auch Dampfleitungsbrüche relevant. Die Strahlaufweitung für dampfführende Leitungen beträgt ca. 30 °.

Zur Bestimmung von Freisetzungsmengen wurden Versuche mit einem Leckstrahl aus einem Behälter mit einem Druck von 140 bar und einer Wassertemperatur von ca. 300 °C durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Battelle-KAEFER-Versuche sind in [/KAE95/](#) dokumentiert. Eine Bewertung durch die GRS befindet sich in Anlage 1 dieses Berichtes. Die Auswertung der Versuche bei Battelle-KAEFER (Anlage 1) hat gezeigt, dass das RSK-NRC-Kegelmodell die Gesamtfreisetzungsmenge an Isoliermaterial aus Kassetten abdeckend bestimmt.

Wegen des geringeren Betriebsdrucks bei SWR-Anlagen im Vergleich zu DWR-Anlagen ist Folgendes zu beachten:

- Für wasserführende Leitungen ist wegen des geringeren Drucks im System auch der Druck im Leckstrahl geringer. Damit verkürzt sich der Einflussbereich des Leckstrahls, in dem Isoliermaterial und andere Stoffe freigesetzt werden können.
- Für dampfführende Leitungen ist wegen des geringeren Öffnungswinkels des Leckstrahls ein im Vergleich zu wasserführenden Leitungen weiter reichender Einflussbereich anzunehmen.

Es ist davon auszugehen, dass sich geringere Leckstrahlaufweitung und längerer Einflussbereich bei dampfführenden Leitungen kompensieren und ähnliche Freisetzungsmengen zu erwarten sind, wie die mit dem NRC-RSK-Modell bestimmten Gesamtfreisetzungsmengen.

Einschränkungen bei der Anwendbarkeit des RSK-NRC-Kegelmodells nach [/RSK04/](#) bestehen hinsichtlich des Freisetzungsortes. So wurde in den Battelle-KAFER-Versuchen für WDS-Granulat, Glasfaser und RMI auch in der Zone 3 ($L/D < 7$) erhebliche Mengen an Isoliermaterial freigesetzt. Diese Freisetzungen waren durch „Abschälereffekte“ und „Sekundäreffekte“ bedingt, bei denen entweder der Leckstrahl nach Ablösen einer Kassette in der ursprünglichen Freisetzungszone dann außerhalb dieser Freisetzungszone befindliche Kassetten zerstörte oder durch herumfliegende Kassettenbruchstücke weitere Kassetten beschädigt wurden.

Freisetzung von anderen Stoffen

In SWR-Anlagen werden ähnliche Materialien eingesetzt und verarbeitet wie bei DWR-Anlagen. Deshalb sind keine grundsätzlichen Unterschiede bei der Freisetzung anderer Stoffe zu erwarten.

Im Rahmen einer Beprobung und Abschätzung mit einem von AREVA empfohlenen Verfahren wurde für KRB II, Block B ein Staubeintrag von 5 kg in den Steuerstabsantriebsraum ermittelt. Diese Menge an Staub ist vergleichbar zu der in einer DWR-Anlage ermittelten Menge an Staub im Sumpf für eine DWR-Anlage.

Bei der in SWR-Anlagen vorhandenen Kondensationskammer können im KoKa-Wasser bzw. am Boden der KoKa Verunreinigungen vorhanden sein. Diese sind im Vergleich zu DWRs zusätzlich in der Nachweisführung zu bewerten. Es ist zu untersuchen, ob und in welcher Menge solche Verunreinigungen mobilisiert werden können.

3.3 Anforderung für SWR-Anlagen

Die Anforderungen entsprechend [/RSK04/](#) sind auch für SWR-Anlagen anzuwenden. Zusätzlich ist bei der Freisetzung anderer Stoffe die anlagenspezifische Menge an Verunreinigungen in der KoKa zu bestimmen.

4 Transport im Sicherheitsbehälter

4.1 Anforderung für DWR-Anlagen

In [/RSK04/](#) wird hierzu ausgeführt:

„Zum Transport des freigesetzten Isoliermaterials im Sicherheitsbehälter von DWR liegen zurzeit noch keine Integralversuche vor. Aus dem Ereignis in der Anlage Barsebäck-2 sowie schwedischen und amerikanischen Versuchen kleineren Maßstabs [16], [22] lässt sich schließen, dass mehr als die Hälfte der freigesetzten Isoliermaterialmenge im Sicherheitsbehälter zurückgehalten wird. Für deutsche Anlagen ist zu berücksichtigen, dass im Unterschied zu ähnlichen ausländischen Druckwasserreaktoren kein Sprühsystem im Störfallverlauf eingesetzt wird, das weiteres Abwaschen von freigesetztem Isoliermaterial ermöglicht. Die bei der Nachweisführung zu treffende Annahme eines 50 %-igen Transports des freigesetzten Isoliermaterials und anderer Stoffe in den Sumpf ist für deutsche Anlagen als abdeckend anzusehen. Bei dieser Festlegung wird keine Unterscheidung hinsichtlich der Leckorte und -größen getroffen.“

4.2 Übertragbarkeit

Das Postulat eines Transports von 50 % des freigesetzten Isoliermaterial in den Sumpf bei DWR-Anlagen entsprechend der RSK-Anforderung [/RSK04/](#) ist auf SWR-Anlagen nicht übertragbar, da sich die Geometrie und das Design der Druckkammer deutlich vom DWR unterscheiden.

Bei SWR-Anlagen gelangen mit dem Dampf transportierte Isoliermaterialfasern bevorzugt in die Kondensationskammer. Mit dem Wasser transportierte Isoliermaterialfasern gelangen zum größten Teil in den Steuerstabantriebsraum (SAR). Andere durch Wasser im Sicherheitsbehälter freigesetzte Stoffe werden ebenfalls mit dem Wasser in Richtung SAR transportiert. Bei den durch Dampfströmung freigesetzten bzw. mobilisierten Stoffen ist ein überwiegender Transport mit dem Dampf in die KoKa anzunehmen.

In der Nachweisführung sind der Transport in den SAR und der Transport in die KoKa zu berücksichtigen.

4.3 Anforderungen für SWR-Anlagen

Wegen der Trennung in SAR und KoKa und der unterschiedlichen Rückförderung des Sumpfwassers ist der Transport von Isoliermaterial und anderen Stoffen baureihenspezifisch nachzuweisen.

Für SWR-Anlagen ist entsprechend dem derzeitigen Erkenntnisstand von einem dampfgetragenen Transport von ca. 20 % des freigesetzten Isoliermaterials und anderer Stoffe in die Koka auszugehen.

5 Transport im Sumpfwasser

5.1 Anforderung für DWR-Anlagen

In [/RSK04/](#) wird hierzu ausgeführt:

„Für die Nachweisführung ist der transportierbare Anteil der in den Sumpf eingetragenen Isoliermaterialmenge durch repräsentative Versuche zu ermitteln und konservativ festzulegen. Für das Isoliermaterial MD 2 (83) ist bei Vorliegen einer turbulenten Strömung im Sumpf infolge des Leckstrahls beim Sumpfbetrieb der Druckverlust an den Sumpfsieben für einen Transportanteil von 20 % bis 40 % und der damit korrelierten Größenverteilung des Isoliermaterials zu bestimmen. Andere Werte für den Transportanteil bedürfen der Absicherung durch Versuche. Für Mineralwolle RTD 2 und andere Isolierstoffe als MD 2 (83) sowie Kombinationen von faser- und partikelförmigen Stoffen sind die Transportraten basierend auf Experimenten konservativ festzulegen. Dabei sind auch Skalierungseffekte zu berücksichtigen.“

5.2 Übertragbarkeit

Die Anforderungen hinsichtlich bestimmter Transportanteile und unterschiedlicher Materialien können nicht von DWR- auf SWR-Anlagen übertragen werden.

Ein Teil der in den Steuerstabantriebsraum transportierten Isoliermaterialfasern und Partikel wird bei SWR-69-Anlagen im Sumpfansaugbetrieb zu den Sumpfsieben des SAR und dahinter liegender Komponenten transportiert. In die KoKa eingetragene oder dort bereits vor Störfallbeginn vorhandene Stoffe werden in Richtung der KoKa-Saugsiebe und dahinter liegender Komponenten transportiert.

Bei SWR72-Anlagen strömt Wasser durch die Überlaufrohre in die Koka und kann so Fasern und Partikel aus dem SAR in die KoKa transportieren. In der generischen Nachweisführung der Betreiber wird für Staub ein ähnliches Sedimentationsverhalten im SAR angenommen wie für Isoliermaterialfasern. Diese Annahme ist aber bisher nicht experimentell belegt.

Die Transportraten in der KoKa wurden von [/RSK04/](#) nicht behandelt.

5.3 Anforderungen für SWR-Anlagen

Der Transport von Isoliermaterial und anderen Stoffen im Sumpfwasser ist durch experimentelle Nachweise oder mit validierten Rechenprogrammen nachzuweisen.

Bei der Bestimmung der Transportraten sind Turbulenzen in der KoKa durch den Eintrag von Dampf über die Abblaserohre und die S&E-Ventile zu berücksichtigen.

Während der Abblasephase ist entsprechend der Konzentration von Isoliermaterial im Wasser der Koka und des Massendurchsatzes der Not- und Nachkühlpumpen der maximale Transport von Isoliermaterial und anderen Stoffen ohne Sedimentation anzunehmen.

6 Druckverlust an den Sumpfsieben

6.1 Anforderung für DWR-Anlagen

In [/RSK04/](#) wird hierzu ausgeführt:

„Der Druckverlust an den Sumpfsieben ist von einer Reihe von Parametern abhängig, wie z. B. der Art und Größenverteilung des an die Sumpfsiebe transportierten Isoliermaterials, der Menge des am Sieb abgelagerten Isoliermaterials, der eingelagerten Partikel, der Fläche und Maschenweite des Sumpfsiebes, der Temperatur des Sumpfwassers und der Anströmgeschwindigkeit am Sieb. Dabei ist die ungünstigste Ausfallkombination der Nachkühlpumpen hinsichtlich Ablagerungen und Strömungsgeschwindigkeit am Sieb zu unterstellen.

Validierte Ansätze, diese Parameter in eine allgemein gültige Gleichung für den Druckverlust zu fassen, sind derzeit nicht vorhanden. Weltweit werden daher die zu erwartenden Druckverluste am Sumpfsieb zurzeit durch Versuche bestimmt. Die RSK empfiehlt diese Vorgehensweise auch für deutsche Anlagen. Für die zu betrachtenden Lecklagen und Leckgrößen ist die Bandbreite und die Art der freigesetzten und auf den Sieben abgelagerten Stoffe nach oben genanntem Ansatz festzustellen und der daraus resultierende Druckverlust experimentell unter Beachtung anlagenspezifischer Bedingungen zu bestimmen. Dieser Druckverlust ist unter angemessener Berücksichtigung der sonstigen Konservativitäten mit einem Sicherheitszuschlag zu versehen.

Bei feinmaschigen Sieben ist konservativ davon auszugehen, dass das gesamte transportierbare Material am Sieb abgelagert wird. Bei grobmaschigen Sieben ist der Rücktransport von penetriertem Isoliermaterial über das Leck in den Sumpf zu berücksichtigen. Um diesem Effekt Rechnung zu tragen, ist für die Berechnung des Druckverlustes die in den Versuchen gemessene Ablagerungsmenge um 50 % der gemessenen Penetrationsmenge zu erhöhen.

Der sogenannte Dünnschichteffekt („thin bed effect“), der auftritt, wenn sich Partikel in eine dünne (wenige Millimeter dicke) Schicht von Fasern auf den Sieben einlagern oder überwiegend feine Faserteilchen ein kompaktes Filterbett (nur bei geringen Transportraten im Sumpf möglich) bilden, ist besonders zu beachten. Der daraus resultierende Druckverlust kann den einer wesentlich größeren Menge von Fasern (und Partikeln) übersteigen. Die RSK empfiehlt daher, den gleichzeitigen Einsatz partikel- und faserförmige Isoliermaterialien in den Anlagen soweit zu begrenzen, dass der oben dargestellte Effekt nur geringe Auswirkungen hat.

Die Abtragbarkeit der aus Druckdifferenzen resultierenden Lasten über die Siebgitterstruktur sowie durch die Unterstützungs- und Betonstrukturen ist für die Kurzzeit-(Blow-Down-)Phase und die Langzeit-(Nachkühl)-Phase nachzuweisen.“

6.2 Übertragbarkeit

Die Druckverluste an den Rückhaltevorrichtungen sind auch für den SWR experimentell nachzuweisen.

Bei der Ermittlung des maximalen Druckverlustes an den Rückhaltevorrichtungen ist „*die ungünstigste Ausfallkombination der Nachkühlpumpen hinsichtlich Ablagerungen und Strömungsgeschwindigkeit [...] zu unterstellen.*“ [/RSK04/](#) Dabei sind die Arten der Ablagerungen und deren möglichen Mischungsverhältnisse und die Geometrie der Rückhaltevorrichtungen (z.B. Maschenweite bzw. Lochgröße) zu berücksichtigen. Bei der Versuchsanordnung sind Selektionsprozesse beim Transport der Materialien und deren Einfluss auf die Ablagerungsmenge an den Rückhaltevorrichtungen und den daraus resultierenden Druckverlust zu berücksichtigen.

Die Anforderungen hinsichtlich der Abtragbarkeit von Lasten sind für SWR-Anlagen zu übernehmen.

6.3 Anforderungen für SWR-Anlagen

Die für DWR-Anlagen geltenden Anforderungen sind auch für SWR-Anlagen anzuwenden.

Bei SWR-Anlagen treten in der Abblasephase hohe Turbulenzen in der KoKa auf. In der Nachweisführung ist der Druckverlust bei vollständiger Ablagerung des während der Abblasephase zu den Rückhaltevorrichtungen transportierten Materials an den Rückhaltevorrichtungen zu berücksichtigen, wenn keine experimentellen Nachweise vorhanden sind.

7 Penetration von Isoliermaterial durch das Sieb

7.1 Anforderungen für DWR-Anlagen

In [/RSK04/](#) wird hierzu ausgeführt:

„Die Penetration von Isolierstoffen und anderen Stoffen durch das Sieb hängt im Wesentlichen von der Art und Größenverteilung der Stoffe, von der Belegung des Siebs, von der Strömungsgeschwindigkeit und von der Maschenweite des Siebs ab. Die für die weitere Nachweisführung zu unterstellende Penetration ist, wie der Druckverlust am Sieb, anlagen-spezifisch unter Berücksichtigung der für den Absolutwert der Penetration ungünstigsten zu erwartenden Siebbelegung zu bestimmen. Dabei ist in Abhängigkeit von der Sumpfkongfiguration und der Anzahl verfügbarer Pumpen von dem ungünstigsten Fall auszugehen.“

7.2 Übertragbarkeit

Hinsichtlich der Penetration von Isoliermaterial und anderen Stoffen sind für SWR-Rückhaltevorrichtungen keine anderen Wirkungsmechanismen als für DWR-Rückhaltevorrichtungen zu erwarten.

7.3 Anforderungen für SWR-Anlagen

Die für DWR-Anlagen geltenden Anforderungen sind auch für SWR-Anlagen anzuwenden.

Während der Abblasephase kommt es in der KoKa zu starken Turbulenzen. Konservativ hinsichtlich der Penetration ist davon auszugehen, dass das während der Druckabbauphase zu den Rückhaltevorrichtungen transportierte Material vollständig in den Kern transportiert wird. Der Kerneintrag beginnt in diesem Fall mit dem Start der Not- und Nachkühlpumpen.

8 Pumpenvordruck

8.1 Anforderungen für DWR-Anlagen

In [/RSK04/](#) wird hierzu ausgeführt:

*„Die Nachkühlpumpen benötigen einen ausreichenden Pumpenvordruck, um nicht zu kavitiere-
ren. Bei Kavitationsbetrieb ist der Durchsatz des Kühlmittels eingeschränkt und unter Um-
ständen nicht ausreichend, um den Kern ausreichend zu kühlen.*

*Es ist nachzuweisen, dass nach der Sumpfschaltung unter Berücksichtigung des für die
ungünstigste Siebbelegung ermittelten Druckverlustes am Sumpfsieb eine unzulässige Be-
einträchtigung der Funktion der Nachkühlpumpen durch Kavitation nicht auftritt. Dazu ist
nach Auffassung der RSK ein ausreichender Sicherheitsabstand einzuhalten.*

*Gemäß RSK-Leitlinien DWR sind bei der Analyse der Kernnotkühlwirksamkeit Leckquer-
schnitte in den Hauptkühlmittleitungen (HKL) von 2F zu Grunde zu legen (Kap. 21.1 (2)).
Für die Zulaufhöhe der Nachkühlpumpen ist gemäß Kap. 22.1.3 (3) als Berechnungsvor-
schrift nach der Umschaltung auf Sumpfbetrieb Atmosphärendruck im Sicherheitsbehälter zu
Grunde zu legen. Bei Anwendung dieser Vorschrift ergibt sich bei den derzeitigen Auslegun-
gen ein ausreichender Abstand zur Kavitation ohne Berücksichtigung eines erhöhten Druck-
verlustes über die Sumpfsiebe infolge der Ablagerung von Isoliermaterial.*

*Bei einem erhöhtem Druckverlust infolge der Ablagerungen von Isoliermaterial an den
Sumpfsieben kann die Notkühlwirksamkeit unter Beachtung der Berechnungsvorschrift nach
den RSK-Leitlinien (Kap. 22.1.3 (3)) unter Umständen nicht nachgewiesen werden. In sol-
chen Fällen ist wie nachfolgend beschrieben vorzugehen:*

*Durch die Rechenvorschrift nach RSK-Leitlinien (d. h. Nicht-Berücksichtigung des Über-
drucks im Sicherheitsbehälter) ergeben sich sehr hohe Auslegungsreserven. Vor diesem
Hintergrund und der zusätzlichen Berücksichtigung der kurzzeitigen Fahrweise bei hohen
Sumpftemperaturen ist nach Ansicht der RSK die Berücksichtigung des Überdrucks im Si-
cherheitsbehälter unter folgenden Voraussetzungen zulässig:*

- Die Druck- und Temperaturbedingungen in der Sicherheitsbehälteratmosphäre bzw.
im Sumpf sind nachvollziehbar konservativ im Hinblick auf niedrige Drücke und hohe
Sumpftemperaturen mit validierten Rechenprogrammen zu bestimmen. Die Zulaufhö-
hen für die Nachkühlpumpen sind mit diesen errechneten Werten sowie unter Be-
rücksichtigung der konservativ bestimmten Druckverluste an den Sumpfsieben zu
ermitteln, die durch das auf den Sieben abgelagerte Isoliermaterial verursacht wer-
den.*

- *Die so ermittelte Zulaufhöhe muss größer sein als die zur Vermeidung von Kavitation erforderliche Zulaufhöhe. Zur Bewertung der ausreichenden Sicherheit ist der dabei ermittelte Abstand zur Kavitationsgrenze auszuweisen und mit dem entsprechenden Wert nach RSK-Berechnungsvorschrift (ohne Berücksichtigung von Isoliermaterial) zu vergleichen.*

Als weitere Bedingung ist einzuhalten, dass infolge des Druckverlustes am Sieb nur eine geringfügige Dampfbildung zulässig ist, die zu keiner wesentlichen Verringerung des Kühlmiteldurchsatzes führt.“

8.2 Übertragbarkeit

Beim Nachweis des kavitationsfreien Betriebes sind alle Not-und-Nachkühlpumpen zu berücksichtigen.

Bei SWR69-Anlagen erfolgt ein intermittierender Betrieb „zwischen Fluten des RDB, Rückfördern aus dem SAR-Sumpf und KoKa-Sprühen“.

Bei SWR72-Anlagen wird nach dem Erreichen der Überlaufhöhe vom SAR in die KoKa kontinuierlich Wasser vom SAR in die Koka übertragen und kontinuierlich aus der KoKa in den RDB zurückgefördert.

Die Berechnung der NPSH-Reserve gemäß der RSK-Leitlinien DWR ist auf SWR übertragbar.

8.3 Anforderungen für SWR-Anlagen

Die für DWR-Anlagen geltenden Anforderungen sind auch für SWR-Anlagen anzuwenden. Dabei sind alle Phasen des Not- und Nachkühlbetriebes (Notkühleinspeisung, KoKa-Kühlen, Kühlmittelergänzung, Rückförderung) zu berücksichtigen.

Neben der notwendigen NPSH-Reserve ist nachzuweisen, dass durch Hohl-Wirbelbildung keine Luft angesaugt wird.

9 Druckverlust im Kern durch Eintrag von Isoliermaterial

9.1 Anforderungen für DWR-Anlagen

In [/RSK04/](#) wird hierzu ausgeführt:

„Ein Teil des Isoliermaterials, das durch das Sumpfsieb penetriert ist, kann sich an den Brennelementfüßen und an den Abstandshaltern ablagern. Der restliche Anteil (Feinstpartikel) kann in der Kühlmittelströmung verbleiben und in den Sicherheitsbehälter-Sumpf zurückströmen.

Es ist nachzuweisen, dass das im Kern abgelagerte Isoliermaterial die Wärmeabfuhr aus dem Kern nicht unzulässig beeinträchtigt. Der Einfluss anderer potenziell eingetragener Stoffe ist zu bewerten. Bei der Nachweisführung ist abdeckend davon auszugehen, dass das gesamte penetrierte Material in den Reaktordruckbehälter gelangt. Die Ablagerung im Kern ist unter Berücksichtigung der Strömungsverteilung im RDB und der Rückhaltung im Kern mit Experimenten abdeckend zu ermitteln. Liegen keine Experimente vor, ist konservativ zu unterstellen, dass das gesamte penetrierte Material im Kern abgelagert wird.

Für die Analysen zur Kühlbarkeit des Kerns mit eingetragener Isoliermaterialmenge ist anlagenspezifisch die ungünstigste Kombination von Leckort und Einspeisekonfiguration der Nachkühlpumpen zu unterstellen.

Der für die Nachweisführung verwendete Druckverlust an den Brennelementen muss in Abhängigkeit von Brennelementtyp und eingetragener Isoliermaterialmenge, Isoliermaterialart, der Temperatur, der Strömungsgeschwindigkeit und der chemischen Zusammensetzung des Kühlmittels durch Versuche bestimmt werden. Dieser Druckverlust ist unter angemessener Berücksichtigung der sonstigen Konservativitäten mit einem Sicherheitszuschlag zu versehen. Dabei ist auch der Einfluss anderer potenziell eingetragener Stoffe zu bewerten.

Der maximal zulässige Druckverlust über den Kern infolge von Materialablagerungen und der Nachweis der ausreichenden Kernkühlung sind durch Analysen mit qualifizierten thermohydraulischen Rechenprogrammen zu ermitteln bzw. zu führen und dürfen die Wärmeabfuhr aus dem Kern nicht unzulässig beeinträchtigen. Eine gesicherte Wärmeabfuhr ist gegeben, wenn es nach der Sumpfschaltung nicht zu einer Netto- Dampfbildung im Kern und nicht zu einer Dampfausströmung aus dem Kern kommt. Dabei sind gemäß RSK-Leitlinien thermohydraulische Randbedingungen zu Grunde zu legen, die Lecks bis zu 2F abdecken.

Die Wärmeabfuhr aus dem Kern ist gegeben, wenn der aufgrund der Materialablagerung an den Brennelementen bestimmte Druckverlust im Kern ausreichend unter dem als zulässig ermittelten Druckverlust liegt.“

9.2 Übertragbarkeit

Alle in den RSK-Anforderungen formulierten Anforderungen für DWR-Anlagen sind weitgehend auf SWR-Anlagen übertragbar. Dabei ist zu berücksichtigen, dass bei SWR-Anlagen die Kernkühlung gesichert ist, wenn der Kern vollständig mit zweiphasigem Kühlmittel bedeckt ist.

9.3 Anforderungen für SWR-Anlagen

Die Passage zur gesicherten Wärmeabfuhr ist anzupassen: Eine gesicherte Wärmeabfuhr ist gegeben, wenn der Kern langfristig mit zweiphasigem Kühlmittel bedeckt ist.

Bei SWR-Anlagen ist die Strömungsverteilung im Kern in der Nachweisführung zu berücksichtigen.

Verstopfungen der inneren und äußeren Bypass-Strömungswege sind bei der Nachweisführung zu berücksichtigen. Anderenfalls ist zu zeigen, dass Verstopfungen des inneren und äußeren Bypasses ausgeschlossen werden kann.

10 Komponenten im Nachkühlkreislauf

10.1 Anforderungen für DWR-Anlagen

In [/RSK04/](#) wird hierzu ausgeführt:

„Neben den Brennelementen können auch Pumpen, Ventile und Wärmetauscher durch den Eintrag von Isoliermaterial in ihrer Funktion eingeschränkt sein. Es ist darzulegen, dass die zur Störfallbeherrschung erforderlichen Funktionen des Not- und Nachkühlsystems, die durch den Eintrag von penetriertem Isoliermaterial und anderen Stoffen beeinträchtigt werden können, uneingeschränkt gewährleistet sind.“

10.2 Übertragbarkeit

Bei SWR ist die uneingeschränkte Verfügbarkeit der Komponenten hinter den Sieben ebenfalls sicherzustellen.

International wird bei den Downstream-Effekten noch ein größerer Forschungsbedarf gesehen. Diskutiert werden beispielweise Ausfällungseffekte an Wärmetauschern durch Änderung der Kühlmitteltemperatur. Die entsprechenden Entwicklungen sind zu verfolgen und die RSK-Anforderungen sind gegebenenfalls anzupassen.

10.3 Anforderungen für SWR-Anlagen

Die für DWR-Anlagen geltenden Anforderungen sind auch für SWR-Anlagen anzuwenden.

11 Langzeitverhalten

11.1 Anforderungen für DWR-Anlagen

In [/RSK04/](#) wird hierzu ausgeführt:

„Bezüglich der möglichen Änderung der Druckverluste über längere Zeiträume sollte der Einfluss der Korrosion von Einbauten im Sicherheitsbehälter durch boriertes Wasser untersucht werden. Korrosionspartikel, die sich im Faserbett auf dem Sieb ablagern, können den Druckverlust erhöhen.

Die zu erwartende Korrosionsrate von Metalloberflächen im Sumpfwasserbereich ist für die Nachweisführung abzuschätzen und im Hinblick auf ihre Auswirkungen auf die Druckverluste über die Sumpfsiebe und den Kern zu berücksichtigen.

Der Borgehalt des Sumpfwassers beeinflusst nach heutigem Kenntnisstand bei Mineralwolle im Gegensatz zu Glaswolle lediglich die Viskosität des Kühlmittels. Chemische Reaktionen mit der Mineralwolle sind daher nicht zu erwarten. Der Kenntnisstand bezüglich des langfristigen Einflusses von boriertem Sumpfwasser auf den Druckverlust am Sumpfsieb sollte jedoch weiter experimentell abgesichert werden. Hierzu sind Versuche mit relevanten Kombinationen von Isoliermaterialien zur Unterstützung der getroffenen Annahmen durchzuführen.“

11.2 Übertragbarkeit

In SWR-Anlagen wird Deionat eingesetzt. Für die chemischen Effekte sind deshalb SWR-spezifische Nachweise zu erbringen.

Bei den Down-Stream-Komponenten können chemische Reaktionen im Langzeitbereich zu Funktionsbeeinträchtigungen führen. International diskutiert werden zudem biologische Prozesse. Entsprechende Effekte sind gegebenenfalls in der Nachweisführung zu berücksichtigen.

11.3 Anforderungen für SWR-Anlagen

Mögliche Änderungen der Druckverluste an den Sieben durch Langzeiteffekte sind in der Nachweisführung zu berücksichtigen. Hierzu gehören neben der Einlagerung von Korrosi-

Anlage 2

onsprodukten in den Filterkuchen auch Änderungen der Eigenschaften des Filterkuchens durch chemische Reaktionen und die Bildung von Ausfällungsprodukten.

Die Funktionstüchtigkeit der Komponenten des Not- und Nachkühlsystems hinter den Rückhaltevorrichtungen (Down-Stream-Komponenten) ist auch im Langzeitbereich sicherzustellen.

Die Integrität von baulichen Strukturen oder die gesicherte Kernkühlung sind auch im Langzeitbereich zu gewährleisten.

12 Sauberkeit der Anlage

12.1 Anforderungen für DWR-Anlagen

In [/RSK04/](#) wird hierzu ausgeführt:

„Wegen des Beitrags anderer Stoffe („latent debris“), die sich in ein Faserbett aus Isoliermaterial einlagern und zu einer weiteren Erhöhung des Druckverlustes über die Sumpfsiebe führen, ist besonders auf Sauberkeit, Korrosionsfreiheit und Haftung von Anstrichen im Sicherheitsbehälter zu achten. Die Verwendung von Materialien wie Brandschutzmaterialien, Abdeckfolien, Klebebändern und Materialien, die bei einem Kühlmittelverluststörfall in den Sicherheitsbehältersumpf gelangen können, ist möglichst gering zu halten. Nach Arbeiten im Sicherheitsbehälter und nach einer Revision ist die Entfernung aller unnötigen Materialien und vor dem Wiederanfahren die Sauberkeit im Sicherheitsbehälter zu überprüfen.

Staub kann sich an Oberflächen im Sicherheitsbehälter und in Lüftungskanälen ansammeln. Da die Lüftungskanäle bei einem Kühlmittelverluststörfall zerstört werden können, sollten diese soweit wie möglich innen sauber gehalten werden. Nach heutigen Erkenntnissen ist der Einfluss von Partikeln wie Staub auf den Druckverlust über die Siebe nicht auszuschließen und sollte daher experimentell untersucht werden. Es ist nachzuweisen, dass der Einfluss von Staub nicht zu einem unzulässigen Druckverlust („Thin Bed Effect“) am Sieb und im Kern führt (s. a. Abschnitt „Druckverlust an den Sumpfsieben“).“

12.2 Übertragbarkeit

Auch für SWR-Anlagen sind mögliche Quellen von Verunreinigungen so weit wie möglich zu minimieren.

12.3 Anforderungen für SWR-Anlagen

Die für DWR-Anlagen geltenden Anforderungen sind auch für SWR-Anlagen anzuwenden.

Der Nachweis der Anlagensauberkeit ist für den gesamten Sicherheitsbehälter, also auch für die KoKa und deren Kühlkreislauf zu erbringen.

Die Sauberkeit der Rückhaltevorrichtungen ist zu gewährleisten.

Anlage 2

Effekte durch Verunreinigungen, wie beispielsweise Druckverlust erhöhungen an den Rückhalteeinrichtungen oder chemische Reaktionen sind in der Nachweisführung zu berücksichtigen.

13 Anlageninterne Notfallmaßnahmen

13.1 Anforderungen für DWR-Anlagen

In [/RSK04/](#) wird hierzu ausgeführt:

„Um die Kernkühlung bei nicht auslegungsgemäßigem Verhalten im Sumpfbetrieb bei einem Kühlmittelverluststörfall zu gewährleisten, sind Maßnahmen der Sicherheitsebene 4 (anlageninterne Notfallmaßnahmen) vorzusehen, die einen sich ggf. aufbauenden unzulässigen Druckverlust über die Siebe ausreichend begrenzen bzw. reduzieren ohne die Kernkühlung zu gefährden. Die anlageninternen Notfallmaßnahmen sind so auszulegen, dass der Druckverlust am Sumpfsieb auf zulässige Werte begrenzt werden kann, wobei es nicht zu einer nennenswerten Erhöhung der Penetration und des Kerneintrags kommen darf. Für die Einleitung und Durchführung dieser anlageninternen Notfallmaßnahmen sind Kriterien nur aufgrund von Messungen vorzusehen, die auch nach einem 2F-Kühlmittelverluststörfall verfügbar sind. Kriterien und Maßnahmen sind im Notfallhandbuch zu beschreiben.“

13.2 Übertragbarkeit

Auch bei SWR-Anlagen ist ein unzulässiger Druckaufbau über die Siebe zu vermeiden. Deshalb sind Notfallmaßnahmen zur Begrenzung/Reduzierung der Druckverluste an den Sieben vorzusehen.

13.3 Anforderungen für SWR-Anlagen

Die für DWR-Anlagen geltenden Anforderungen sind auch für SWR-Anlagen anzuwenden. Es sollte allerdings formuliert werden: „... sind Maßnahmen der Sicherheitsebene 4 (anlageninterne Notfallmaßnahmen) vorzusehen, die den Druckverlust über die Siebe auf Werte unterhalb der Auslegungsgrenze begrenzen bzw. reduzieren. Dabei ist die Kernkühlung auch während dieser Notfallmaßnahmen sicherzustellen.“

Es ist zu nachzuweisen, dass für den auslegungsgemäßen Störfallablauf die Auslegungswerte der Rückhalteeinrichtungen nicht überschritten werden. Falls dieser Nachweis nicht möglich ist, sind auch für SWR-Anlagen die Anforderungen aus [/RSK08/](#) zur Begrenzung und Reduzierung der Druckverluste an den Rückhaltevorrichtungen anzuwenden.

14 Anforderungen an Maßnahmen zur Begrenzung/Reduzierung von Druckdifferenzen an den Sieben der Not- und Nachkühl-pumpen

14.1 Anforderungen für DWR-Anlagen

Wenn im Auslegungsfall eine Überschreitung der Eingreifwerte für die Druckdifferenzen an den Sumpfsieben nicht ausgeschlossen werden kann, dann sind für DWR-Anlagen die folgenden Anforderungen an die Maßnahmen zur Begrenzung/Reduzierung der Druckverluste an den Sumpfsieben zu erfüllen [/RSK08/](#):

„Bei der Auslegung von Maßnahmen zur Begrenzung/Reduzierung von Druckdifferenzen an den Sumpfsieben sind folgende Anforderungen zu beachten:

- (1) Die Wirksamkeit der Maßnahmen ist für die zu unterstellenden Randbedingungen experimentell nachzuweisen. Sollte ein Rückspülen notwendig sein, muss diese Maßnahme wiederholbar sein.*
- (2) Zur Überwachung der Druckdifferenz an den Sumpfsieben sind zwei für den Einsatzfall qualifizierte und störfallfeste Instrumentierungen je Ansaugkammer vorzusehen. Die aktuellen Werte der Druckdifferenz sind auf der Warte anzuzeigen und zur Trenderkennung aufzuzeichnen. Bei Überschreiten vorgegebener Druckdifferenzen (Eingreifwerte) ist eine Meldung auszulösen.*
- (3) Die Messwerte für Druck und Temperatur im Sumpf bzw. in der Ansaugleitung sind zur Erkennung eines hinreichenden Abstandes zur Kavitation der Nachkühlpumpen zur Nachverfolgung aufzuzeichnen.*
- (4) Für die Maßnahmen sind Prozeduren festzulegen und es sind Kriterien für die Vorbereitung, Durchführung und Wirksamkeitskontrolle zu definieren sowie Detailanweisungen für die Ausführung und Überwachung der Maßnahmen zu erstellen. Diese sind in das Betriebshandbuch aufzunehmen.*
- (5) Um eine hohe Zuverlässigkeit der Nachwärmeabfuhr auch bei der Durchführung von Maßnahmen zur Beseitigung von Sumpfsiebelägen zu erhalten und im Primärkreis einen Füllstandsabfall zu vermeiden, sollen diese so geplant werden, dass nicht alle Nachkühlpumpen gleichzeitig abgeschaltet werden müssen. Mindestens eine Nachkühlpumpe muss weiterbetrieben und z. B. für Einspeisung und Nachwärmeabfuhr genutzt werden.*
- (6) Die verfügbaren und die erforderlichen Zeiten für die Maßnahmen zur Beseitigung der Sumpfsiebeläge und die Wiederinbetriebnahme der Nachkühlung sind zu ermitteln*

und auszuweisen. Die erforderliche Zeit soll im Verhältnis zu der Zeit für die die Pumpen abgeschaltet werden dürfen, ausreichend bemessen sein.

- (7) Die Maßnahmen müssen unter Ansatz des Einzelfehlerkonzeptes die ungünstigste Kombination der gemäß Auslegung mindestens verfügbaren Nachkühlstränge oder Rückspülmöglichkeiten berücksichtigen.*
- (8) Alle erforderlichen Einrichtungen müssen für den Einsatzzweck geeignet sein und sind wiederkehrend zu prüfen.*
- (9) Maßnahmen, die eine Unterbrechung des Sumpfbetriebes beinhalten, sind so zu planen, dass bis zur Wiederaufnahme des Sumpfbetriebs die Voralarmkriterien hinsichtlich des Füllstandes im RDB nicht erreicht werden und die Kernaustrittstemperatur nicht über die Sättigungstemperatur ansteigt.*
- (10) Für den auslegungsüberschreitenden Fall, dass während der Durchführung der Maßnahmen zur Beseitigung der Sumpfsiebeläge Voralarmkriterien erreicht werden, sind entsprechende Übergänge vom Schutzziel- BHB in das NHB mit diesbezüglichen Maßnahmen des anlageninternen Notfallschutzes vorzusehen.*
- (11) Die Festigkeit der Sumpfsiebe sowie der Unterstützungs- und Betonstrukturen bei dem Lastfall Rückspülen muss gewährleistet sein.”*

14.2 Übertragbarkeit

Auch für SWR-Anlagen ist sicherzustellen, dass die Eingreifwerte für die Druckdifferenzen an den Sieben der Not- und Nachkühlpumpen nicht überschritten werden. Wenn mit der Nachweisführung grenzwertüberschreitende Druckdifferenzen an den Sieben der Not- und Nachkühlpumpen im Auslegungsfall nicht ausgeschlossen werden können, dann sind Maßnahmen zur Reduzierung/Begrenzung der Druckverluste entsprechend [/RSK08/](#) vorzusehen.

14.3 Anforderungen für SWR-Anlagen

Der Begriff „Sumpfsieb“ ist durch „Siebe der Not- und Nachkühlpumpen“ zu ersetzen. Der Begriff „Sumpfsiebeläge“ ist durch „Beläge an den Sieben der Not- und Nachkühlpumpen“ zu ersetzen. Folgende Anforderungen sind zu modifizieren:

Zu (2): Zur Überwachung der Druckdifferenz an den Sieben sind pro Sieb „zwei für den Einsatzfall qualifizierte und störfallfeste Instrumentierungen [...] vorzusehen. Die aktuellen Werte der Druckdifferenz sind auf der Warte anzuzeigen und zur Trenderkennung aufzuzeichnen. Bei Überschreiten vorgegebener Druckdifferenzen (Eingreifwerte) ist eine Meldung auszulösen.“ [/RSK08/](#)

Zu (3): Die Messwerte für Druck und Temperatur im SAR (nur SWR69) und in der KoKa sind aufzuzeichnen und ein hinreichender Abstand zur Kavitationsfreiheit der Not- und Nachkühl-pumpen ist sicherzustellen.

Zu (5): Die Nachwärmeabfuhr ist auch bei der Durchführung von Maßnahmen zur Beseiti-gung von Belägen an den Sieben der Not- und Nachkühlpumpen zu erhalten. Hierfür ist ein Füllstandsabfall unter die Oberkante der Brennelemente zu vermeiden. Die Maßnahme zur Begrenzung/Reduzierung der Druckverluste an den Sieben der Not- und Nachkühlpumpen sind entsprechend zu planen.

Zu (9): Maßnahmen, die eine Unterbrechung des Nachkühlbetriebes beinhalten, sind so zu planen, dass der Reaktorkern während der gesamten Maßnahme vollständig mit 2-phasigem Kühlmitte bedeckt bleibt. Es ist sicherzustellen, dass bis zur Wiederaufnahme des Not-und Nachkühlbetriebes keine Voralarmkriterien in Bezug auf die Kühlung und Nachwärmeabfuhr aus dem Kern und die Funktion von KoKa und SAR erreicht werden.

15 Zusammenfassung

Bei der Übertragung der Anforderungen aus den RSK-Stellungnahmen [/RSK04/](#) und [/RSK08/](#) auf SWR sind folgende Formulierungen anzupassen: Statt „Sumpf“ ist bei SWR zwischen SAR und KoKa zu unterscheiden. Statt „Sumpfsiebe“ ist bei SWR „Siebe“ zu verwenden. Die RSK-Anforderungen zum Nachweis der Beherrschung von KMV-Störfällen mit Isoliermaterialfreisetzung sind von DWR auf SWR in folgenden Punkten übertragbar:

- Leckort
- Freisetzung von Isoliermaterial und anderen Stoffen (Erweiterung um latente Verunreinigungen in der KoKa)
- Druckverlust an den Sumpfsieben
- Penetration von Isoliermaterial durch das Sieb
- Pumpenvordruck
- Komponenten im Nachkühlkreislauf
- Sauberkeit der Anlage
- Anlageninterne Notfallmaßnahmen
- Anforderungen an Maßnahmen zur Begrenzung/Reduzierung von Druckdifferenzen an den Sieben der Not- und Nachkühlpumpen

Neu zu formulieren sind folgende Anforderungen:

- Transport in den SAR und dampfgetragener Transport in die Koka
- Transport im SAR und in der KoKa und Überlauf vom SAR in die KoKa
- Druckverlust im Kern durch Eintrag von Isoliermaterial
- Langzeitverhalten

Aktuelle internationale Erkenntnisse weisen beim Langzeitverhalten und bei den Komponenten im Nachkühlkreislauf darauf hin, dass Ausfällungserscheinungen durch chemische Reaktionen oder Temperaturänderungen den Druckverlust im Kern durch Eintrag von Isoliermaterial negativ beeinflussen.

16 Literatur

- /KAE95/ Wenzel, H., Geiß, M. Ruppert, B., Blow-down Investigations on the Performance of Insulating Systems, KAEFER Isoliertechnik GmbH & Co. KG, B.I.G. V-32.608, August 1995
- /RSK04/ Stellungnahme, Anforderungen an den Nachweis der Notkühlwirksamkeit bei Kühlmittelverluststörfällen mit Freisetzung von Isoliermaterial und anderen Stoffen, Anlage 2 zum Ergebnisprotokoll der 374. Sitzung der RSK, RSK, 22.07.2004, <http://www.rskonline.de/downloads/stnsumpf.pdf>
- /RSK08/ Stellungnahme, Kühlmittelverluststörfälle mit Freisetzung von Isoliermaterial und anderen Stoffen in Druckwasserreaktoren – Ablösung der Ablagerungen auf den Sumpfsieben, Anlage 2 zum Ergebnisprotokoll der 406. Sitzung der RSK, RSK, 13.03.2008, <http://www.rskonline.de/downloads/sumpfsiebe.pdf>

Technische Notiz

ATHLET-Rechnungen zur
Nachwärmeabfuhr bei
Belegung der BE-
Abstandshalter mit
Isoliermaterial

A. Bröcker
W. Pointner

Dezember 2011
Auftrags-Nr.: 800028

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 2 | Randbedingungen für die Modellierung | 1 |
| 2.1 | Brennelement | 2 |
| 2.2 | Transport des Isoliermaterials und Ablagerung im Kern | 3 |
| 2.3 | Spezifische Druckverluste durch Belegung der unteren Abstandshalter | 4 |
| 2.4 | Druckverluste durch Einlagerung von Korrosionsprodukten | 4 |
| 3 | Datensatz-Modellierung | 5 |
| 3.1 | Anzahl verfügbarer Not- und Nachkühlsysteme..... | 5 |
| 3.2 | Spezifischer Druckverlust durch Belegung der unteren Abstandshalterebene | 5 |
| 3.3 | Druckverlustserhöhung durch Einlagerung von Korrosionsprodukten..... | 6 |
| 3.4 | Durchsatz durch den äußeren Bypass | 6 |
| 4 | TK + 4 TH, geschlossener äußerer Bypass, Korrosion | 7 |
| 4.1 | Analyseergebnis..... | 7 |
| 4.2 | Bewertung | 12 |
| 5 | 3 TH, geschlossener äußerer Bypass, Korrosion | 13 |
| 5.1 | Analyseergebnisse | 13 |
| 5.2 | Bewertung | 17 |
| 6 | TK + 4 TH, geschlossener äußerer Bypass, 25 kg/m² Belegung | 18 |
| 6.1 | Analyseergebnisse | 18 |
| 6.2 | Bewertung | 23 |
| 7 | 3 TH, geschlossener äußerer Bypass, 10-fache-Belegung | 24 |
| 7.1 | Analyseergebnisse | 24 |
| 7.2 | Bewertung | 30 |
| 8 | TK + 4TH, offener äußerer Bypass, Korrosion | 30 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 8.1 | Analyseergebnisse..... | 30 |
| 8.2 | Bewertung | 35 |
| 9 | 3 TH, offener äußerer Bypass, Korrosion | 36 |
| 9.1 | Analyseergebnisse..... | 36 |
| 9.2 | Bewertung | 40 |
| 10 | TK + 4 TH, offener äußerer Bypass, 31 kg/m²..... | 41 |
| 10.1 | Analyseergebnisse..... | 41 |
| 10.2 | Bewertung | 46 |
| 11 | 3 TH, offener äußerer Bypass, 10-fache Belegung | 46 |
| 11.1 | Analyseergebnisse..... | 46 |
| 11.2 | Bewertung | 52 |
| 12 | Zusammenfassung | 52 |
| 13 | Literatur..... | 55 |

1 Einleitung

Wenn bei einem Kühlmittelverluststörfall Isoliermaterial freigesetzt wird, so kann ein Teil dieses Isoliermaterials in den Kern gelangen. In der Nachweisführung ist also aufzuzeigen, dass auch bei der Ablagerung von Isoliermaterial im Kern die Kernkühlung gesichert ist.

Im Folgenden werden die Ergebnisse von ATHLET-Rechnungen bei verschiedenen Randbedingungen dargestellt. Verändert wurden die Randbedingung bzgl.:

- des Betriebs der Not- und-Nachkühlsysteme
- der Ablagerungsmenge von Isoliermaterial im Kern
- des Massenstroms durch den Kernbypass.

Als äußerer Bypass werden im Folgenden die Übergänge vom unteren Plenum zu den Steuerstabführungsrohren und die Übergänge vom Brennelementeintrittsplenum zum Kernbypass bezeichnet. Der Gesamtkernbypass ist die Summe aus dem auf diesem Weg resultierenden Massenstrom und dem Steuerstabspülwasser.

Störfallauslöser ist in allen Rechnungen ein 0,1F-Leck der Frischdampfleitung.

2 Randbedingungen für die Modellierung

Für Auslegungsstörfälle der Sicherheitsebene 3 gelten die Anforderungen entsprechend der Sicherheitskriterien für Kernkraftwerke, Modul 6. Die Nachzerfallsleistung wurde konservativ über die vereinfachte Gleichung nach Anhang A der DIN 25463-1 bestimmt und um 2σ (7 %) erhöht. Zusätzlich wurde die Nachzerfallsleistung auf 106 % Reaktorleistung bezogen.

Es wird keine Strömung durch den inneren Bypass (Wasserkasten) berücksichtigt. Eine Erklärung hierfür ist in den folgenden Sätzen beschrieben: „*Der anhand der Kernauslegungsrechnung ermittelte Widerstandsbeiwert ist erheblich höher als der*

anhand verfügbarer geometrischer Daten des Wasserkastens abgeschätzte Widerstandbeiwert.

Es ist davon auszugehen, dass die Kernausslegungsrechnung realistische Werte liefert. Deshalb müssen innerhalb des Wasserkastens Strukturen vorhanden sein, die eine deutliche Erhöhung des hydraulischen Widerstands gegenüber der Abschätzung für einen Wasserkasten mit Halterung am unteren Ende bewirken.

Solche Strukturen mit deutlich kleineren hydraulischen Durchmessern könnten zu einer Ablagerung von Isoliermaterial in den Wasserkästen führen.

Aus diesem Grund ist bei den Rechnungen zur gesicherten Kernkühlung bei Isoliermaterialablagerung an den Abstandshaltern ein verstopfter innerer Bypass anzunehmen.“

Nach 18 Tagen beträgt die Nachzerfallsleistung 0,41 %. Dieser Wert wird für Rechnungen mit Ablagerung von Korrosionsprodukten verwendet. Bei SWR-Anlagen treten Korrosionseffekte erst nach so langen Zeiträumen auf. Die Einlagerung von Korrosionsprodukten führt zu einer Erhöhung der Druckverluste über einen Filterkuchen.

In den Rechnungen wird der Kerneintrag von Isoliermaterial mit dem Start der Not- und Nachkühlpumpen modelliert. Der Kerneintrag erfolgt dann für eine Dauer von 3600 s. Während dieser Phase wird der Kern von unten durchströmt. Es wird deshalb eine Ablagerung des in den Kern eingetragenen Isoliermaterials an der untersten Abstandshalterebene angenommen. Die Ablagerung wurde gleichmäßig über die unterste Abstandshalterebene angenommen.

2.1 Brennelement

Für die Berechnung der mittleren freien Strömungsfläche eines Brennelementes wurden die Daten für ein ATRIUM 10B-Brennelement zu Grunde gelegt.

In den Analysen wurde eine etwas größere freie Strömungsfläche pro Brennelement von 100 cm² verwendet, da zum Beginn der Analysen keine genauen Angaben zur Geometrie der Brennelemente vorlagen. In den Rechnungen wird der innere Bypass als verschlossen modelliert und steht damit nicht als Ablagerungsfläche für Isoliermaterial zur Verfügung. Durch die Annahme einer etwas größeren freien Strömungsfläche der Brennelemente wird damit die Ablagerung pro Fläche reduziert und an den Wert bei geöffnetem inneren Bypass angenähert. Damit ist diese Näherung bei der

freien Strömungsfläche zulässig, um eine überkonservativ hohe Ablagerungsmenge pro Fläche zu vermeiden.

2.2 Transport des Isoliermaterials und Ablagerung im Kern

Für die Berechnung der Menge von an den Brennelementen abgelagertem Isoliermaterial wurden die in der folgenden Tab. 2-1 dargestellten Annahmen und Berechnungen durchgeführt.

Tab. 2-1 Transport von Isoliermaterial in den Kern

| | | |
|---|---------|------|
| Freisetzung | 80 | kg |
| Transport zur KoKa | 17,50 | % |
| Isoliermaterial in KoKa | 14,00 | kg |
| KoKa-Wasser-Inventar | 2500000 | kg |
| Einspeisung (TK+4*TH) | 1600 | kg/s |
| Notkühlphase I ohne Sedimentation | | |
| Dauer | 500 | s |
| Wasser-Austrag aus der KoKa | 800000 | kg |
| Isoliermaterialaustrag aus der KoKa | 4,48 | kg |
| Notkühlphase II mit Sedimentation | | |
| Isoliermaterial in der KoKa nach Notkühlphase I | 9,52 | kg |
| Sedimentation in Koka | 50 | % |
| Isoliermaterial-Austrag aus KoKa in Notkühlphase II | 4,76 | kg |
| Isoliermaterial-Austrag aus KoKa in Notkühlphase I+II | 9,24 | kg |
| Transport in den SAR | 20,00 | % |
| Isoliermaterialübertrag vom SAR in die KoKa (vom SAR-Eintrag) | 20,00 | % |
| Isoliermaterial-Austrag vom SAR zur KoKa | 3,20 | kg |
| Maximaler Kerneintrag = maximaler Austrag aus KoKa mit SAR-Übertrag | 12,44 | kg |
| | | |

| | | |
|-------------------------------|-----------|-------------------|
| Anzahl BE | 592 | |
| freie Strömungsfläche pro BE | 0,01 | m ² |
| Ablagerung pro BE | 21,013514 | g |
| Ablagerung pro m ² | 2,10 | kg/m ² |

Der maximale Kerneintrag beträgt 12,44 kg. Das entspricht bei gleichmäßiger Ablagerung über die 1. Abstandshalterebene einer Ablagerung von 21 g pro Brennelement und 2,1 kg/m².

2.3 Spezifische Druckverluste durch Belegung der unteren Abstandshalter

Für die Belegung der untersten Abstandshalterebene wurde eine kontinuierliche Ablagerung ab dem Start der Not- und Nachkühlsysteme bis zum jeweiligen maximalen Belegungswert modelliert. Für die Erhöhung des Druckverlustes über die Abstandshalter wurde der IPM Versuch zu Grunde gelegt, bei dem der höchste Druckverlust für belegte Abstandshalter gemessen wurde.

2.4 Druckverluste durch Einlagerung von Korrosionsprodukten

Durch die Einlagerung von Korrosionsprodukten kann es zu einer Erhöhung der Druckverluste kommen.

Beim ausgewählten Vattenfallversuch erhöhte sich der Druckverlust durch die Einlagerung von Korrosionsprodukten um einen Faktor von 9. Dieser Faktor wird auch in der Modellierung der Druckverlustserhöhung bei Einlagerung von Korrosionsprodukten mit ATHLET verwendet.

Da zu den Wirkungsmechanismen bei der Druckverlustserhöhung durch Einlagerung von Korrosionsprodukten bisher keine geschlossene Theorie besteht, sollten in der Nachweisführung konservative Annahmen verwendet werden. Das bedeutet für die Druckverluste die Verwendung des maximalen experimentell ermittelten Druckverlustes für Isoliermaterialablagerung und außerdem die Verwendung der maximalen Druckverlustserhöhung bei Einlagerung von Korrosionsprodukten.

3 Datensatz-Modellierung

Für die Rechnungen wurde ein Multikanal-Datensatz für KKP1 mit 56 Kernkanälen verwendet.

Die freie Brennelementfläche beträgt im Datensatz 100 cm². Die Ablagerung beträgt pro Brennelement 21 g. Das ergibt eine flächenspezifische Ablagerungsmenge von 2,1 kg/m². Für den inneren Bypass (Wasserkasten bzw. Wasserkreuz) wird in allen Rechnungen keine Durchströmung modelliert, da eine Verstopfung des inneren Bypasses nicht ausgeschlossen werden kann.

Folgende Parameter wurden variiert:

- Anzahl verfügbarer Nachkühlsysteme
- Belegung der unteren Abstandshalter
- Einlagerung von Korrosionsprodukten
- Durchsatz durch den äußeren Bypass

3.1 Anzahl verfügbarer Not- und Nachkühlsysteme

Es wurden Rechnungen mit allen 5 verfügbaren Not- und Nachkühlsystemen (1 TK-System, 4 TH-Systeme) durchgeführt oder entsprechend dem Einzelfehlerkonzept mit Einzelfehler und Reparaturfall mit 3 TH-Systemen.

3.2 Spezifischer Druckverlust durch Belegung der unteren Abstandshalterebene

Der Einfluss der Isoliermaterialablagerung auf die Durchströmung wird mit den „Clogging Model Data“ entsprechend [/ATL11/](#) nachgebildet.

Der Koeffizient für den spezifischen Druckverlust durch die Isoliermaterialablagerung FDPCLG wird nach der folgenden Formel ermittelt:

DPCLGJ =

$$\pm(\text{FDPCLG} * \text{RMCLG} * \eta_i * (1.0 + \text{FBOCLG} * \text{CBOR})) * (\text{ACLGC} * |\text{WLJ}|)^{\text{EWCLG}}$$

Der Druckverlust in einem Rohrleitungsabschnitt (hier also einem Node eines Kernkanals) wird im Analyseprogramm mit DPCLGJ beschrieben. Zur Berechnung von FDPCLG wird der IPM Versuch mit dem höchsten gemessenen Druckverlust herangezogen.

Für die ATHLET Analysen ergab sich für den spezifischen Druckverlust FDPCLG ein Wert von $6,75 \text{ E } +7$ ohne Einfluss von Korrosionsprodukten.

3.3 Druckverlusthöhung durch Einlagerung von Korrosionsprodukten

Für die Erhöhung des Druckverlustes über eine belegte Abstandshalterebene durch Einlagerung von Korrosionsprodukten in den Filterkuchen wird entsprechend Kap. 2.3 der Faktor 9 angenommen.

Mit der Einlagerung von Korrosionsprodukten erhöht sich der Wert für den spezifischen Druckverlust FDPCLG auf $6,00 \text{ E } +8$.

3.4 Durchsatz durch den äußeren Bypass

Bei den Rechnungen mit offenem Kernbypass bleiben die Öffnungsfläche vom unteren Plenum zum Steuerstabführungsrohr und die Öffnungsfläche vom Brennelementeintrittsplenum zum Kernbypass bei 100 %.

Bei den Rechnungen mit geschlossenem äußerem Bypass werden mit Störfalleintritt die Öffnungsfläche vom unteren Plenum zum Steuerstabführungsrohr und die Öffnungsfläche vom Brennelementeintrittsplenum zum Kernbypass von 100 % auf 0 % reduziert.

4 TK + 4 TH, geschlossener äußerer Bypass, Korrosion

4.1 Analyseergebnis

Die Randbedingungen der Analyse sind in Abb. 4-1 dargestellt.

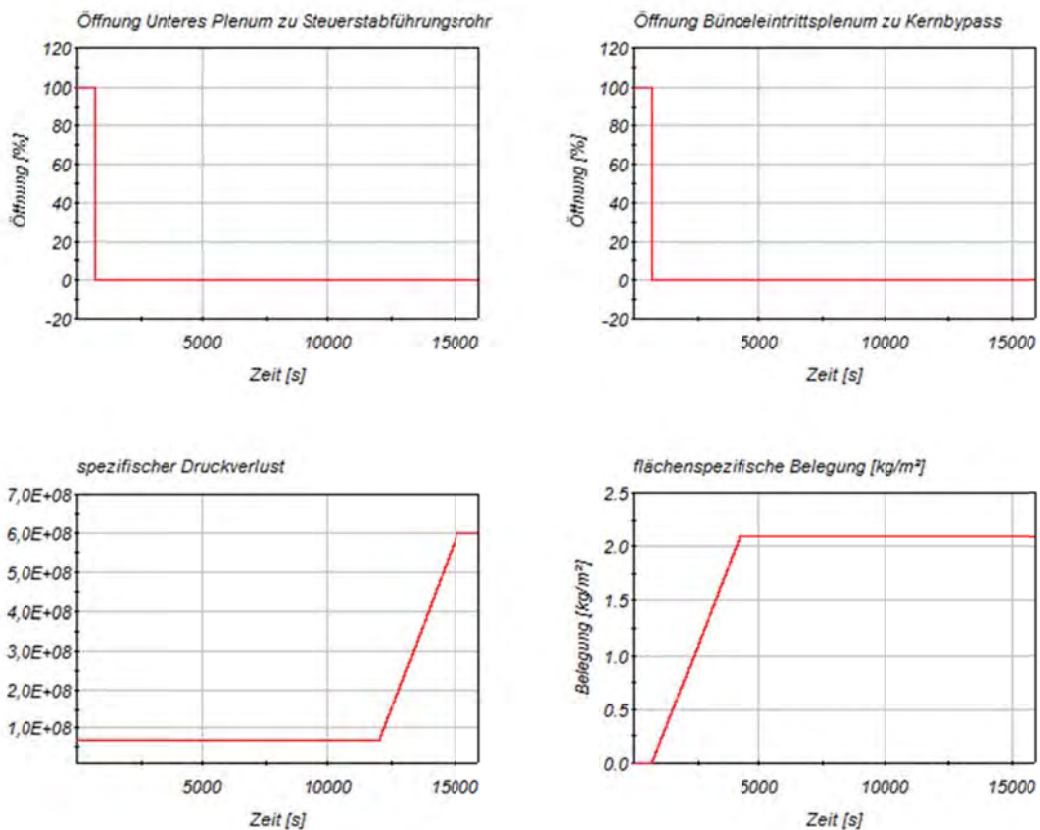


Abb. 4-1 Randbedingungen

Das Leck wird bei 600 s geöffnet. Die Öffnung zwischen unterem Plenum und Steuerstabführungsrohr und die Öffnung zwischen Bündel Eintrittsplenum und Kernbypass werden nach 700 s geschlossen. Damit ist der äußere Bypass ab diesem Zeitpunkt geschlossen. Ab 700 s bis 4300 s erfolgt die Belegung der untersten Abstandshalter auf 2,1 kg/m². Ab 12000 s beginnt die Erhöhung des spezifischen Druckverlustes durch Korrosionseffekte um den Faktor 9.

Die Not- und Nachkühlsysteme TK, TH, TJ und TM sind in Abb. 4-2 dargestellt.

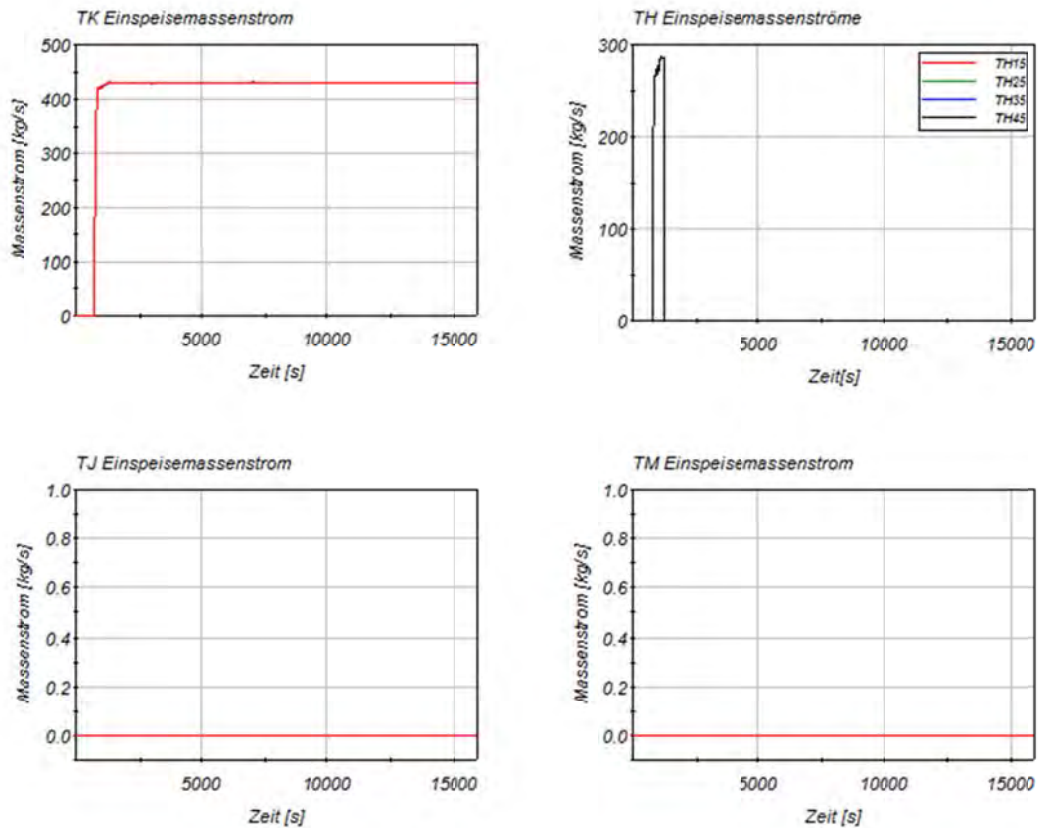


Abb. 4-2 Not- und Nachkühlsysteme

Alle 5 Not- und Nachkühlsysteme sind verfügbar. Die Systeme TJ und TM werden nicht aktiviert. Das TK-System speist ab Störfallbeginn kontinuierlich in den RDB ein. Die 4 TH-Systeme speisen in der Notkühlphase I ein. In der Notkühlphase II werden die TH-Systeme in der Betriebsweise „KoKa-Kühlen“ betrieben. Die Systeme TJ und TM werden nicht angefordert.

Der Zustand von RDB und SHB wird in Abb. 4-3 dargestellt.

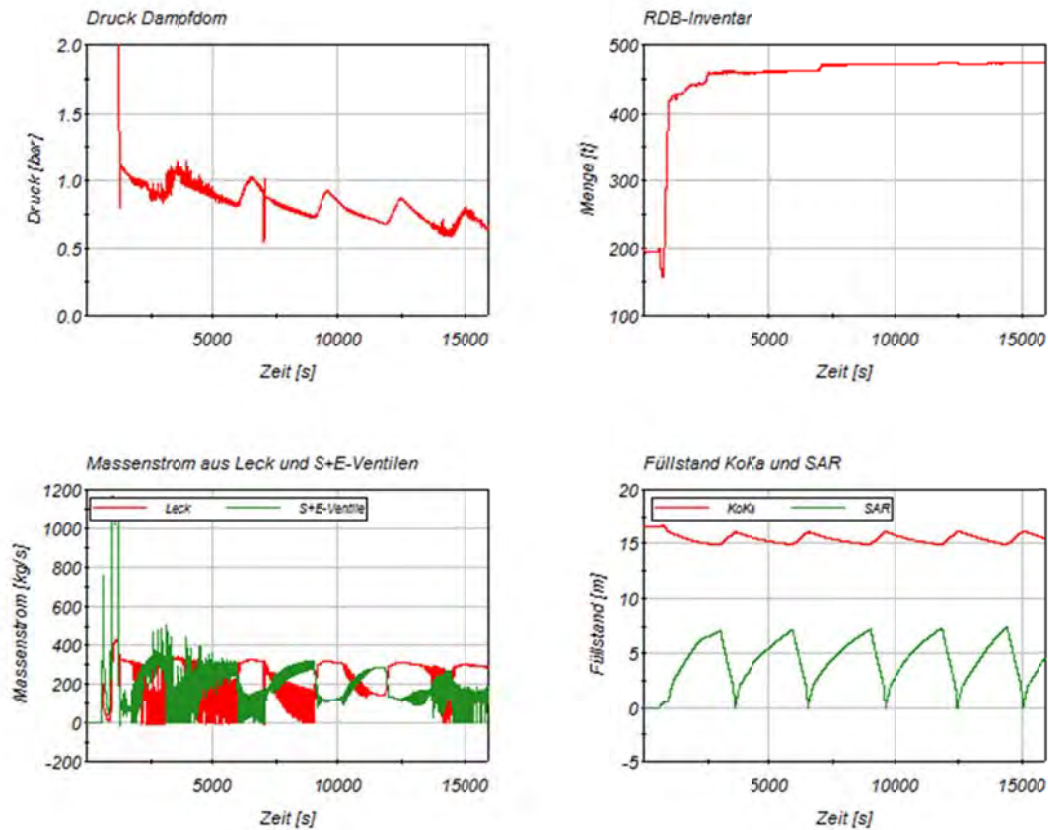


Abb. 4-3 Zustand von RDB und SHB

Mit dem Eintritt des KMV-Störfalls bei 600 s sinkt der Druck im Dampfdom innerhalb von 300 s unter 2 bar ab.

Mit Beginn der Notkühleinspeisung steigt das Kühlmittelinventar im RDB auf langfristig über 450 t an.

In der Notkühlphase II strömen langfristig ca. 420 kg/s über das Leck und die S&E-Ventile ab.

Der Füllstand im SAR schwankt zwischen den Werten für Start und Ende der Rückförderung in die Koka (Füllstand 0 entspricht nicht dem Boden der SAR, sondern die Höhenkoordinate bei der der Füllstand im SAR angezeigt wird). Entsprechend steigt bei Beginn der Rückförderung der KoKa-Füllstand und sinkt dann wieder nach dem Abschalten der Rückförderung.

Der Zustand des zentralen Brennelements am oberen Ende und des Kernbypasses ist in Abb. 4-4 dargestellt.

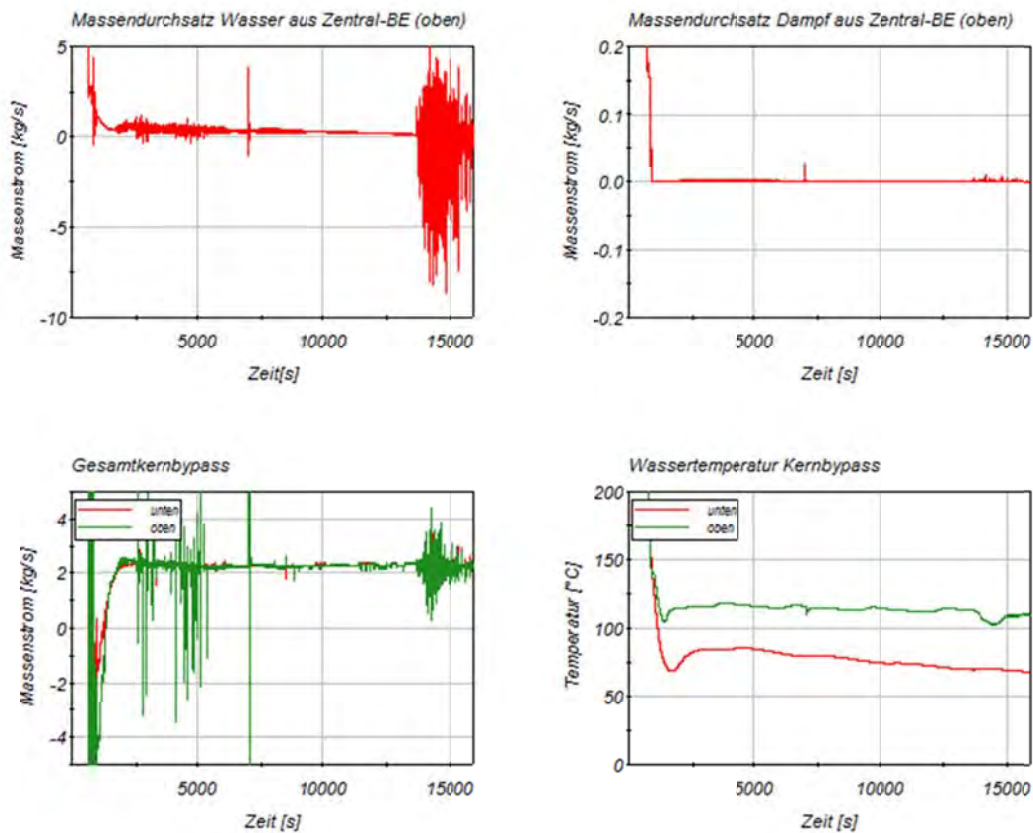


Abb. 4-4 Charakterisierung von BE-Austritt und Kernbypass

Am oberen Ende des zentralen Brennelements sinkt der Massenstrom zwischen 600 s nach Störfalleintritt bis ca. 13.000 s auf kleiner 1 kg/s ab. Ab diesem Zeitpunkt oszilliert der Massenstrom zwischen 5 kg/s und -10 kg/s. In dieser Phase wechseln also Wassereintrüche in das Brennelement von oben und Abströmung nach oben durch Dampfproduktion im Kern ab. Die Dampfausströmung oszilliert während dieser Phase ebenfalls, allerdings mit sehr kleinen Massenströmen.

Infolge der vollständigen Belegung der Öffnungen zum Kernbypass beträgt der Massenstrom durch den Kernbypass langfristig ca. 2 kg/s.

Ab 2000 s werden durch das Wasser im Kernbypass mit einer Aufwärmspanne von 40 K und einem Massenstrom von 2 kg/s etwa 340 kW Nachwärme abgeführt.

Der Zustand des zentralen Brennelements ist in Abb. 4-5 dargestellt.

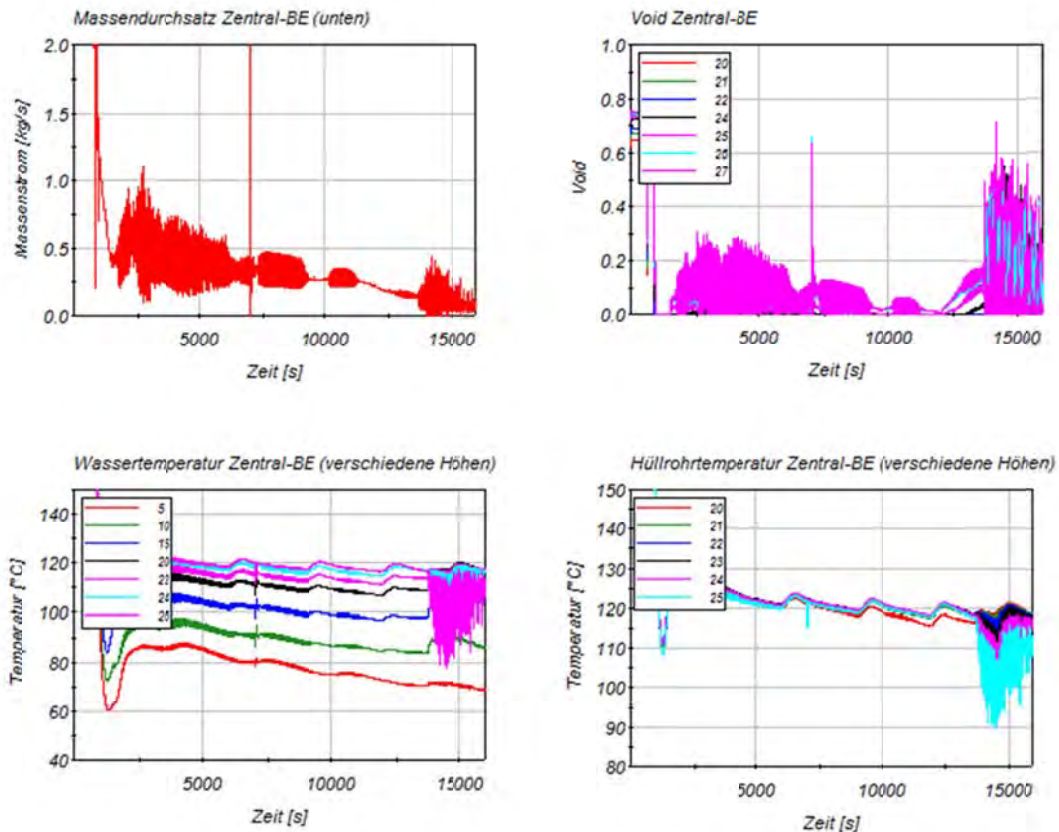


Abb. 4-5 Zentral-Brennelement

Der Massendurchsatz durch das zentrale Brennelement geht schnell nach Störfallbeginn auf deutlich unter 0,3 kg/s zurück. Der Dampfgehalt im oberen Bereich des zentralen Brennelements (Node 27) schwankt zunächst bis ca. 12.000 s mit geringer werdender Amplitude. Mit der Erhöhung der Druckverluste infolge von Korrosion (13.000 s) schwankt dann der Dampfgehalt im oberen Bereich des zentralen Brennelements bis zu einer Amplitude von ca. 0,7. Die Amplitude nimmt mit der Reduzierung der Nachzerfallsleistung wieder ab. Nach der Einlagerung der Korrosionsprodukte werden pro Brennelement bei einem Massenstrom zum Brennelement von 0,1 kg/s durch Aufheizung ca. 17,6 kW abgeführt. Diese Wärmemenge entspricht zusammen mit der Wärmeabfuhr über den Kernbypass nahezu der Nachzerfallsleistung. Die restliche Nachzerfallsleistung wird über Verdampfung bzw. Wassereintrich von oben abgeführt.

Die Wassertemperatur im zentralen Brennelement nimmt für alle Nodes ab, wobei die Temperatur im unteren Bereich des Brennelements stärker sinkt als im oberen Bereich.

Die Hüllrohrtemperatur des zentralen Brennelements zeigt einen ähnlichen Verlauf wie die Wassertemperatur. Die Temperaturspitzen nach unten bei ca. 13.000 s zeigen die Wassereinbrüche von oben in Folge des unterkühlten Wassers im oberen Plenum durch das Kernsprühsystem.

4.2 Bewertung

Bei einer Belegung der untersten Abstandhalterebene mit $2,1 \text{ kg/m}^2$ und der Erhöhung des spezifischen Druckverlustes um den Faktor 9 durch Einlagerung von Korrosionsprodukten wird bei Verfügbarkeit von TK und allen 4 TH-Systemen:

- zunächst durch die 5 verfügbaren Einspeisesysteme der RDB aufgefüllt
- danach wird das RDB-Inventar durch die Einspeisung mit TK nahezu konstant halten
- mit der Erhöhung der Druckverluste durch die Einlagerung von Korrosionsprodukten in den Filterkuchen wird die Durchströmung der Brennelemente soweit reduziert, dass der Dampfgehalt in den Brennelementen auf bis zu ca. 0,7 ansteigt. In dieser Phase kommt es zur Verdampfung aus dem oberen Bereich der Brennelemente und zu oszillierenden Wassereinbrüchen in die Brennelemente von oben. Wassertemperatur und Hüllrohrtemperatur im oberen Bereich der Brennelemente oszillieren dann mit Temperatureinbrüchen von ca. 40 °C bzw. 30 °C . Die Nachwärmeabfuhr ist durch den Transport mit dem Zweiphasengemisch und die Wassereinbrüche gewährleistet.

Mit Beginn der Einlagerung von Korrosionsprodukten beträgt die Nachzerfallsleistung 11 MW. Über die Brennelemente werden etwa 10,5 MW abgeführt und über den Bypass 0,34 MW. Damit ist die Nachwärmeabfuhr gesichert.

5 3 TH, geschlossener äußerer Bypass, Korrosion

5.1 Analyseergebnisse

Die Randbedingungen der Analyse sind in Abb. 4-1 dargestellt.

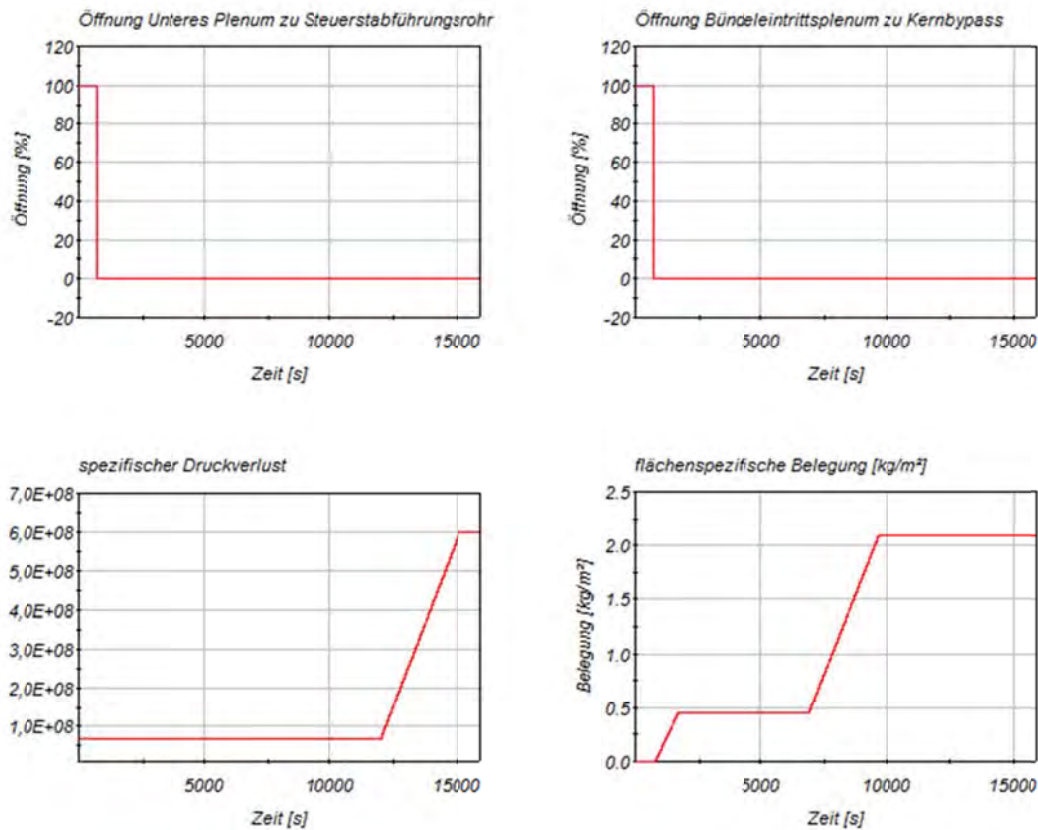


Abb. 5-1 Randbedingungen

Nach Beginn des Leckstörfalls bei 700 s wird der äußere Bypass vollständig geschlossen.

Die maximale Ablagerung an Isoliermaterial beträgt $2,1 \text{ kg/m}^2$. Dabei erfolgt die Ablagerung von Isoliermaterial nur während der Einspeisung in den RDB beim Betrieb der 3 TH-Pumpen in der Notkühlphase I und dann während der Einspeisung in den RDB in der Notkühlphase II beim Betrieb von TH10.

Bei 12.000 s erhöht sich der spezifische Druckverlust infolge von Korrosionsprodukten durch eine Erhöhung des spezifischen Druckverlustes um den Faktor 9. Gleichzeitig wird die Nachzerfallsleistung abgesenkt auf 0,41 % (entspricht 18 Tage).

Die Not- und Nachkühlsysteme TK, TH, TJ und TM sind in Abb. 5-2 dargestellt.

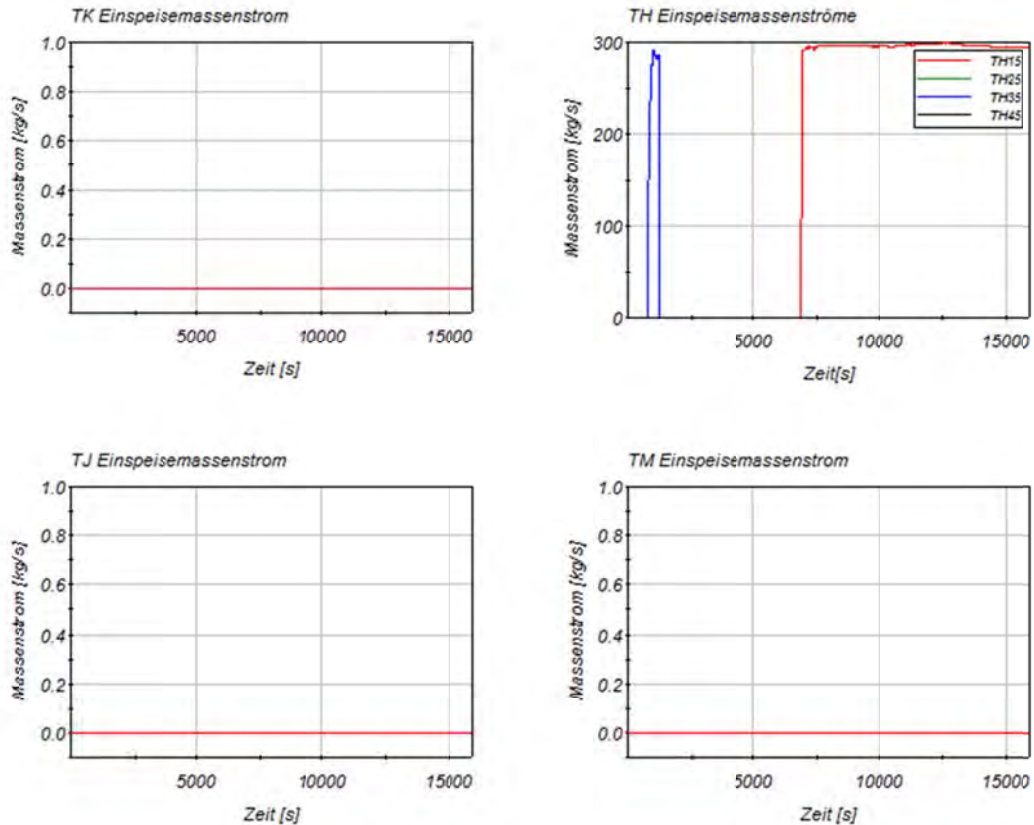


Abb. 5-2 Not- und Nachkühlsysteme

Die Systeme TH10, TH20 und TH30 stehen zur Verfügung. TH40 und TK stehen entsprechend dem Einzelfehlerkriterium nicht zur Verfügung.

Die Systeme TH10, TH20 und TH30 bespeisen in der Notkühlphase I den RDB. In der Notkühlphase II wird der RDB über TH10 bespeist.

TJ und TK werden nicht angefordert.

Der Zustand von RDB und SHB wird in Abb. 5-3 dargestellt.

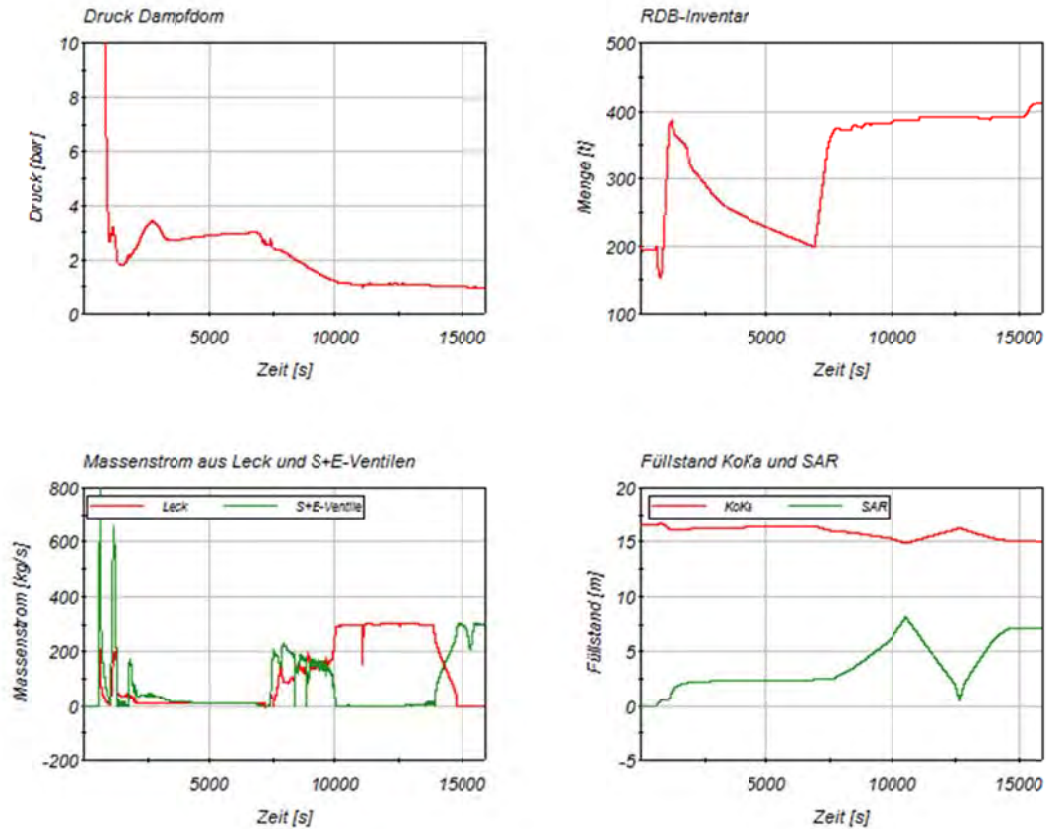


Abb. 5-3 Zustand von RDB und SHB

Der Druck im Dampfdom des RDB sinkt zunächst schnell auf einen Wert von ca. 3 bar. Ab 10.000 s sinkt der Druck dann weiter auf ca. 1 bar.

In der Notkühlphase I wird der RDB-Füllstand angehoben. Dabei wird das Inventar des RDB auf ca. 400 t angehoben und sinkt dann bis 7.000 s auf 200 t ab. Infolge des niedrigen RDB-Füllstandes startet TH10 erneut und bespeist den RDB. Dabei wird das Inventar ab ca. 7.000 s wieder auf 400 t angehoben und dann mit dem Weiterbetrieb von TH10 auch auf diesem Wert gehalten.

Die Ausströmung aus dem Leck und über die S&E-Ventile nimmt bis zum erneuten Start von TH10 ab, um danach auf etwa 300 kg/s zu stagnieren.

Mit der Rückförderung aus dem SAR steigt der Koka-Füllstand und sinkt dann nach Abschalten der Rückförderung wieder langsam ab.

Der Zustand des zentralen Brennelements am oberen Ende und des Kernbypasses ist in Abb. 5-4 dargestellt.

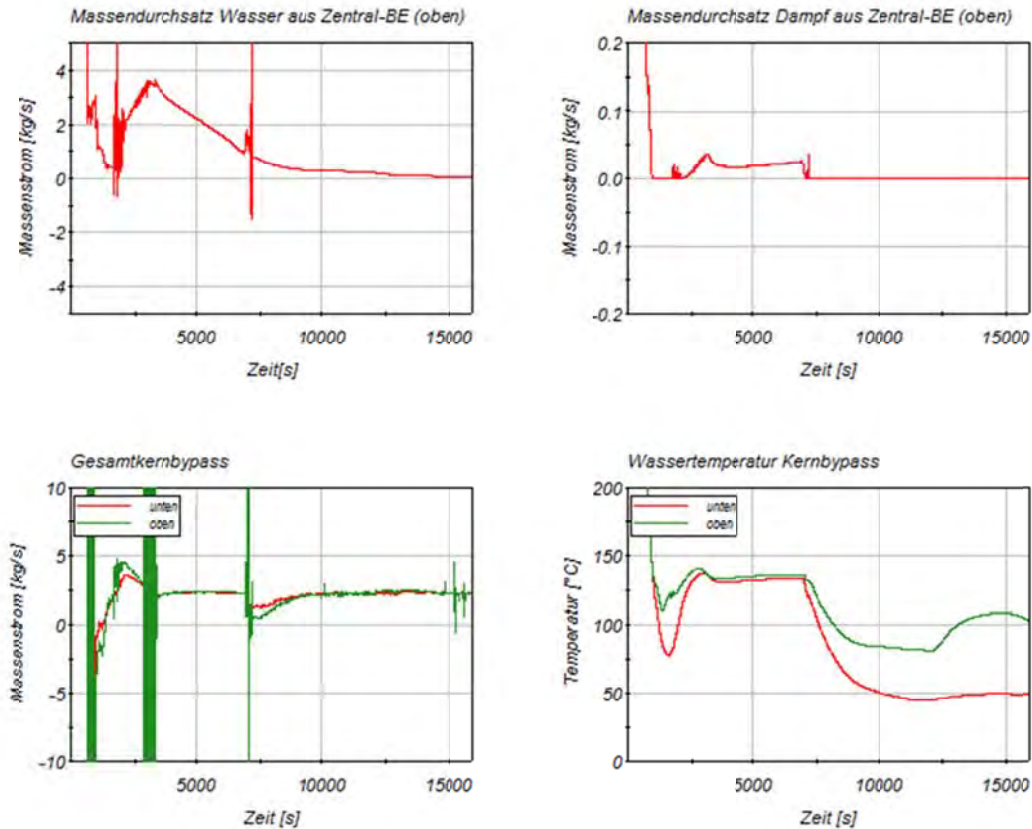


Abb. 5-4 Charakterisierung von BE-Austritt und Kernbypass

Der Massendurchsatz durch das zentrale BE sinkt kontinuierlich ab auf einen sehr kleinen Wert. Während der Phase zwischen dem ersten Abschalten der TH-Pumpen und dem erneuten Start von TH10 wird Dampf gebildet. Nach dem erneuten Start von TH10 und der Einspeisung in den RDB erfolgt keine Dampfausströmung.

Während des Ausdampfens zwischen 700 s und 7.000 s steigen die Wassertemperaturen im Kernbypass unten und oben entsprechend dem Sättigungsdampfdruck auf ca. 140 °C an. Mit Beginn der Einspeisung über TH10 ab 7.000 s sinkt dann die Temperatur im Kernbypass ab. Der Anstieg der Temperaturdifferenz über den Kernbypass ist durch den Wärmeeintrag aus dem Brennelement bedingt. Mit einem Massenstrom von 2 kg/s und einer Aufwärmspanne von 50 K wird eine Wärmeleistung von ca. 420 kW über den Gesamtkernbypass abgeführt, d.h. etwa 0,7 kW pro Brennelement.

Der Zustand des zentralen Brennelements ist in Abb. 5-5 dargestellt.

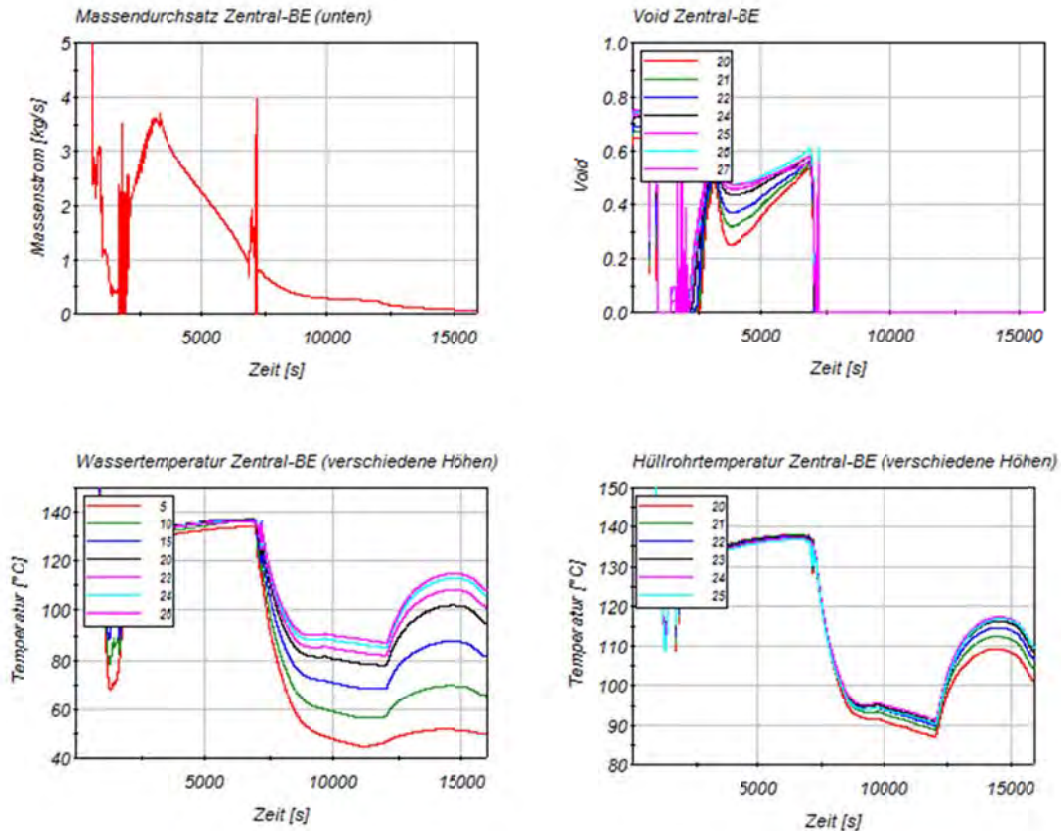


Abb. 5-5 Zentral-Brennelement

Der Massendurchsatz durch das zentrale Brennelement sinkt ab ca. 4.000 s stark ab auf ca. 0,07 kg/s. Mit einer Aufwärmspanne von ca. 60 K wird dadurch eine Leistung von ca. 18 kW pro Brennelement abgeführt. Damit kann die Nachzerfallsleistung nur durch Aufheizung des Kühlmittels im Brennelement abgeführt werden. Im zentralen Brennelement befindet sich in der Notkühlphase II nach Wiedereinschaltung von TH10 nur Wasser. Die Wassertemperatur und die Hüllrohrtemperatur im zentralen Brennelement sinken in der Notkühlphase II langfristig ab.

5.2 Bewertung

Bei einer Belegung der untersten Abstandhalterebene mit 2,1 kg/m² und einer Erhöhung des spezifischen Druckverlustes um den Faktor 9 durch Einlagerung von Korrosionsprodukten wird bei Verfügbarkeit von 3 TH-Systemen:

- in der Notkühlphase I durch die 3 verfügbaren TH-Systeme der RDB aufgefüllt

- danach sinkt der Füllstand durch das Ausdampfen des RDB über Leck und S&E-Ventile
- in der Notkühlphase II startet ein TH-System und überspeist dann langfristig das Leck, ab diesem Zeitpunkt ist der Kern vollständig mit Wasser bedeckt und es erfolgt eine Aufheizung des Wassers im zentralen BE um maximal 60 K,
- mit der Ablagerung von Korrosionsprodukten und der Absenkung der Nachzerfallsleistung sinkt der Durchsatz durch die Brennelemente und der Durchsatz durch den Kernbypass beginnt leicht zu schwanken, die Nachwärmeabfuhr erfolgt das einphasige Kühlmittel in den Brennelementen.

Mit Beginn der Einlagerung von Korrosionsprodukten beträgt die Nachzerfallsleistung 11 MW. Über die Aufheizung des in die Brennelemente einströmenden Kühlmittels werden 10,5 MW abgeführt und über den Bypass 0,42 MW. Damit ist die Nachwärmeabfuhr gesichert.

6 TK + 4 TH, geschlossener äußerer Bypass, 25 kg/m² Belegung

6.1 Analyseergebnisse

Die Randbedingungen der Analyse sind in Abb. 6-1 dargestellt.

Anlage 3

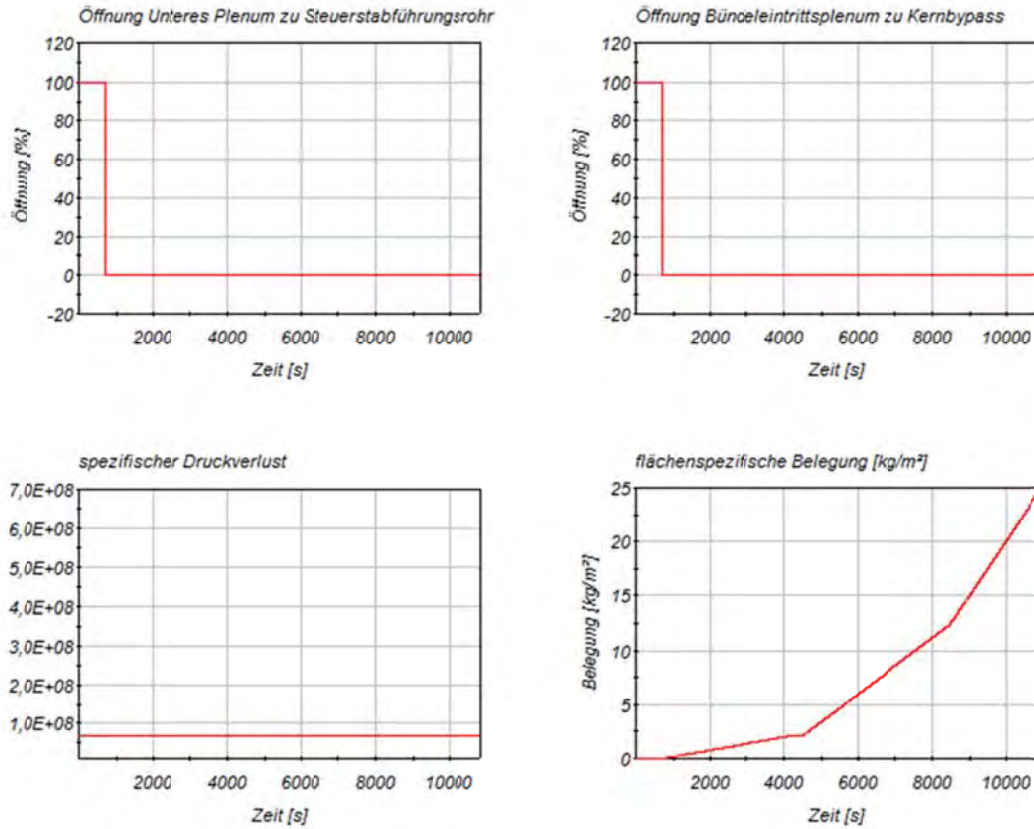


Abb. 6-1 Randbedingungen

Kurz nach Beginn des Störfalls bei ca. 620 s wird der äußere Bypass geschlossen. Mit dem Start der Notkühlphase I steigt die Belegung der Abstandshalter zunächst bis 2,1 kg/m² und dann in zwei Phasen weiter bis auf 25 kg/m².

Eine Druckverlusterhöhung durch die Einlagerung von Korrosionsprodukten wird nicht untersucht.

Die Not- und Nachkühlsysteme TK, TH, TJ und TM sind in Abb. 6-2 dargestellt.

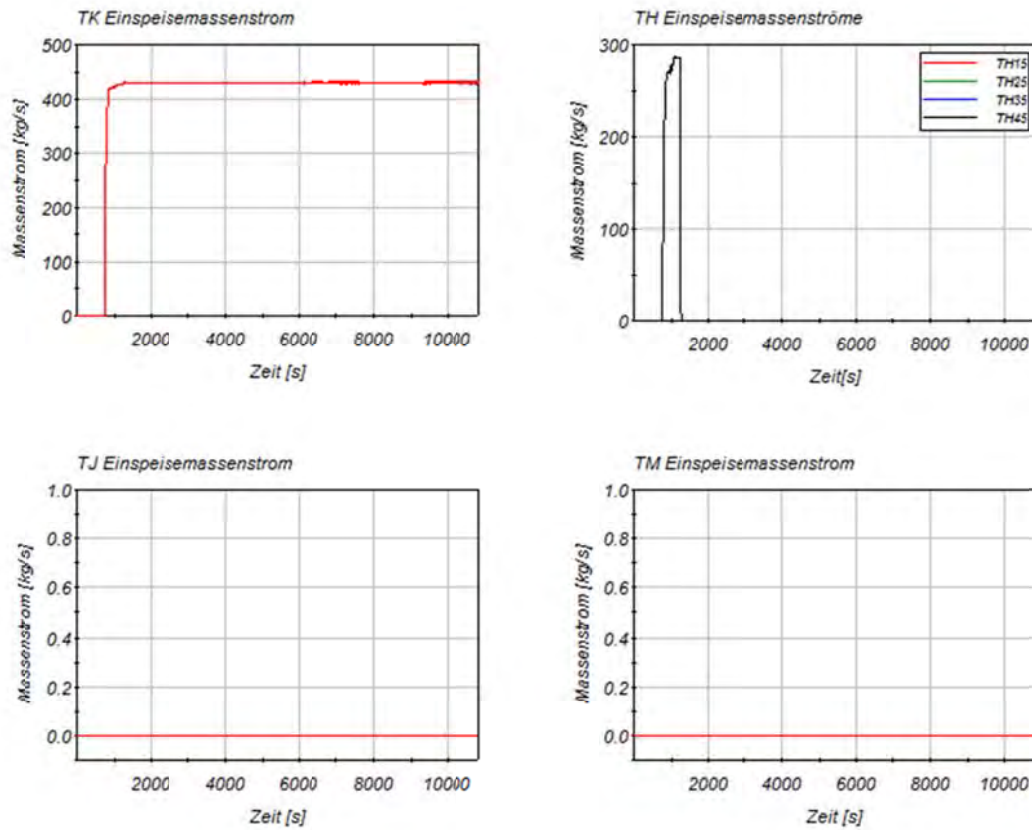


Abb. 6-2 Not- und Nachkühlsysteme

In der Notkühlphase I erfolgt die Einspeisung in den RDB mit TK und allen 4 TH-Systemen. Mit dem Ende der Notkühlphase I erfolgt die RDB-Bespeisung dann nur mit TK.

Der Zustand von RDB und SHB wird in Abb. 6-3 dargestellt.

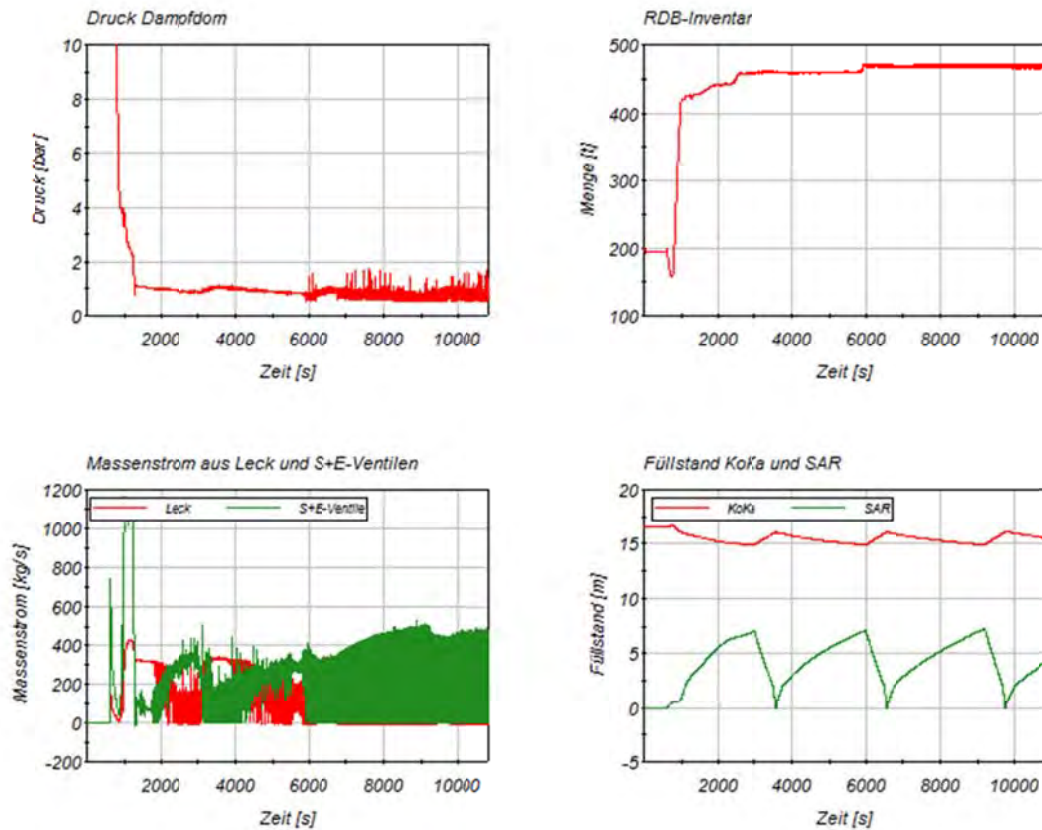


Abb. 6-3 Zustand von RDB und SHB

Der Druck im Dampfdom sinkt schnell auf ca. 1 bar ab. Das RDB-Inventar beträgt schnell ca. 470 t und wird langfristig auf diesem Wert gehalten.

Entsprechend der Bespeisung mit ca. 430 kg/s über TK beträgt der Massenstrom über Leck und S+E-Ventile in Summe ca. 430 kg/s.

Ein Intervall für die Rückförderung aus dem SAR in die KoKa und den Füllstandsanstieg nach Beenden der Rückförderung beträgt ca. 3.000 s.

Der Zustand des zentralen Brennelements am oberen Ende und des Kernbypasses ist in Abb. 6-4 dargestellt.

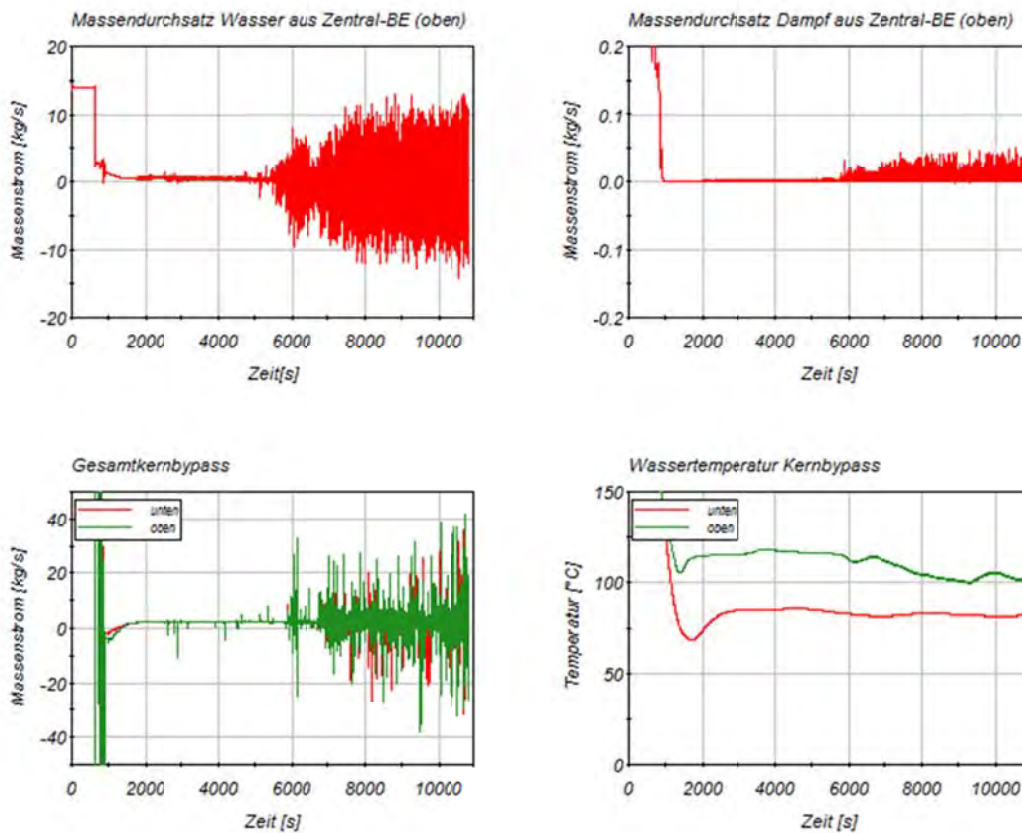


Abb. 6-4 Charakterisierung von BE-Austritt und Kernbypass

Zum Zeitpunkt 5000 s wird bei einem Gesamtkernbypass von ca. 2,5 kg/s und einer Temperaturdifferenz von 35 K eine Leistung von 360 kW abgeführt. Dies entspricht 0,6kW pro Brennelement.

Mit Beginn der sehr starken Belegung der Abstandshalter beginnen die Oszillation des Massenstroms durch die Brennelemente und des Dampfmassenstromes am Austritt der Brennelemente. Auch der Gesamtkernbypass oszilliert ab diesem Zeitpunkt. Die Wassertemperatur am Austritt des Kernbypasses sinkt während dieser Phase leicht ab.

Der Zustand des zentralen Brennelements ist in Abb. 6-5 dargestellt.

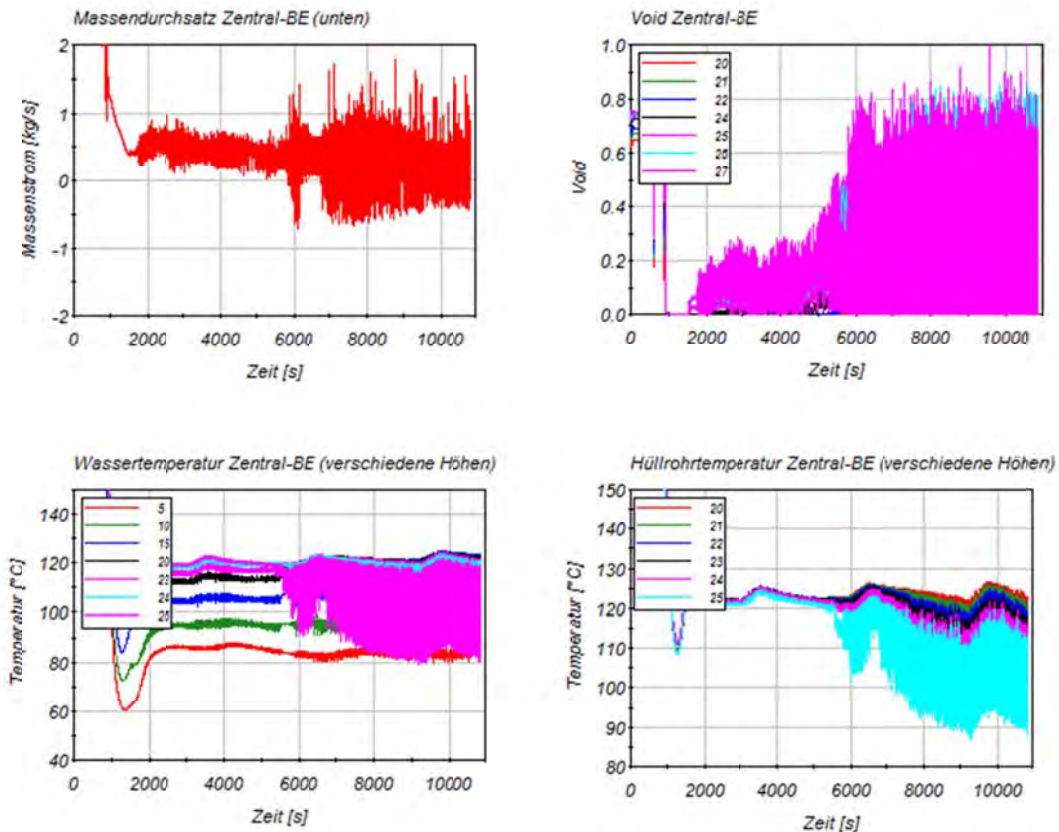


Abb. 6-5 Zentral-Brennelement

Mit der stark steigenden Belegung der Abstandshalter bildet sich ein Dampfgehalt von bis zu 0,9 im oberen Bereich der Brennelemente. Die Wassertemperatur und die Hüllrohrtemperatur beginnen mit den oszillierenden Wassereinbrüchen ebenfalls zu oszillieren, steigen aber im Maximum kaum an.

Zum Zeitpunkt 5000 s wird bei einem Massendurchsatz von im Mittel 0,45 kg/s abgeschätzt und bei einer Temperaturdifferenz des Wassers im zentralen Brennelement von ca. 35 K werden langfristig pro Brennelement ca. 66 kW abgeführt. Dies entspricht für den gesamten Kern etwa 38 MW.

6.2 Bewertung

Die Nachwärmeabfuhr erfolgt bei einer Belegung mit 2,1 kg/m² überwiegend durch die Aufheizung des Wassers in den Brennelementen.

Nach der vollständigen Belegung der Abstandshalter mit 25 kg/m^2 ist die Berechnung der abgeführten Leistung über die Brennelemente und den Kernbypass wegen der starken Oszillationen nur eingeschränkt möglich. Die Hüllrohrtemperaturen im zentralen Brennelement zeigen aber, dass die Nachwärme abgeführt wird.

7 3 TH, geschlossener äußerer Bypass, 10-fache-Belegung

7.1 Analyseergebnisse

Die Randbedingungen der Analyse sind in Abb. 7-1 dargestellt.

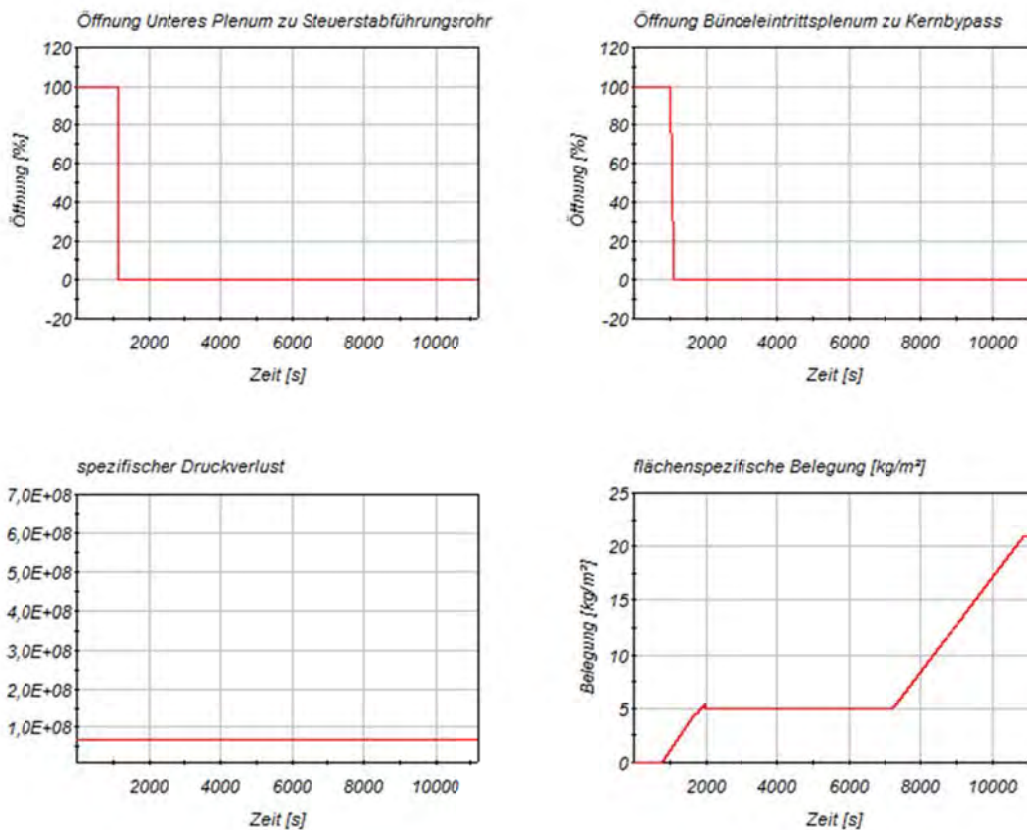


Abb. 7-1 Randbedingungen

Der äußere Bypass wird kurz nach Lecköffnung bei ca. 1,100 s geschlossen, also ca. 500 s nach Störfalleintritt. Die Belegung der Abstandshalter erfolgt zunächst bis zu 5 kg/m^2 und dann mit Beginn der Einspeisung über TH10 weiter bis zu 21 kg/m^2 . Die

Anlage 3

Belegung beträgt also das 10-fache der entsprechend der GRS-Analysen zu erwartenden maximalen Belegungsmenge.

Es erfolgt keine Erhöhung des spezifischen Druckverlustes durch Einlagerung von Korrosionsprodukten.

Die Not- und Nachkühlsysteme TK, TH, TJ und TM sind in Abb. 7-2 dargestellt.

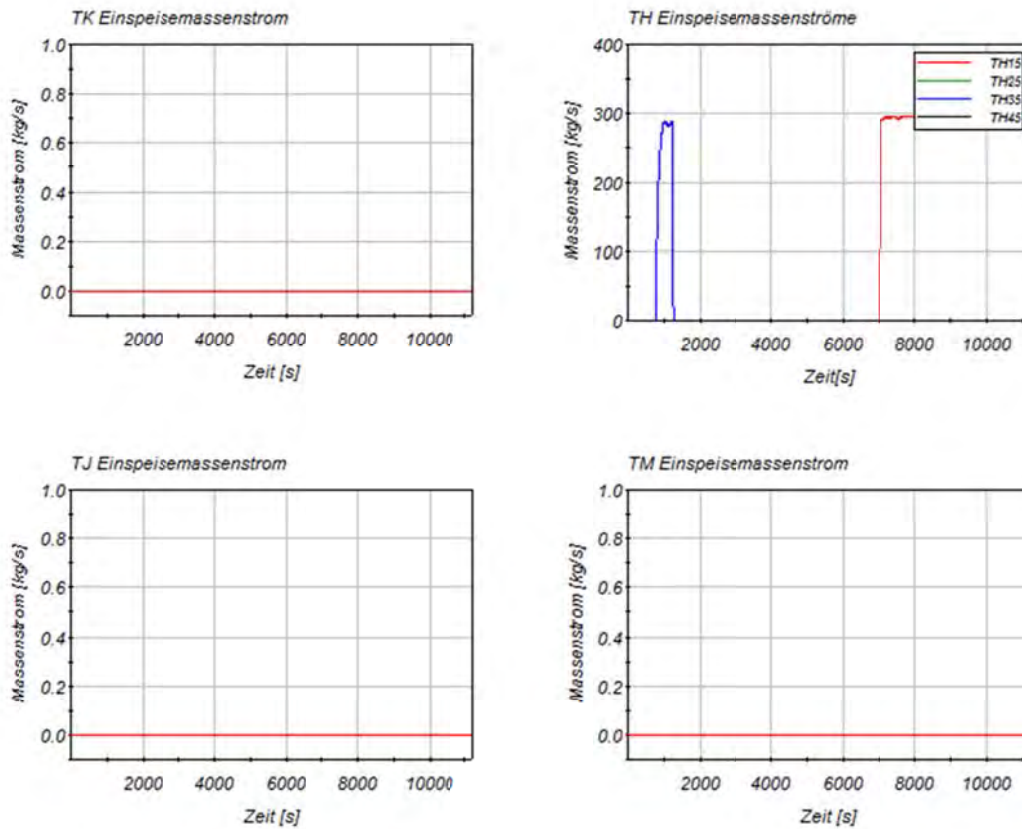


Abb. 7-2 Not- und Nachkühlsysteme

Nach Eintritt des Störfalls speisen in der Notkühlphase I TH10, TH20 und TH30 in den RDB. Nach Absinken des RDB-Füllstandes (RDB-Inventar ca. 200 t) speist dann TH10 langfristig in den RDB.

TJ und TM werden nicht angefordert.

Der Zustand von RDB und SHB wird in Abb. 7-3 dargestellt.

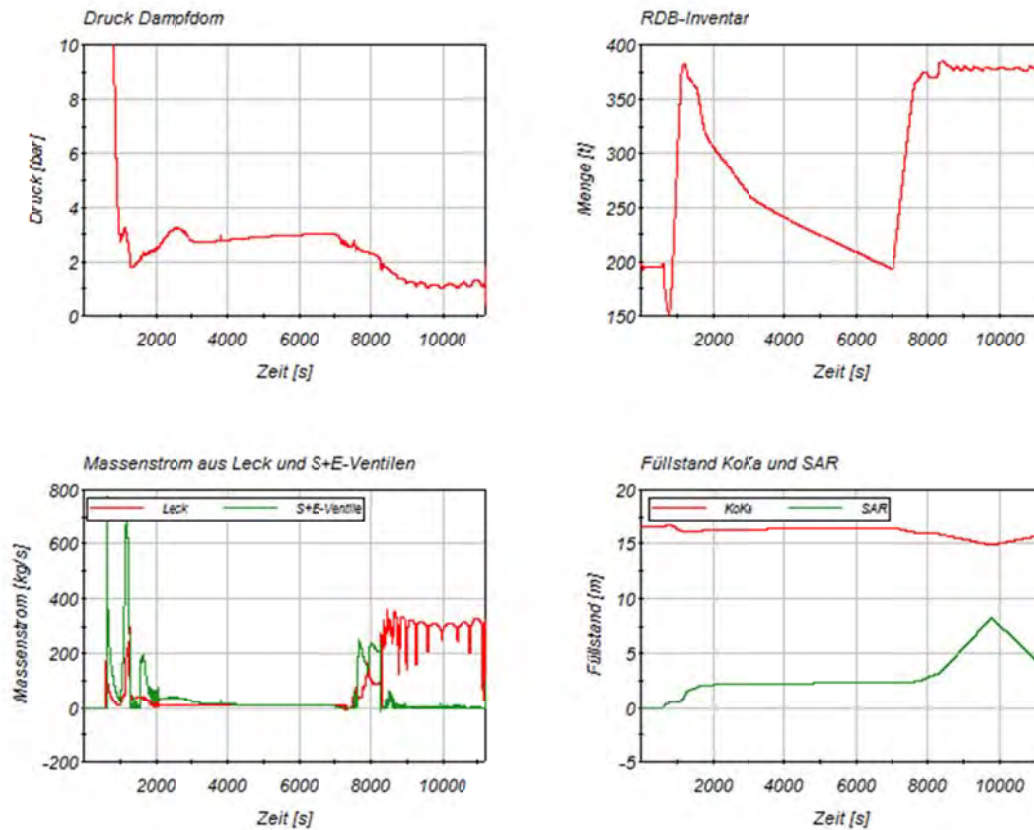


Abb. 7-3 Zustand von RDB und SHB

Während der Notkühlphase I fällt der Druck im Dampfdom zunächst auf ca. 2 bar. Mit Beginn der Notkühlphase II stabilisiert sich der Druck im Dampfdom bei ca. 3 bar und sinkt mit der Einspeisung in den RDB über TH10 bei etwa 7000 s auf ca. 1 bar ab. Während der Notkühlphase I wird der RDB aufgefüllt (RDB-Inventar ca. 380 t) und sinkt dann wieder ab bis zum Start der Einspeisung über TH10. Mit der langfristigen Einspeisung über TH10 wird der Füllstand wieder angehoben und das RDB-Inventar beträgt ca. 380 t.

Der Massenstrom über Leck und S&E-Ventile beträgt während der Phase ohne RDB-Bespeisung ca. 7 kg/s. Nach dem Auffüllen des RDB über TH10 erfolgt eine Abströmung über das Leck mit ca. 300 kg/s entsprechend der Einspeisung über TH10.

Mit dem steigenden Massenstrom über das Leck nach dem Start von TH10 steigt der Füllstand im SAR. Der Füllstand im SAR sinkt mit der Rückförderung in die KoKa, deren Füllstand dann entsprechend steigt.

Der Zustand des zentralen Brennelements am oberen Ende und des Kernbypasses ist in Abb. 7-4 dargestellt.

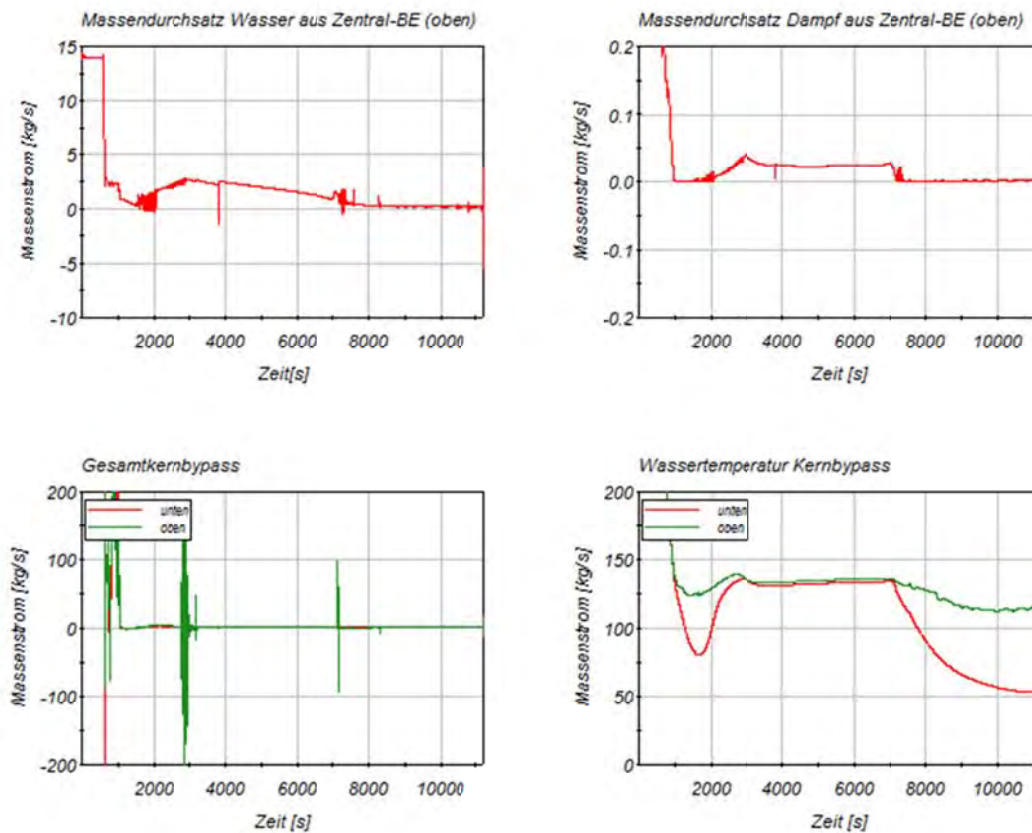


Abb. 7-4 Charakterisierung von BE-Austritts und Kernbypass

Während der Phase ohne Bespeisung des RDB beträgt der Massendurchsatz durch das zentrale Brennelement ca. 2,5 kg/s. Die Aufwärmung über das Brennelement beträgt ca. 3 K und damit wird eine Leistung von 31 kW abgeführt. Die restliche Nachzerfallsleistung wird durch Verdampfung von Wasser abgeführt.

Mit der Belegung auf bis zu 21 kg/m² beträgt der Massenstrom an Wasser durch das zentrale Brennelement etwa 0,2 kg/s. Bei einer Aufwärmung von 65 K werden dann 54 kW abgeführt. Damit kann die gesamte Nachzerfallsleistung nicht mehr durch Aufheizung des Kühlmittels im Brennelement angeführt werden. Dies führt ab 8500 s zur Dampfbildung im Kern.

Während der Phase ohne Bespeisung des RDB beträgt die Temperatur im Kernbypass ca. 140 °C (Sättigungstemperatur). Mit Beginn der Einspeisung über TH10 sinkt die Temperatur im Kernbypass, insbesondere am Brennelement eintritt.

Der Gesamtkernbypass beträgt im Mittel ca. 2,2 kg/s, im oberen Bereich oszilliert der Kernbypassmassenstrom. Bei einer Aufheizung von ca. 70 K werden 645 kW über den Bypass abgeführt, das entspricht pro Brennelement etwa 1,1 kW.

Der Zustand des zentralen Brennelements ist in Abb. 7-5 dargestellt.

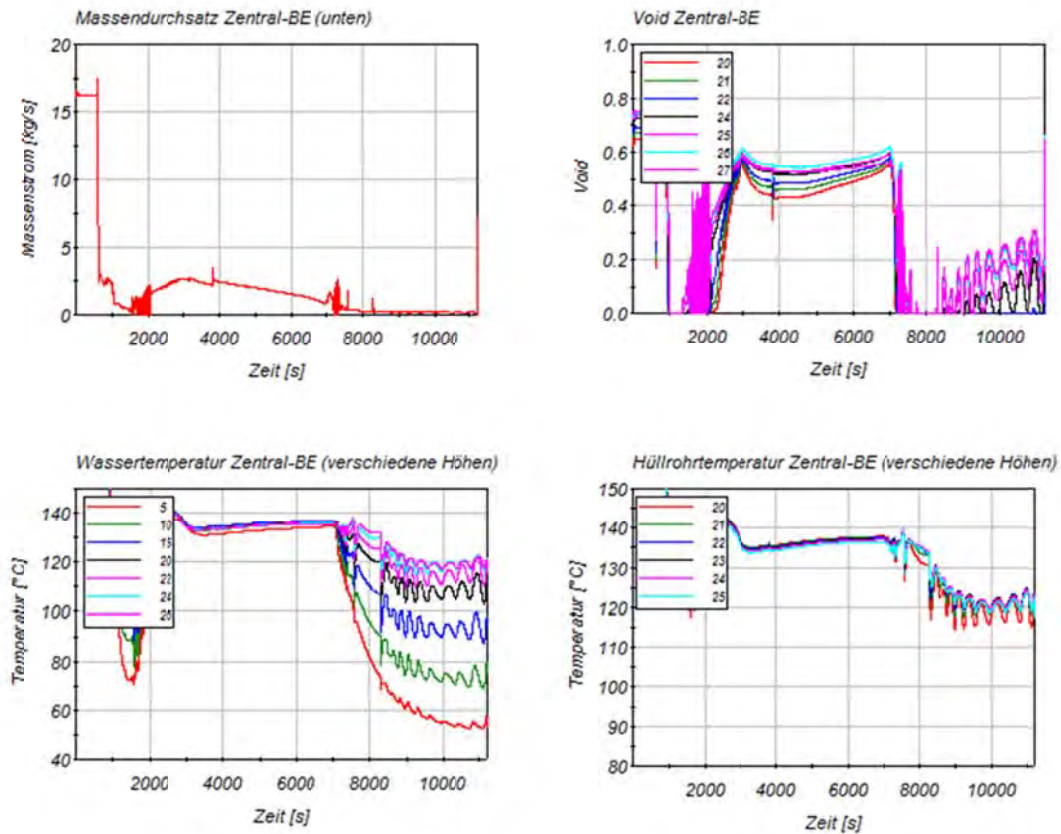


Abb. 7-5 Zentral-Brennelement

Während der Phase ohne RDB-Bespeisung beträgt der Massendurchsatz durch das zentrale Brennelement ca. 2,5 kg/s, der Dampfgehalt im oberen Bereich der Brennelemente 0,6. Die Wassertemperatur und die Hüllrohrtemperatur steigen in dieser Phase nur minimal, entsprechend dem Sättigungsdruck.

Mit Beginn der Belegung der Abstandshalter bis 21 kg/m² sinkt der Massendurchsatz durch die Brennelemente auf im Mittel 0,2 kg/s, der Dampfgehalt im oberen Bereich der Brennelemente beginnt zu oszillieren. Die Wassertemperatur und die Hüllrohrtemperatur sinken weiter entsprechend dem Sättigungsdruck ab und schwanken um ca. 10 °K.

7.2 Bewertung

Bei geschlossenem äußeren Bypass und einer Belegung der Abstandshalter bis zu 21 kg/m^2 werden von den $36,6 \text{ MW}$ Nachwärmeleistung 32 MW über den Wärmestrom an Wasser durch die Brennelemente und $0,65 \text{ MW}$ über den Kernbypass abgeführt. Die Differenz führt zu einer geringfügigen Dampfbildung. Mit der Belegung bis zu 21 kg/s ist die Nachwärmeabfuhr über die Durchströmung von unten und oszillierende Wassereinbrüche von oben in den Kern gesichert.

8 TK + 4TH, offener äußerer Bypass, Korrosion

8.1 Analyseergebnisse

Die Randbedingungen der Analyse sind in Abb. 8-1 dargestellt.

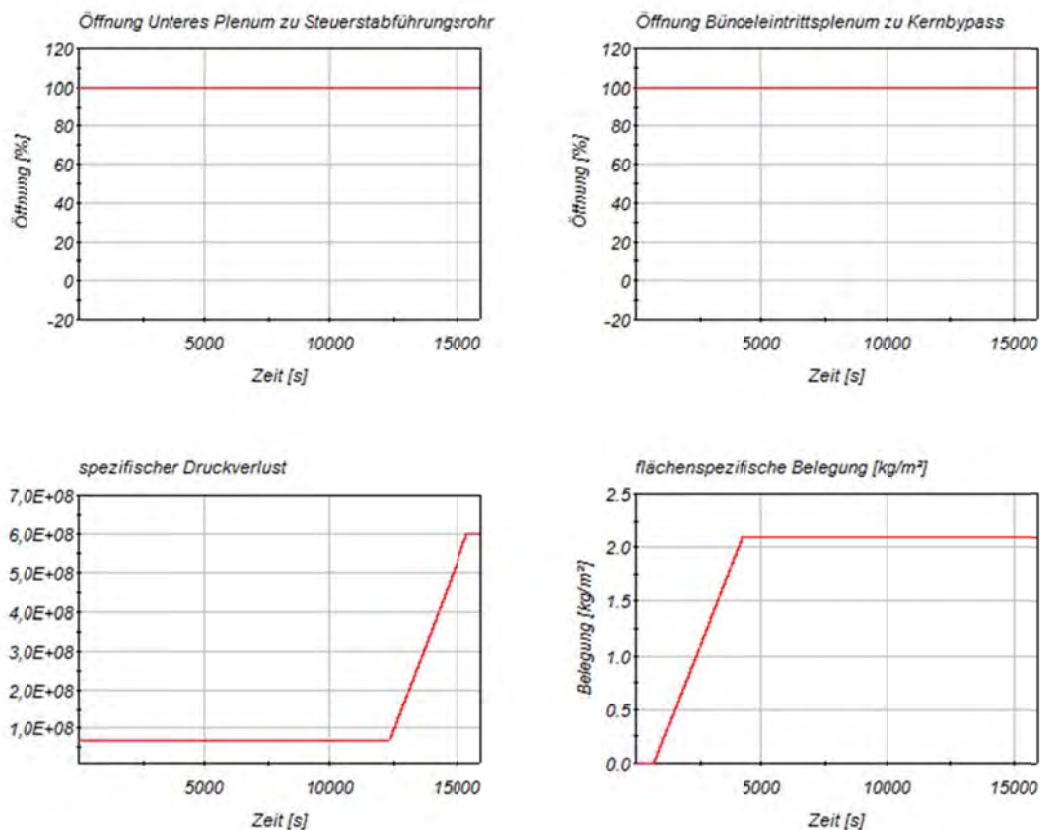


Abb. 8-1 Randbedingungen

Anlage 3

Der äußere Bypass bleibt während des Störfalls geöffnet.

Mit der Notkühlphase I startet die Belegung der Abstandhalter bis zu einem Wert von $2,1 \text{ kg/m}^2$. Durch die Einlagerung von Korrosionsprodukten steigt der spezifische Druckverlust über die Abstandshalter um den Faktor 9 ab 120000 s.

Die Not- und Nachkühlsysteme TK, TH, TJ und TM sind in Abb. 8-2 dargestellt.

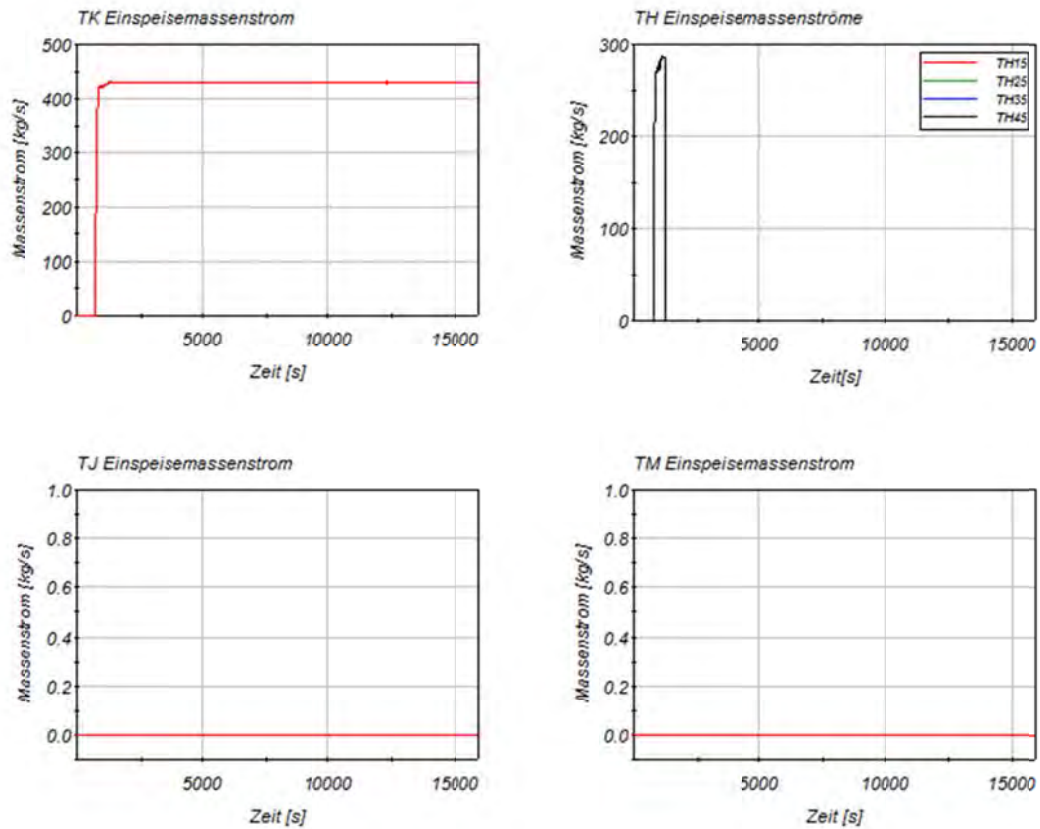


Abb. 8-2 Not- und Nachkühlsysteme

Das TK-System und die 4 TH-Systeme sind verfügbar. Während der Notkühlphase I speisen TK und die 4 TH-Systeme in den RDB ein. Die 4 TH-Systeme beenden die Einspeisung in den RDB mit dem Ende der Notkühlphase I. TK speist auch in der Notkühlphase II in den RDB ein.

Die System TJ und TM werden nicht angefordert.

Der Zustand von RDB und SHB wird in Abb. 8-3 dargestellt.

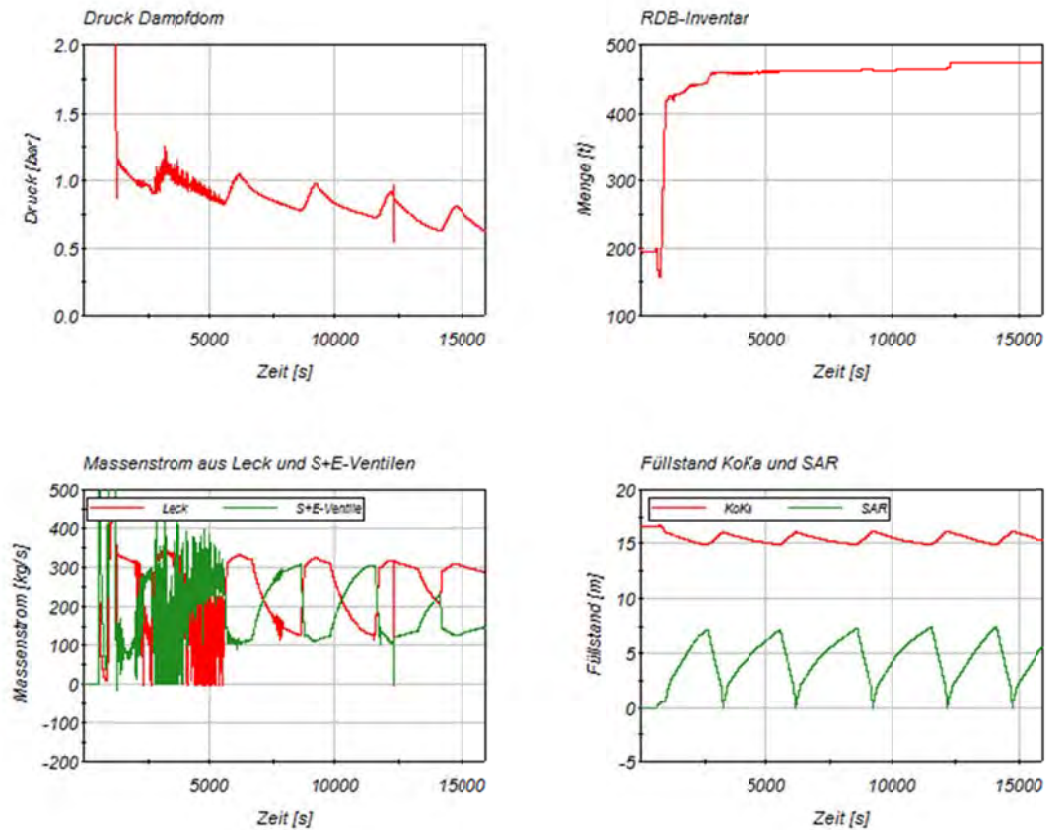


Abb. 8-3 Zustand von RDB und SHB

Während der Notkühlphase I und II sinkt der Druck im Dampfdom auf 1 bar.

Die Rückförderung vom SAR in die KoKa verläuft mit einer Periode von ca. 2.500 s. Der Gesamtmassenstrom über das Leck und die S+E-Ventile beträgt ca. 430 kg/s. Dieser entspricht ungefähr der Einspeisung über TK in der Notkühlphase II.

Der Zustand des zentralen Brennelements am oberen Ende und des Kernbypasses ist in Abb. 8-4 dargestellt.

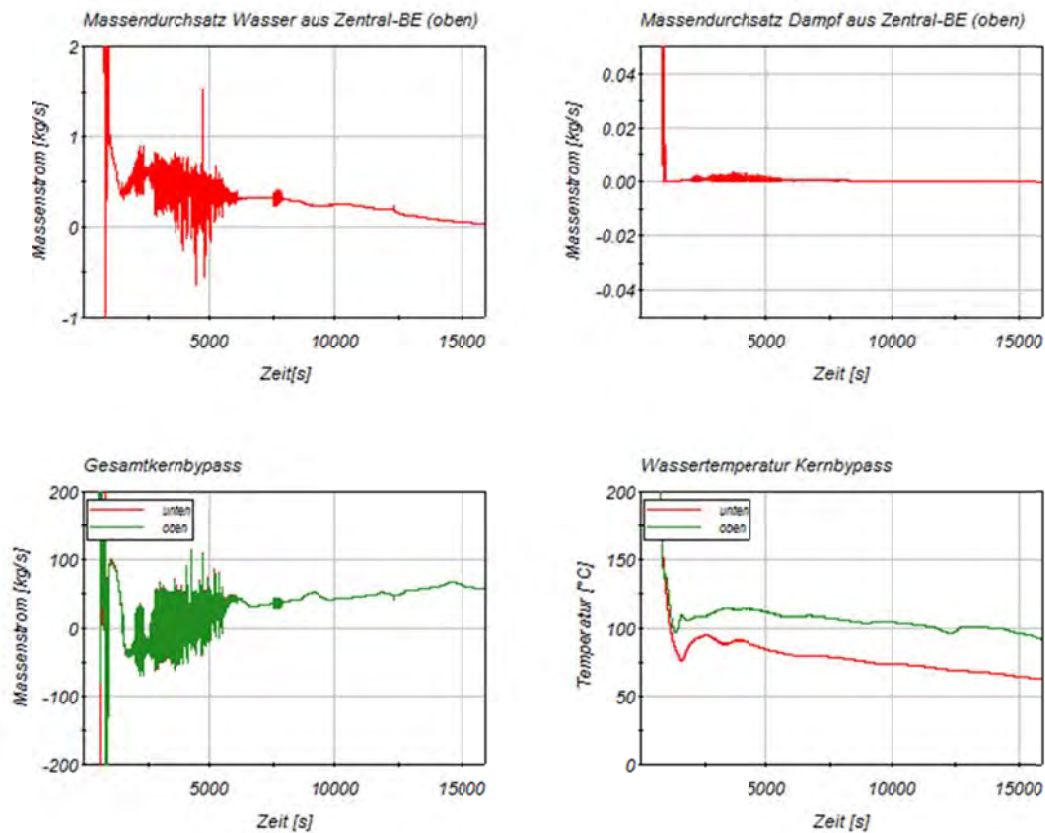


Abb. 8-4 Charakterisierung von BE-Austritt und Kernbypass

Der Gesamtmassendurchsatz durch das zentrale Brennelement sinkt kontinuierlich und es wird mit Beginn der Notkühlphase I nahezu kein Dampf aus dem Brennelement transportiert. Mit der Steigerung des Druckverlustes infolge von Korrosion über die Abstandshalter erhöht sich der Massenstrom über den Bypass. Die Aufwärmspanne bleibt nahezu unverändert und beträgt knapp 30 K. Damit wird bei einem Massenstrom von ca. 56 kg/s eine Leistung von ca. 7 MW abgeführt. Dies entspricht im Mittel einer Wärmeabfuhr pro Brennelement über den etwa 12 kW.

Der Zustand des zentralen Brennelements ist in Abb. 8-5 dargestellt.

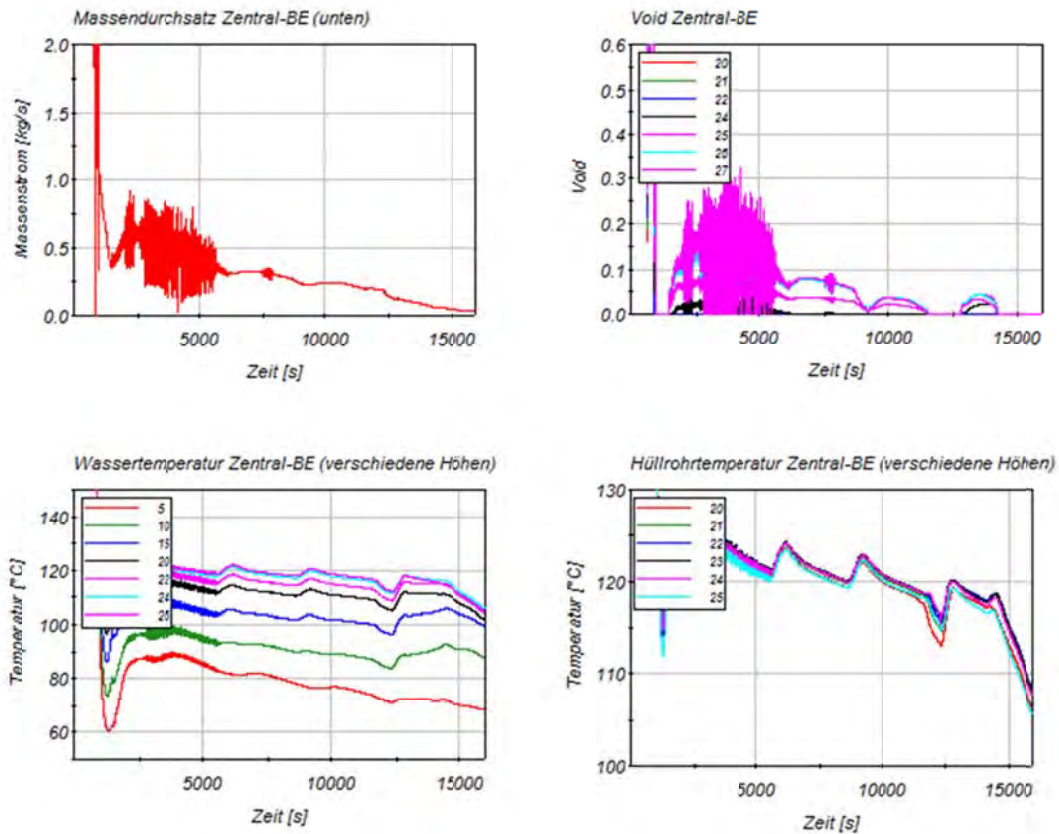


Abb. 8-5 Zentral-Brennelement

Der Massendurchsatz durch das zentrale Brennelement beträgt ab ca. 6.000 s ca. 0,2 kg/s.

Nach der Einlagerung von Korrosionsprodukten ab 12000 s sinkt der Massenstrom im Brennelement auf 0,03 kg/s und der Temperaturunterschied auf 35 K. Damit wird eine Leistung von etwa 4 MW durch Aufheizung des von unten einströmende Wasser abgeführt. Gemeinsam mit dem Kernbypass wird die gesamte Nachzerfallsleistung nach Einlagerung von Korrosionsprodukten durch unterkühltes Wasser abgeführt.

8.2 Bewertung

Die Gesamtwärmeleistung beträgt zum Zeitpunkt nach der Einlagerung von Korrosionsprodukten (15.000 s) ca. 11 MW. Davon werden ca. 7 MW über den Bypass und 4 MW über das von unten in die Brennelemente einströmende Wasser abgeführt. Auch nach der Einlagerung von Korrosionsprodukten sinken die Wassertemperatur

und die Hüllrohrtemperatur des zentralen Brennelementes unter Sättigungstemperatur trotz deutlich reduziertem Massendurchsatz. Die Nachwärmeabfuhr ist also auch in dieser Phase gesichert. Dabei befindet sich auch im oberen Bereich der Brennelemente und des Kernbypasses unterkühltes Wasser.

9 3 TH, offener äußerer Bypass, Korrosion

9.1 Analyseergebnisse

Die Randbedingungen der Analyse sind in Abb. 9-1 dargestellt.

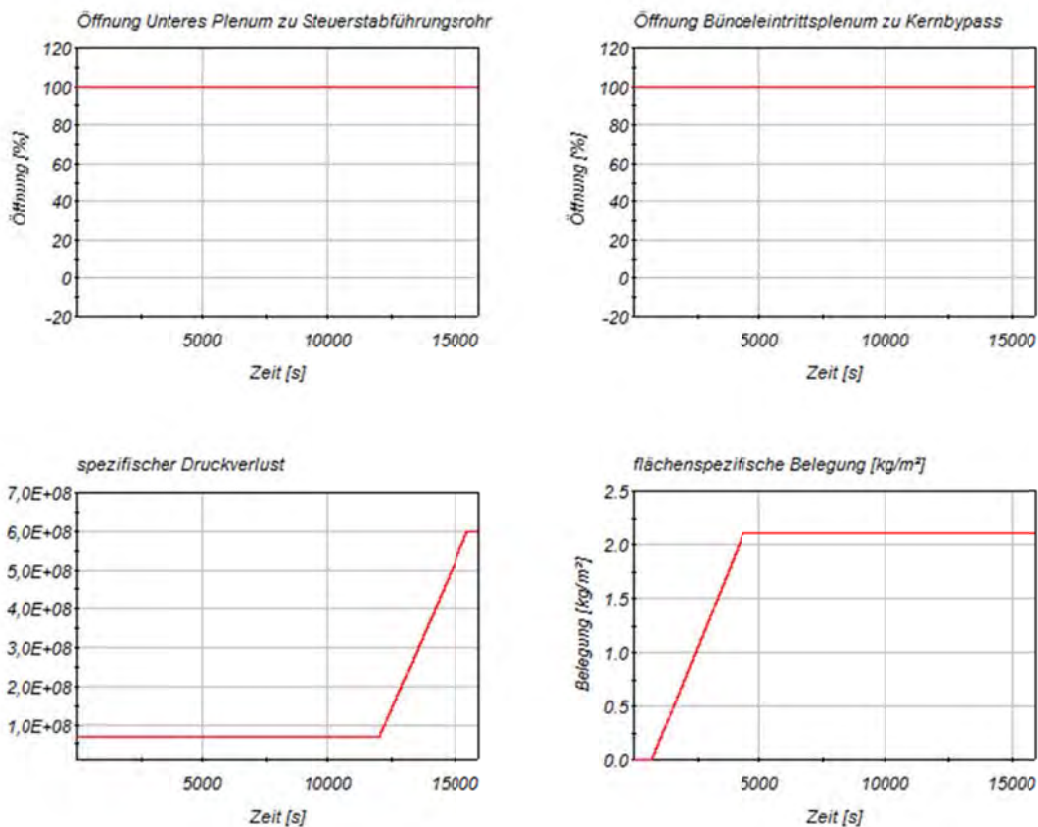


Abb. 9-1 Randbedingungen

Der äußere Bypass bleibt geöffnet. Die Abstandshalter werden mit 2,1 kg/m² belegt. Ab 12.000 s erhöht sich der spezifische Druckverlust durch die Einlagerung von Korrosionsprodukten um den Faktor 9.

Die Not- und Nachkühlsysteme TK, TH, TJ und TM sind in Abb. 9-2 dargestellt.

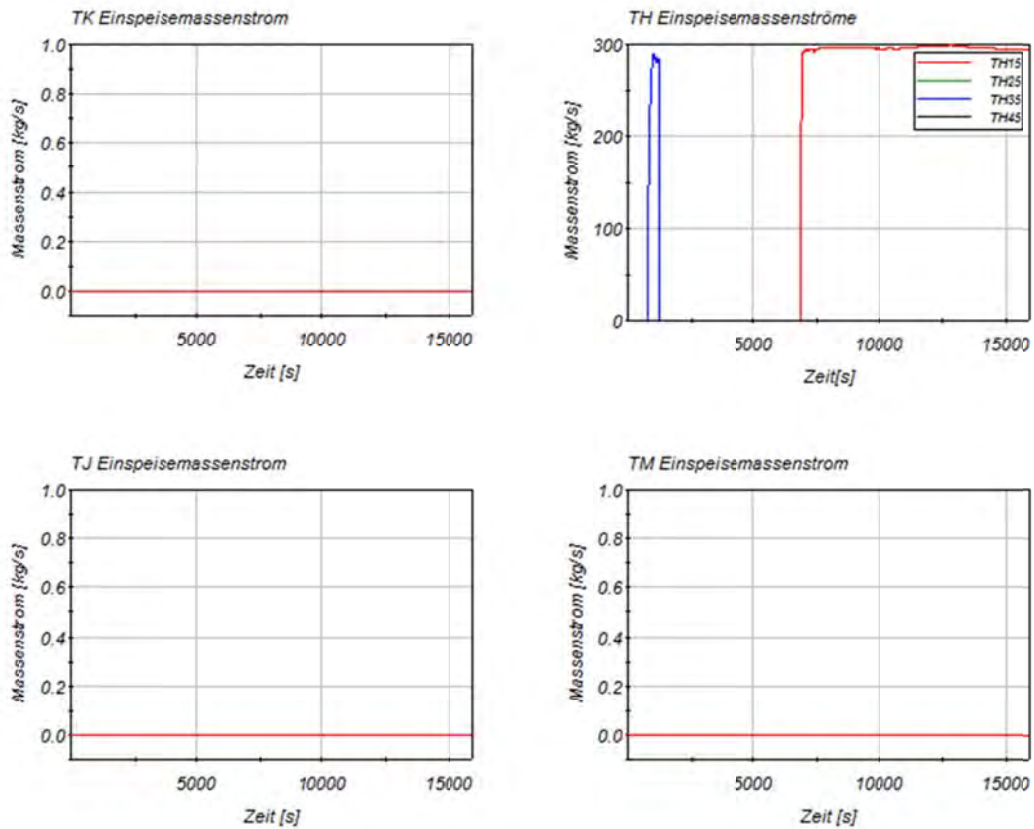


Abb. 9-2 Not- und Nachkühlsysteme

Das TK-System steht nicht zur Verfügung. Während der Notkühlphase I bespeisen TH10, TH20 und TH30 den RDB. Nach dem Absinken des RDB-Füllstandes beginnt dann die langfristige Bespeisung des RDB über TH10.

Die Systeme TJ und TM werden nicht angefordert.

Der Zustand von RDB und SHB wird in Abb. 9-3 dargestellt.

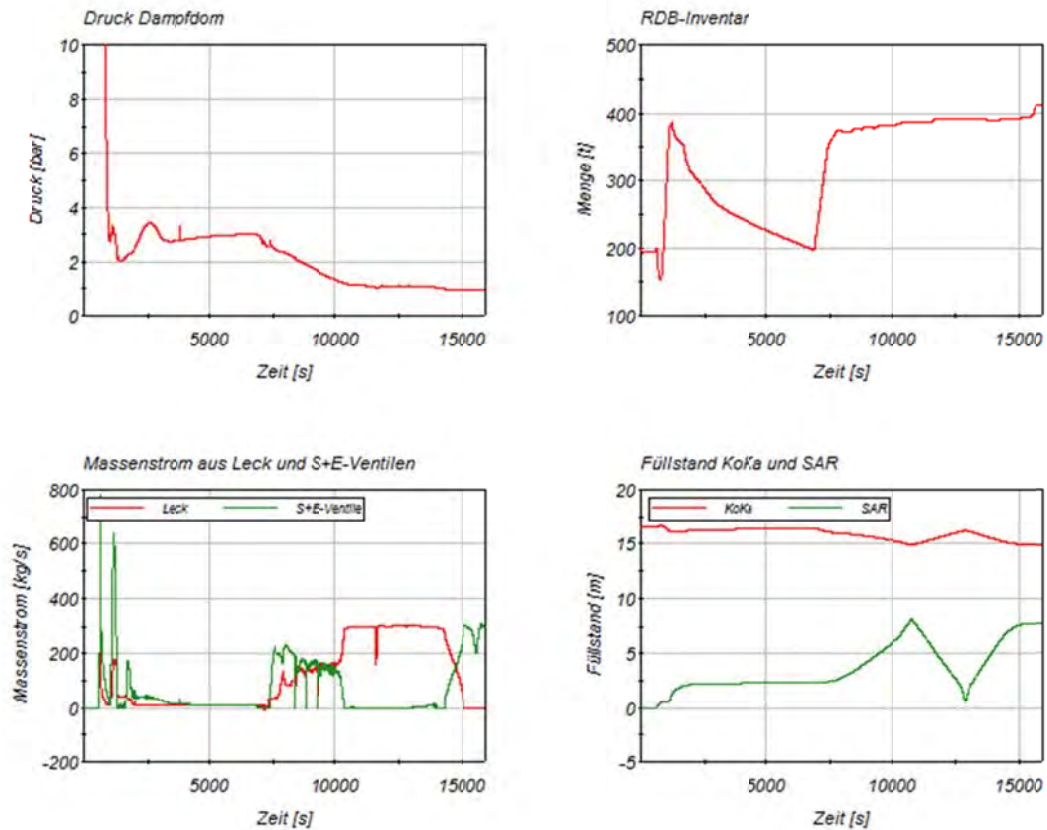


Abb. 9-3 Zustand von RDB und SHB

Nach Störfalleintritt sinkt der Druck im Dampfdom zunächst auf ca. 3 bar. Mit dem Beginn der erneuten Einspeisung über TH10 sinkt der Druck im Dampfdom dann auf ca. 1 bar ab. Das RDB-Inventar wird während der Notkühlphase I auf knapp 400 t angehoben und sinkt dann ab bis zur erneuten Bespeisung des RDB über TH10 auf etwa 200 t. Mit der erneuten Bespeisung des RDB über TH10 wird das Inventar dann auf ca. 400 t angehoben.

Mit der erneuten Einspeisung über TH10 steigen der Massenstrom über das Leck auf ca. 300 kg/s. Über Leck und S&E-Ventile strömt ungefähr die Menge ab, die über TH10 in den RDB gefördert wird.

Der Zustand des zentralen Brennelements am oberen Ende und des Kernbypasses ist in Abb. 9-4 dargestellt.

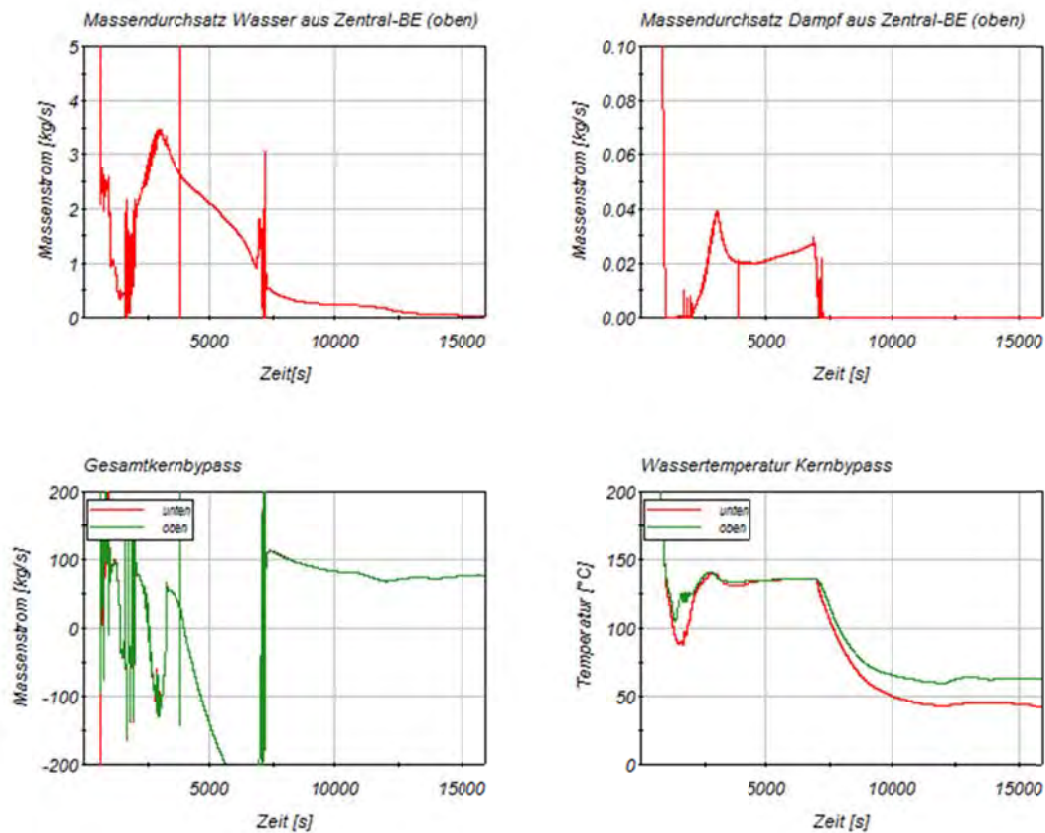


Abb. 9-4 Charakterisierung von BE-Austritt und Kernbypass

Der Massendurchsatz durch das zentrale BE sinkt mit Beginn der erneuten Einspeisung über TH10 auf Werte unter 0,5 kg/s. Ab diesem Zeitpunkt bildet sich im zentralen Brennelement kein Dampf mehr.

Die Nachwärme wird vor allem über den Kernbypass abgeführt, dessen Durchströmung mit der erneuten Einspeisung von TH10 ab 7.000 s auf ca. 90 kg/s steigt. Bei einem Temperaturunterschied von 20 K werden 7,5 MW Nachwärme über den Kernbypass abgeführt. Dies entspricht etwa 13 kW pro Brennelement.

Der Zustand des zentralen Brennelements ist in Abb. 9-5 dargestellt.

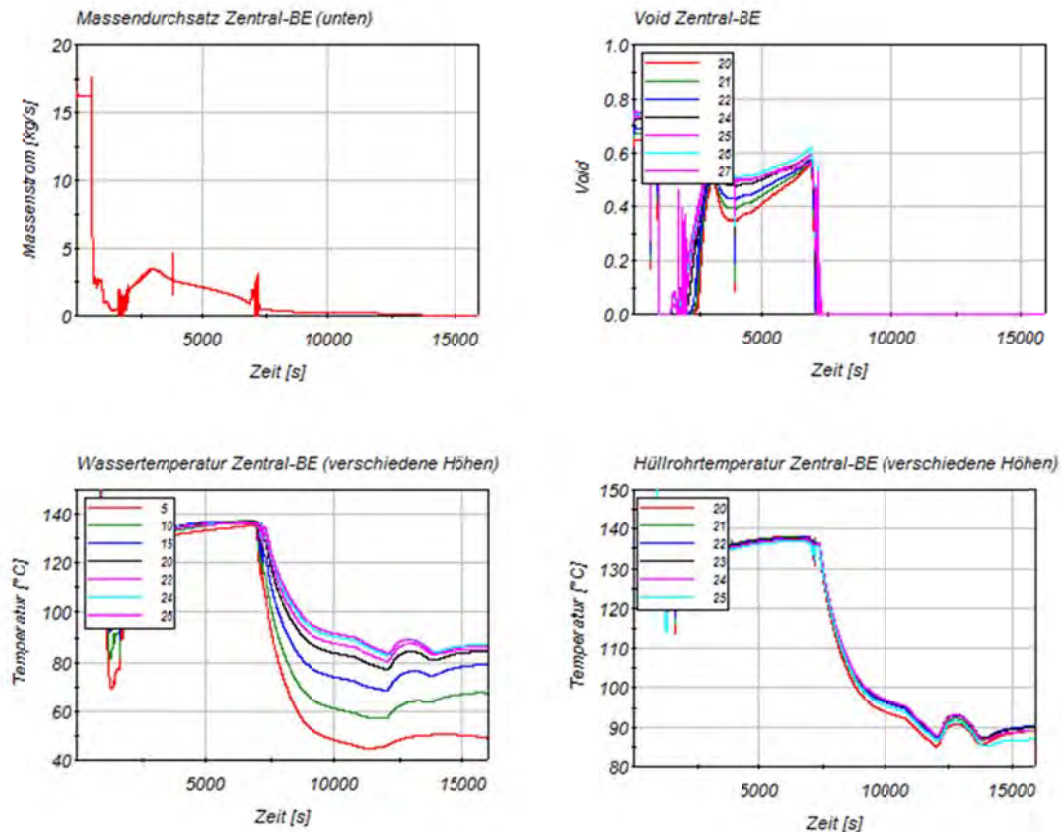


Abb. 9-5 Zentral-Brennelement

Im zentralen Brennelement bleibt auch nach der Erhöhung des Druckverlustes durch die Einlagerung von Korrosionsprodukten ab 12000 s der Dampfgehalt bei 0. Bei einem Massenstrom von 0,036 kg/s pro Brennelement und einer Aufheizung von 40 K werden ca. 6 kW an Leistung abgeführt. Gemeinsam mit dem Kernbypass wird die Nachzerfallsleistung unterkühlt aus dem Brennelement abgeführt.

9.2 Bewertung

Zum Zeitpunkt der Einlagerung von Korrosionsprodukten beträgt die Leistung ca. 11 MW. Davon werden ca. 7,5 MW über den Kernbypass abgeführt. Über das von unten in die Brennelemente einströmende Wasser werden durch Aufheizung ca. 3,5 MW abgeführt. Mit der Einlagerung von Korrosionsprodukten erfolgt die gesicherte Nachwärmeabfuhr überwiegend über den Gesamtkernbypass.

10 TK + 4 TH, offener äußerer Bypass, 31 kg/m²

10.1 Analyseergebnisse

Die Randbedingungen der Analyse sind in Abb. 10-1 dargestellt.

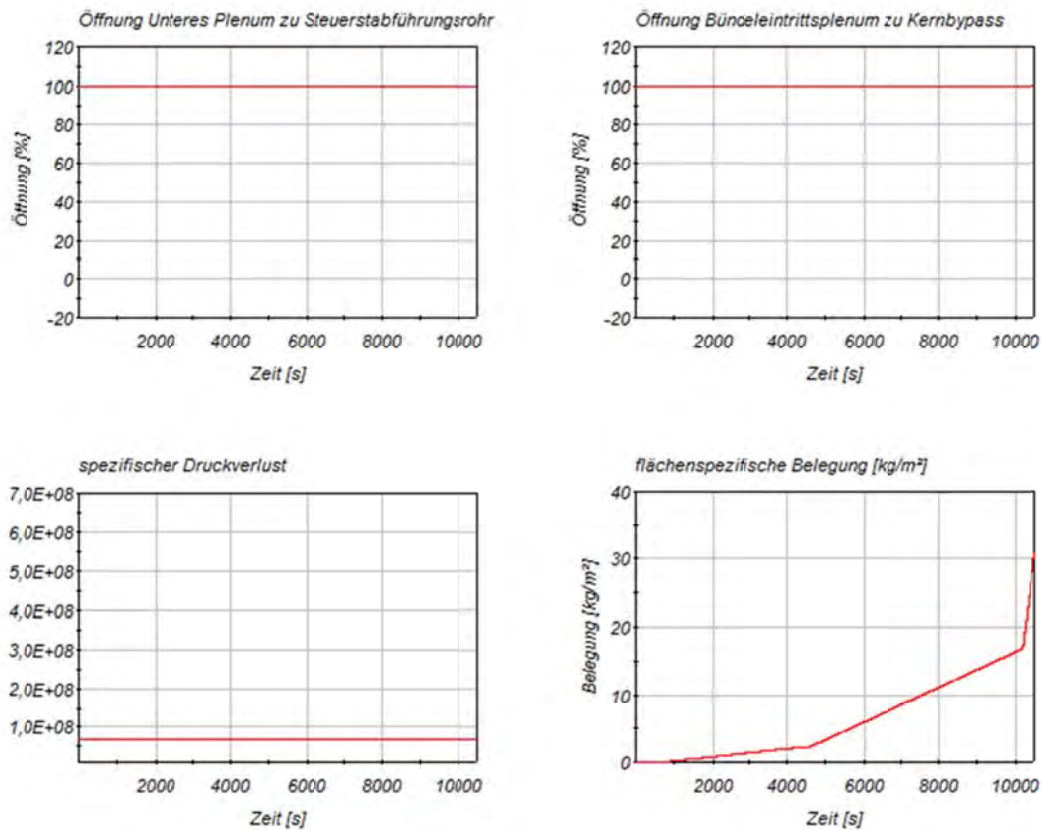


Abb. 10-1 Randbedingungen

Der äußere Bypass bleibt geöffnet.

Ab ca. 4.500 s wird die Belegung der Abstandshalter von 2,1 kg/m² auf 31 kg/m² erhöht. Eine Druckverlusterhöhung durch die Einlagerung von Korrosionsprodukten erfolgt nicht.

Die Not- und Nachkühlsysteme TK, TH, TJ und TM sind in Abb. 10-2 dargestellt.

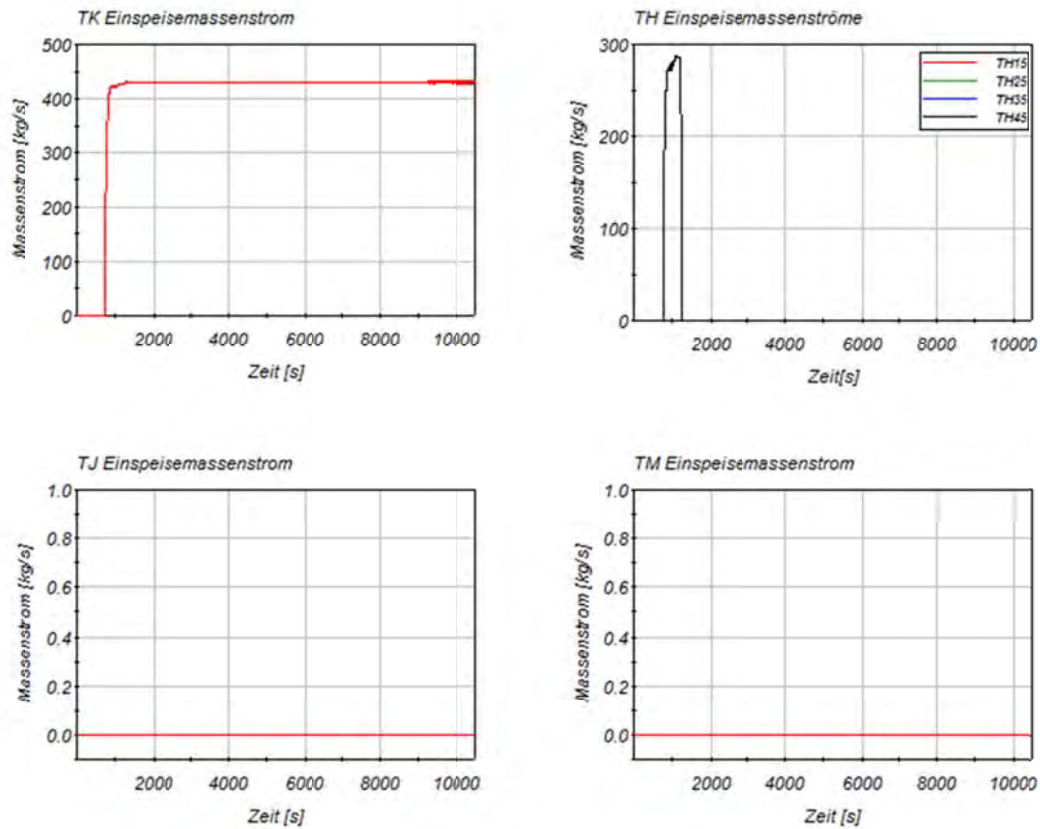


Abb. 10-2 Not- und Nachkühlsysteme

Das TK-System und alle 4 TH-Systeme sind verfügbar. Während der Notkühlphase I speisen zunächst alle 5 Systeme in den RDB ein. Die Einspeisung über die TH-Systeme endet mit der Notkühlphase I. Das TK-System speist auch in der Notkühlphase II weiter in den RDB ein.

Die Systeme TJ und TM werden nicht angefordert.

Der Zustand von RDB und SHB wird in Abb. 10-3 dargestellt.

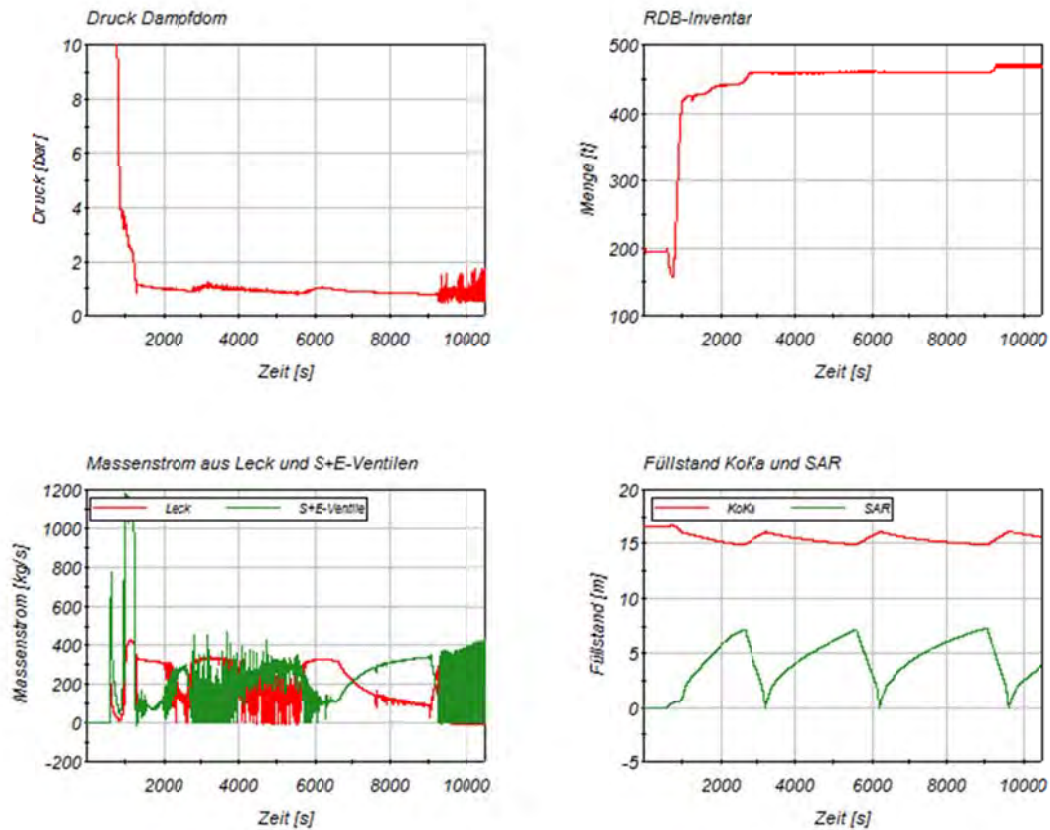


Abb. 10-3 Zustand von RDB und SHB

Während der Notkühlphase I sinkt der Dampfdruck auf ca. 1 bar ab. Mit der Erhöhung der Belegung der Abstandshalter auf 31 kg/m² beginnt der Druck im RDB ab ca. 9.000 s zu oszillieren.

Der Gesamtmassenstrom über Leck und S+E-Ventile beträgt ungefähr 450 kg/s und entspricht also der Einspeisung über TK in den RDB.

Die Rückförderung vom SAR in die KoKa in der Notkühlphase II erfolgt mit einer Periode von ca. 3.000 s.

Der Zustand des zentralen Brennelements am oberen Ende und des Kernbypasses ist in Abb. 10-4 dargestellt.

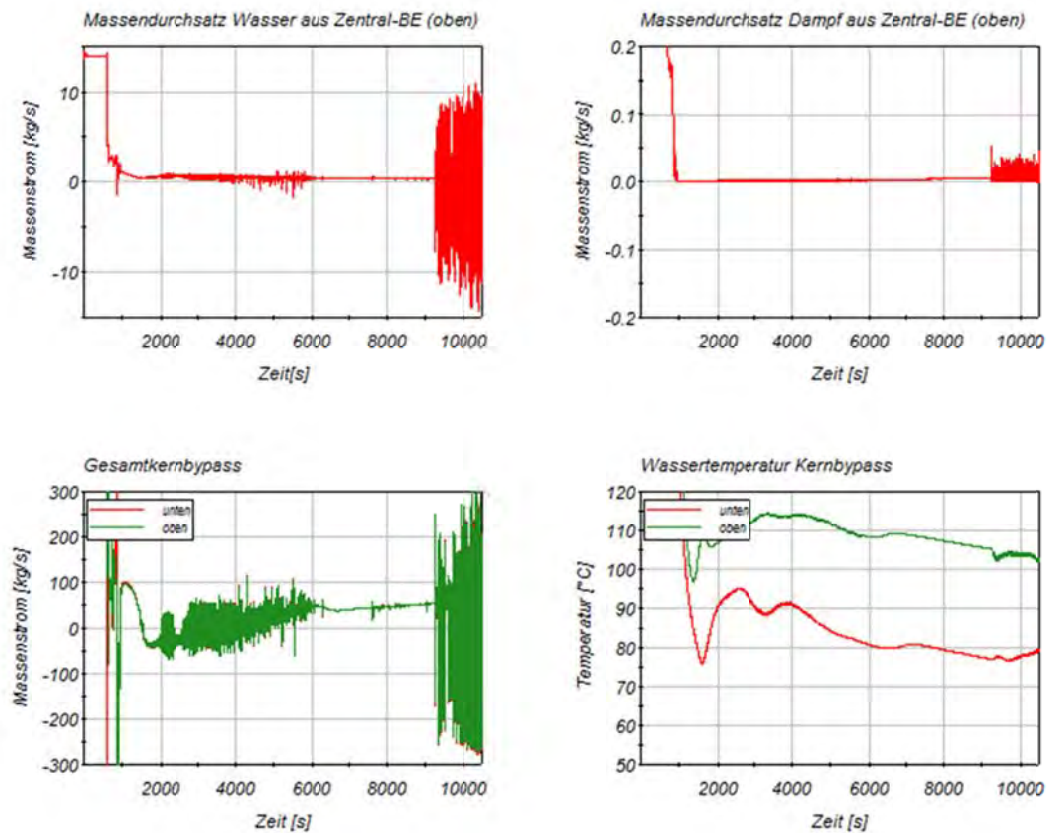


Abb. 10-4 Charakterisierung von BE-Austritt und Kernbypass

Durch die extrem hohe Belegung der Abstandshalter oszillieren die Massenströme durch das zentrale Brennelement und den Kernbypass. Die Aufwärmspanne im Kernbypass bleibt in dieser Phase nahezu unverändert.

Bei 7.000 s beträgt der Massendurchsatz durch das zentrale Brennelement ca. 0,3 kg/s. Der Massendurchsatz an Dampf ist zu diesem Zeitpunkt kleiner als 0,01 kg/s. Der Massenstrom über den Kernbypass beträgt ca. 50 kg/s und die Aufwärmung im Kernbypass 25 K. Damit wird eine Leistung von 5,2 MW über den Kernbypass abgeführt. Dies entspricht etwa 9 kW je Brennelement.

Mit dem starken Anstieg der Belegung beginnt der Wasserdurchsatz durch den Kern zu oszillieren. Die negativen Massenströme zeigen die Wassereinbrüche von oben in den oberen Bereich der Brennelemente. In dieser Phase bildet sich Dampf in den

Brennelementen. Trotz der Oszillationen im Kernbypass steigt die Wassertemperatur im Kernbypass nur minimal.

Der Zustand des zentralen Brennelements ist in Abb. 10-5 dargestellt.

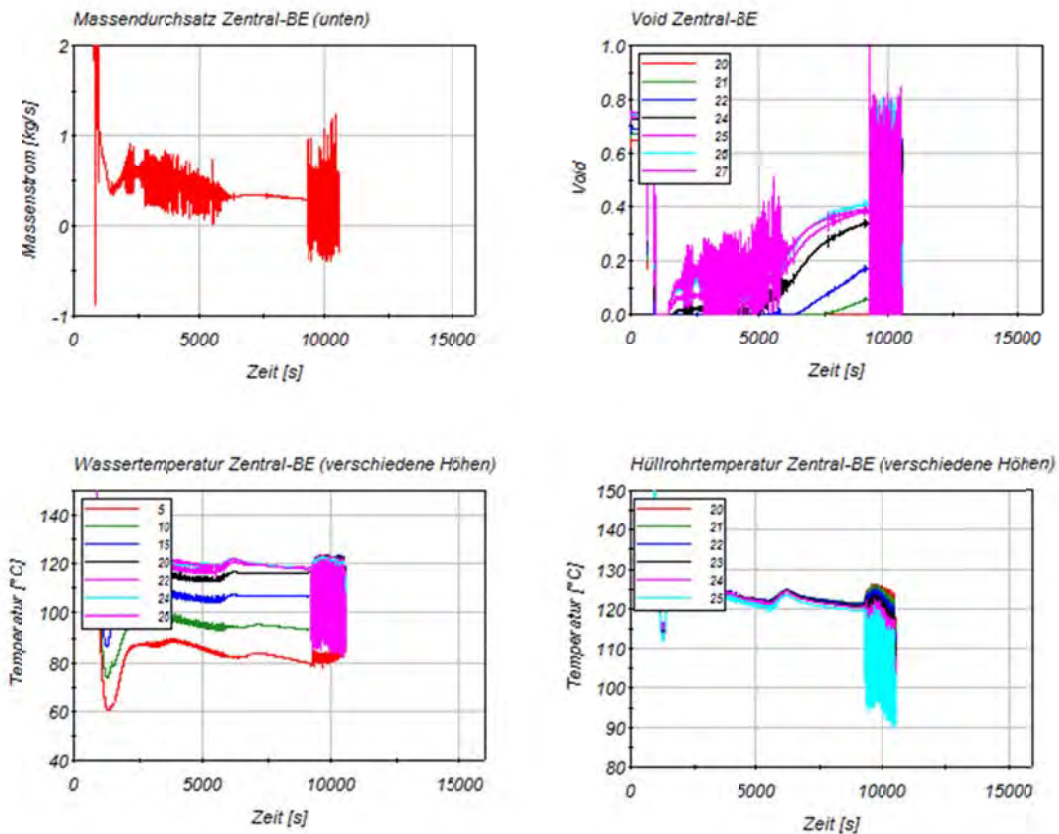


Abb. 10-5 Zentral-Brennelement

Nach der Belegung der Abstandshalter mit 31 kg/m^2 lässt sich ein mittlerer Massenstrom ca. $0,3 \text{ kg/s}$ abschätzen. Bei einer Aufwärmung des Wassers um ca. 35 K wird damit eine Leistung von 44 kW abgeführt. Dies entspricht einer Nachwärmeabfuhr durch Aufheizung des in den Kern eingetretenen Kühlmittels von etwa 26 MW .

Der Dampfgehalt steigt in dieser Phase auf bis zu $0,8$.

Die Wassertemperatur im zentralen Brennelement und die Hüllrohrtemperatur steigen auch bei der Belegung mit 31 kg/m^2 nicht an. Die Oszillationen bei den Temperaturen zeigen die Wassereinbrüche von oben in den Kern.

10.2 Bewertung

Bei Belegung der Abstandshalter mit 31 kg/m^2 beträgt die Nachwärmeleistung $42,7 \text{ MW}$. Davon werden ca. $5,2 \text{ MW}$ über die Wasserströmung von unten durch den Kernbypass abgeführt. Der Rest wird über die Wasserströmung von unten in den Kern und über Verdampfung oben im Kern abgeführt. Bei sehr hohen Belegungsmengen wird die Nachwärme also durch im oberen Bereich der Brennelemente zwei-phases Kühlmittel abgeführt.

11 3 TH, offener äußerer Bypass, 10-fache Belegung

11.1 Analyseergebnisse

Die Randbedingungen der Analyse sind in Abb. 11-1 dargestellt.

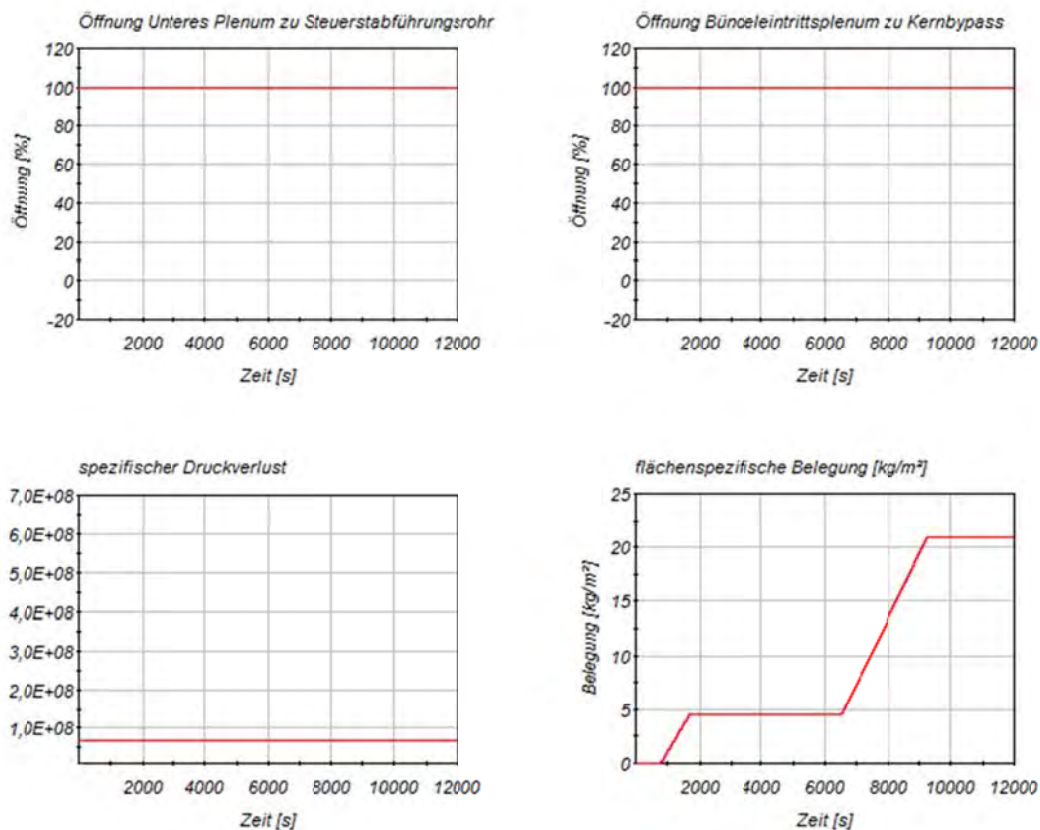


Abb. 11-1 Randbedingungen

Der äußere Bypass ist offen.

Die Belegung der Abstandshalter erfolgt während der Notkühlphase I und dann weiter mit der Einspeisung in den RDB über TH10 bis zu 21 kg/m². Diese Belegung beträgt das 10-fache der zu erwartenden maximalen Abstandshalterbelegung.

Die Not- und Nachkühlsysteme TK, TH, TJ und TM sind in Abb. 11-2 dargestellt.

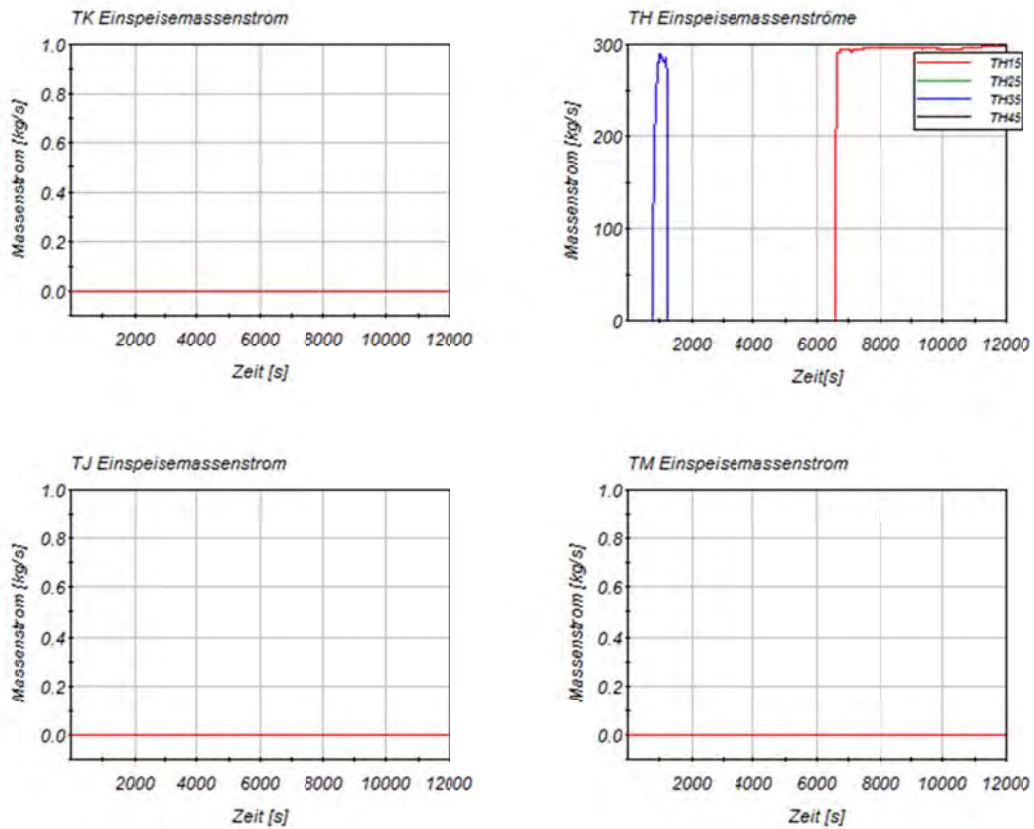


Abb. 11-2 Not- und Nachkühlsysteme

Während der Notkühlphase I speisen TH10, TH20 und TH30 in den RDB ein. Nach dem Absinken des RDB-Füllstandes speist dann TH10 in den RDB ein.

Die System TJ und TM werden nicht angefordert.

Der Zustand von RDB und SHB wird in Abb. 11-3 dargestellt.

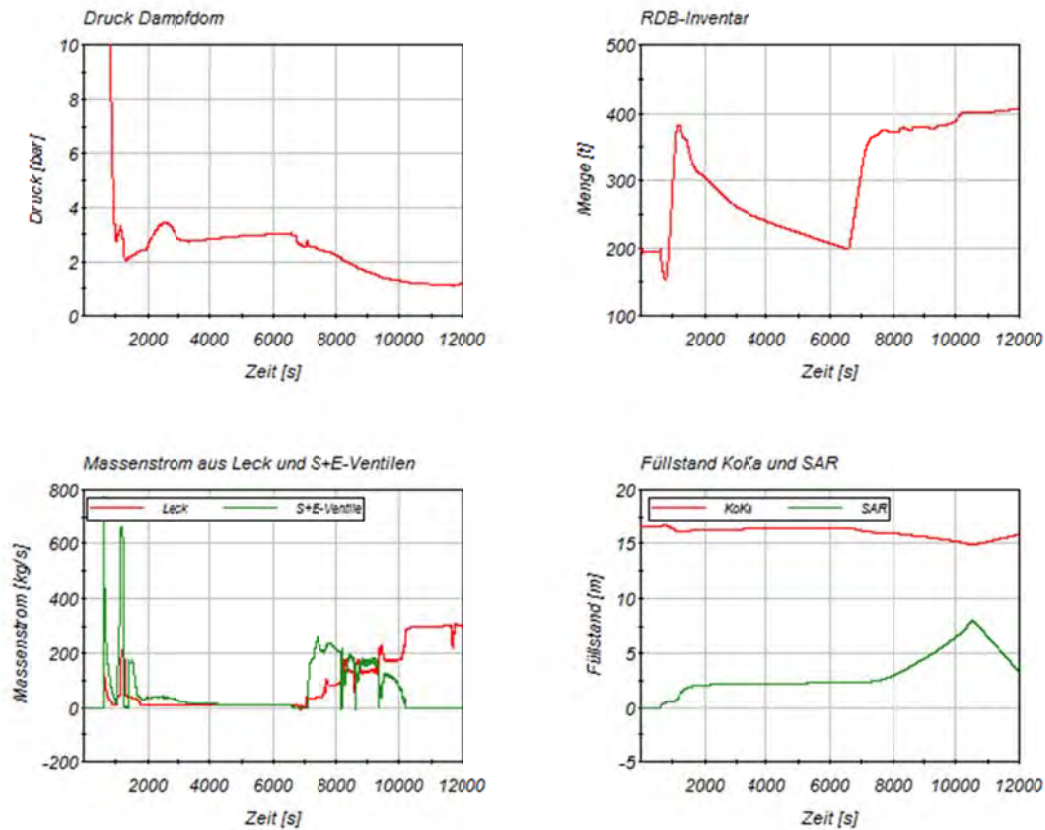


Abb. 11-3 Zustand von RDB und SHB

Nach Beendigung der Notkühlphase I beträgt der Druck im Dampfdom ca. 3 bar. Mit Beginn der erneuten Einspeisung über TH10 bei 6570 s wird der Druck im Dampfdom dann auf 1 bar abgesenkt.

Nach dem Auffüllen des RDB während der Notkühlphase I sinkt das RDB-Inventar durch die Abströmung über das Leck und die S+E-Ventile zunächst auf 200 t und wird dann langfristig über die Bespeisung mit TH10 auf 400 t angehoben und gehalten.

Während des Absinkens des RDB-Inventars bis 6570 s sind die Massenströme aus Leck und S+E-Ventilen sehr gering. Mit der erneuten Bespeisung über TH10 steigt dann der Massenstrom über Leck und S+E-Ventile entsprechend der Einspeisung auf ca. 300 kg/s.

Der Zustand des zentralen Brennelements am oberen Ende und des Kernbypasses ist in Abb. 11-4 dargestellt.

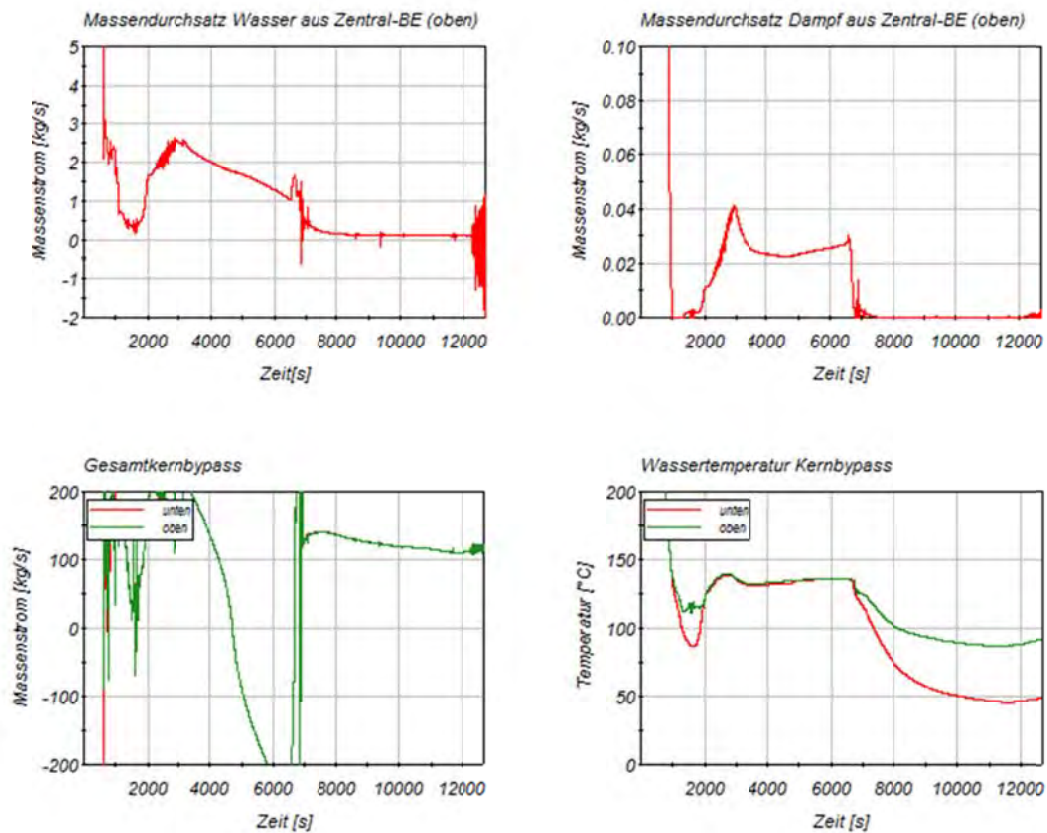


Abb. 11-4 Charakterisierung von BE-Austritt und Kernbypass

Bis zum erneuten Start von TH10 bei 6570 s erfolgt die Nachwärmeabfuhr mit dem Massendurchsatz durch die Brennelemente und der Bildung von Dampf.

Mit der fortschreitenden Belegung der Abstandshalter mit Beginn der Einspeisung über TH10 sinkt dann der Massendurchsatz durch die Brennelemente auf ca. 0,1 kg/s.

Der Massendurchsatz durch den Kernbypass steigt mit der Belegung von 21 kg/m² auf ca. 100 kg/s an. Der Temperaturunterschied des Wassers im Kernbypass erhöht sich leicht und beträgt ca. 45 K. Damit werden über den Kernbypass ca. 19 MW Nachwärmeleistung abgeführt. Dies entspricht einer Wärmeabfuhr von 33 kW je Brennelement.

Der Zustand des zentralen Brennelements ist in Abb. 11-5 dargestellt.

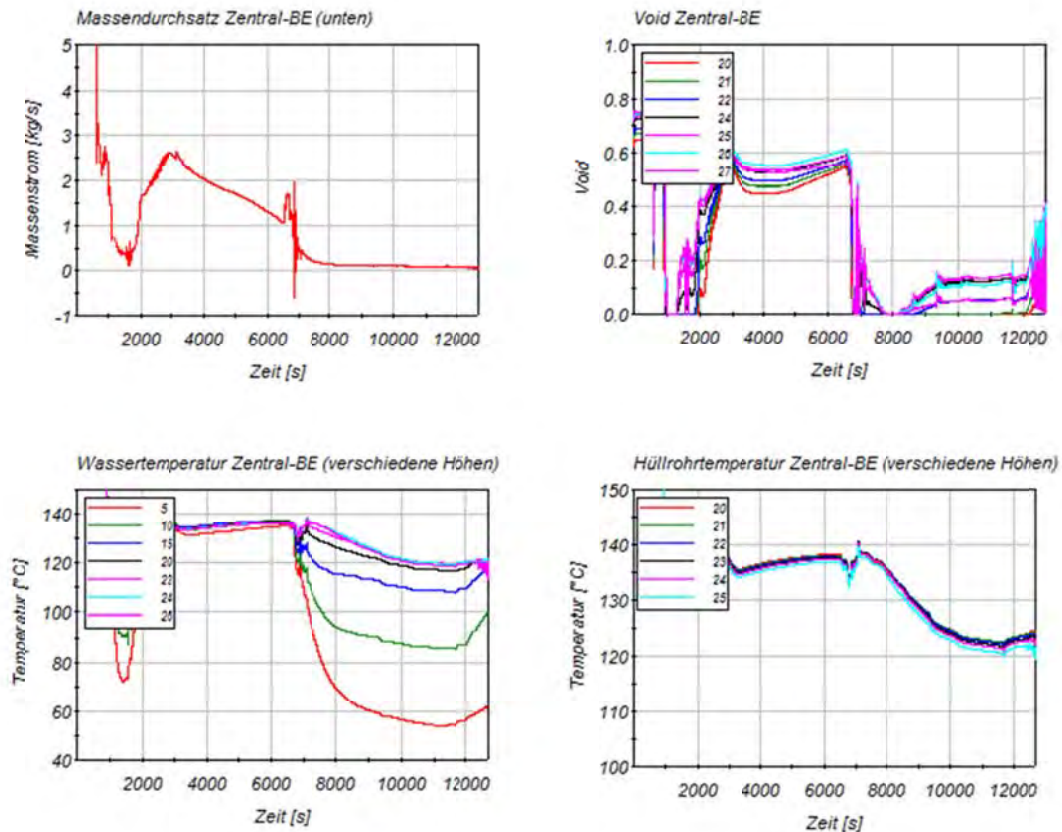


Abb. 11-5 Zentral-Brennelement

Während des Absinkens des RDB-Inventars bis ca. 7000 s wird die Nachwärme über das zweiphasige Kühlmittel in den Brennelementen abgeführt, der Dampfgehalt beträgt in dieser Phase ca. 0,6.

Mit dem weiteren Belegen der Abstandshalter ab ca. 7000 s bei Einspeisung über TH10 sinkt dann der Massenstrom durch das zentrale Brennelement auf 0,1 kg/s. Bei einer Aufwärmung des Wassers in den Brennelementen von 60 K werden pro Brennelement ca. 25 kW Nachwärmeleistung abgeführt. Das in das Brennelement einströmende Wasser kann die Nachzerfallsleistung nicht mehr vollständig abführen. Dies führt zu einer Dampfbildung und einem maximalen Dampfgehalt von etwa 15 %.

11.2 Bewertung

Bei einer 10-fach höheren Belegung der Abstandshalter und einer Nachwärmeleistung von 39 MW werden durch Aufheizung des von unten durch den Kern strömende Wasser ca. 15 MW abgeführt und über den Bypass ca. 19 MW. Die Nachwärmeabfuhr über Verdampfung aus den Brennelementen ist gering. Die Nachwärmeabfuhr ist also auch bei einer um den Faktor 10 höheren Ablagerungsmenge gesichert.

12 Zusammenfassung

In allen untersuchten Fällen zeigen die Rechenergebnisse eine ausreichende Kernkühlung. Die Ergebnisse zur Nachwärmeabfuhr im jeweiligen Endzustand der Rechenläufe sind in der Tab. 12-1 zusammengefasst.

Bei geschlossenem äußerem Bypass erfolgt die Nachwärmeabfuhr vor allem über die Brennelemente. Bei sehr großen Ablagerungsmengen an den Abstandshaltern und teilweise auch bei Einlagerung von Korrosionsprodukten, erfolgt die Nachwärmeabfuhr über Verdampfung aus den Brennelementen und durch Wassereinbrüche in die Brennelemente von oben.

Bei offenem äußerem Bypass erfolgt die Nachwärmeabfuhr über die Durchströmung der Brennelemente von unten und über den äußeren Bypass.

Bei den Rechnungen mit einer Ablagerung von $2,1 \text{ kg/m}^2$ und der Erhöhung des spezifischen Druckverlustes durch Korrosion befindet sich im oberen Bereich der Brennelemente meist nur einphasiges Kühlmittel. Die Nachwärme wird bei offenem äußeren Bypass vor allem über diesen abgeführt, bei geschlossenem äußerem Bypass über die Aufheizung des Kühlmittels in den Brennelemente.

Alle Rechnungen mit sehr hoher Ablagerungsmenge zeigen, dass auch bei diesen konservativen Randbedingungen die Nachwärmeabfuhr gesichert bleibt. In diesen Fällen befindet sich im oberen Bereich der Brennelemente 2-phasiges Kühlmittel.

Mit den hier dokumentierten Rechnungen wurde gezeigt, dass auch bei einer um den Faktor 10 erhöhten Ablagerungsmenge gegenüber der maximal zu erwartenden Ab-

Anlage 3

lagerungsmenge und bei Berücksichtigung von Korrosionsprodukten die Kernkühlung gesichert ist.

Tab. 12-1 Verteilung der Nachwärmeabfuhr auf Brennelement und Kernbypass

| | Nachwärmeleistung [MW] | Nachwärmeabfuhr durch Aufheizung des in das BE einströmenden Kühlmittels [MW] | Nachwärmeabfuhr über Kernbypass [MW] | Kühlmittel im oberen Bereich der BE |
|---|------------------------|---|--------------------------------------|-------------------------------------|
| TK + 4 TH, geschlossener äußerer Bypass, Korrosion | 11 | 10,5 | 0,34 | 2-phasig |
| 3 TH, geschlossener äußerer Bypass, Korrosion | 11 | 10,5 | 0,42 | 1-phasig ²⁾ |
| TK + 4 TH, geschlossener äußerer Bypass, 25 kg/m ² | 42 | 38 ¹⁾ | 0,36 | 2-phasig |
| 3 TH, geschlossener äußerer Bypass, 10-fache Belegung | 36,6 | 32 ¹⁾ | 0,65 | 2-phasig |
| TK + 4TH, offener äußerer Bypass, Korrosion | 11 | 4 | 7 | 1-phasig ²⁾ |
| 3 TH, offener äußerer Bypass, Korrosion | 11 | 3,5 | 7,5 | 1-phasig ²⁾ |
| TK + 4 TH, offener äußerer Bypass, | 42,7 | 26 ¹⁾ | 5,2 | 2-phasig |
| 3 TH, offener äußerer Bypass, 10-fache Belegung | 39 | 15 ¹⁾ | 19 | 2-phasig |

¹⁾ abgeschätzte Werte, wegen der starken Oszillation des in das BE einströmenden Kühlmittels

²⁾ Bei 1-phasiger Nachwärmeabfuhr beträgt der Summenwert über BE und Kernbypass. Kleine Abweichungen sind durch Rundungsfehler bei der Abschätzung der Nachwärmeabfuhr bedingt.

13 Literatur

/ATL11/ Input Data Description, ATHLET Mod 2.2 Cycle B, GRS-P-1 / Vol. 1, Rev. 6, GRS, Juni 2011

/SIK09/ Sicherheitskriterien für Kernkraftwerke, Revision D, April 2009,
<http://www.grtn.it/Diritto%20%20Raccolta%20documenti/sicherheitskriterien.pdf>

Verteiler

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

AG RS I 3 2 x

Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)

Fachbereich SK (1x Post-, 1 x elektr. Versand) 1 x

RSK-Geschäftsstelle (1 x Post-, 1 x elektr. Versand) 1 x

Genehmigungs- und Aufsichtsörden der Länder mit Kernkraftwerken

(3 x Postversand) 3 x

Technische Überwachungs-Vereine 5 x

Betreiber Kernkraftwerke 8 x

Energieversorgungsunternehmen 4 x

Hersteller Kernkraftwerke 3 x

(3 x Post- 1 x elektr. Versand)

VGB (1 x Post-, 1 x elektr. Versand) 1 x

Bibliothek Köln 1 x

Gesamtauflage **Exemplare** **29 x**

GRS (pdf-Datei)

Geschäftsführung wfp, stj je 1 x

Bereichsleiter erv, paa, prg, rot, stc, ver, zir je 1 x

Abteilungsleiter poi, sit, maq je 1 x

Projektbetreuung hab 1 x

Autoren, Abteilung 6120 bro je 1 x

Abteilung 6210 rop 1 x

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

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

Forschungszentrum
85748 Garching b. München
Telefon +49 89 32004-0
Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200
10719 Berlin
Telefon +49 30 88589-0
Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4
38122 Braunschweig
Telefon +49 531 8012-0
Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de