
Stellungnahme des RSK-Ausschusses ANLAGEN- UND SYSTEMTECHNIK

11.12.2014

Ausbildung und Auswirkungen eines Deionatpfropfens beim Dampferzeugerheizrohrleck

1 Anlass der Beratung

Herr Dipl.-Ing. Mayer vom Energiebüro Gorxheimetal, hat mit Schreiben vom 19.02.2013 an den Vorsitzenden der Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) auf die Problematik der Ausbildung eines Deionatpfropfens mit nachfolgender Rekritikalität des Kerns bei einem Dampferzeugerheizrohrleck (DEHL) in einem Druckwasserreaktor (DWR) hingewiesen. Dieser Brief war vom Vorsitzenden der RSK mit Schreiben vom 05.03.2013 beantwortet worden. Mit Datum vom 16.09.2013 legte die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) eine Stellungnahme zum o. g. Schreiben von Herrn Mayer vor [2]. Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) schloss sich dieser Stellungnahme an und stellte sie Herrn Mayer zur Verfügung. Auch das Institut für Sicherheits- und Risikowissenschaften Wien (ISR) befasste sich mit dem Thema und führte aus, dass das beschriebene Szenario möglicherweise nicht durch entsprechende Sicherheitsnachweise ausgeschlossen sei. Der von Herrn Mayer beschriebene Störfallablauf wäre demnach mit den bisher vorliegenden Untersuchungen nicht vergleichbar und müsse einer Prüfung unterzogen werden.

Aufgrund der unterschiedlichen Meinungen hielt das BMUB eine Befassung durch den RSK-Ausschuss ANLAGEN- UND SYSTEMTECHNIK für erforderlich. In ihrer 465. Sitzung am 24.04.2014 bat die RSK den Ausschuss ANLAGEN- UND SYSTEMTECHNIK um eine diesbezügliche Beratung. Daraufhin stellte Herr Dipl.-Ing. Mayer (Energiebüro Gorxheimetal, EnBG) in der 97. Sitzung des Ausschusses am 08.05.2014 seine Betrachtungen zum „Risiko durch Deionatpfropfen beim Dampferzeugerheizrohrleck (DEHL) in einem Druckwasserreaktor (DWR)“ [1] [4] dar und formulierte die aus seiner Sicht offenen Fragen zum Störfallablauf. Zudem kommentierte in dieser Sitzung und im Nachgang das Institut für Sicherheits- und Risikowissenschaften Wien (ISR) [3] [5] [7] die Stellungnahme der GRS vom 16.09.2013. In einem weiteren Bericht stellte die GRS in dieser Sitzung dem Ausschuss den Ablauf der Deborierung nach einem DEHL sowie die bisherigen Analysen zum DEHL dar [6].

Der Ausschuss beschloss, eine Bewertung des Potentials für die Ausbildung eines Deionatpfropfens mit nachfolgender Rekritikalität vorzunehmen.

Im Folgenden wird nach einer kurzen Darstellung der Anforderungen im Regelwerk zur Beherrschung von DEHL zuerst erläutert (Abschnitt 3), welche besonderen Aspekte beim Heizrohrleck zu beachten sind, welche Fälle als repräsentativ in den Betriebshandbüchern der Anlagen (BHB) behandelt werden und wie die Abläufe bei grundsätzlichen Varianten sind. Anschließend wird auf das von EnBG skizzierte Szenario und weitere Grenzbetrachtungen eingegangen (Abschnitt 4).

2 Anforderungen des Regelwerks

Nach den „Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke (SiAnf)“ ist das Versagen eines Dampferzeuger-Heizrohres entsprechend einem Leckquerschnitt bis maximal 2F als Ereignis der Sicherheitsebene 3 (Ereignis D3-31 gemäß Anhang 2 der SiAnf) hinsichtlich der Schutzziele K (Kühlung der Brennelemente), B (Einschluss der radioaktiven Stoffe) und S (Einhaltung radiologischer Sicherheitsziele) zu betrachten.

Ferner ist für dieses Ereignis gemäß D 3-19, Anhang 2 der SiAnf die „Fehlerhafte Einspeisung aus einem System, das Deionat oder minderboriertes Kühlmittel führt, mit Ausfall der Begrenzungen oder vorgelagerter Maßnahmen (Externe Deborierung; homogen und heterogen)“, hinsichtlich der Schutzziele K (Kühlung der Brennelemente) und R (Kontrolle der Reaktivität) zu betrachten, dabei speziell der „Speisewassereintrag während des Abfahrens unter Notstrombedingungen nach Dampferzeugerheizrohr-Bruch“.

3 Sachstand: Konzept zur Beherrschung eines Dampferzeugerheizrohrlecks

Das nachfolgend beschriebene Konzept zur Störfallbeherrschung beim DEHL wurde dem Ausschuss exemplarisch anhand einer Anlage bzw. eines aktuellen Betriebshandbuchs (BHB) für eine Vorkonvoi-Anlage vorgestellt. Nach Information des Ausschusses ist dieses Konzept für alle Vorkonvoi- und Konvoi-Anlagen einheitlich eingeführt worden, ebenso die im BHB behandelten Ereignisvarianten und die entsprechenden Fahrweisen. Der Ausschuss hat diesbezüglich keine weitergehenden Prüfungen vorgenommen.

3.1 Einleitung

Beim DEHL handelt es sich um einen Kühlmittelverlust (KMV)- Störfall in den Sekundärkreis unter Umgehung des Sicherheitseinschlusses, wodurch bei Öffnen von Frischdampfarmaturen im defekten Dampferzeuger (DE) eine Verbindung zur Atmosphäre besteht. Daher steht das Schutzziel S (Einhaltung radiologischer Sicherheitsziele) und eine diesbezüglich zu optimierende Störfallbehandlung im Vordergrund.

Unabhängig davon sind auch die Schutzziele K (Kühlung der Brennelemente) und R (Kontrolle der Reaktivität) betroffen, da das DEHL auch ein KMV-Störfall ist und Potential für einen Deionateintrag von der Sekundärseite in den Primärkreislauf bietet.

Insgesamt erfordert die Beherrschung dieses Szenarios ein komplexeres Vorgehen als bei den meisten anderen Ereignissen.

Relevant für das Potential einer hohen Aktivitätsfreisetzung (Schutzziel S) ist ein länger anhaltender hoher Druck im Primärkreis, der zu einer hohen Leckrate führt. Dieser kann z. B. durch die Sicherheitseinspeisepumpen aufgeprägt werden oder durch die Unverfügbarkeit der Hauptkühlmittelpumpen (HKMP) entstehen. Insofern zielen die Maßnahmen darauf ab, das Absinken des Füllstands im Druckhalter so weit zu begrenzen,

dass die Grenzwerte zum Zuschalten der Sicherheitseinspeisepumpen durch das Reaktorschutzsystem nicht erreicht werden und ein Notstromfall als Folge der Lastabsenkung möglichst vermieden wird.

Unabhängig von der hohen Druckdifferenz zur Sekundärseite kann die Unverfügbarkeit der HKMP beim Abfahren durch stagnierenden Naturumlauf dazu führen, dass keine Abkühlung des Kühlmittels in dem betroffenen Loop stattfindet und dass es dadurch bei der weiteren Druckabsenkung im Primärkreis zur Verdampfung mit großer Volumenausdehnung kommt.

Um die Schutzziele zu erreichen, wurden die Maßnahmen zur Beherrschung des Ereignisses aus einem vorgelagerten Teil (d. h. Wirksamkeit der Begrenzungen vor dem Ansprechen des Reaktorschutzsystems), der vorrangig zur Minimierung der Strahlenexposition dient, und einem Teil zur „Leckbeherrschung“ aufgebaut.

Der vorgelagerte Teil enthält differenzierte automatische Maßnahmen, deren Ansteuerung nicht im Reaktorschutzsystem realisiert ist. Sie wurde in 4-strängigen Begrenzungssystemen nach KTA 3501 umgesetzt, die hochwertiger als betriebliche Leittechnik ausgeführt sind. Aufgrund dieser hochwertigen Ausführung ist von einer hohen Zuverlässigkeit bei der Verfügbarkeit dieser Einrichtungen auszugehen.

Der Teil zur Leckbeherrschung (Schutzziele K) besteht aufgrund des Kühlmittelverlusts durch die Leckage in der Auslösung der Notkühlkriterien mit dem Start der Sicherheitseinspeisepumpen und greift damit auf die vom Reaktorschutz für Leckstörfälle vorgesehenen Maßnahmen zurück. Mit Ausnahme der Reaktorschneellabschaltung (RESA) löst das Frischdampf-(FD)-Aktivitätssignal keine weiteren Schutzaktionen des Reaktorschutzsystems aus. Die Einspeisekapazität von nur einer Pumpe ist so groß, dass das Leck sicher überspeist wird.

Weitere Maßnahmen zur Störfallbeherrschung bestehen in Freigaben im Reaktorschutzsystem, so dass die Sicherheitseinspeisepumpen im weiteren Verlauf von Hand abgeschaltet werden können.

Das Schutzziel R wird dahingehend berücksichtigt, dass die Leckageergänzung bei allen Varianten immer hoch boriert ist und so eine möglichst hohe Borkonzentration am Ende der automatischen Maßnahmen im Primärkreis vorhanden ist. Ergänzend dazu haben die nach BHB vorgesehenen Handmaßnahmen das Ziel, den Übertrag von niedrig boriertem Kühlmittel vom defekten Dampferzeuger in den Primärkreis zu verhindern, wenn die HKMP nicht laufen. Auch die im BHB vorgeschriebenen Maßnahmen während der Wartezeit bei ausgefallenen HKMP führen dazu, dass das sekundärseitige Wasser durch die länger anhaltende Leckage aufboriert wird.

Zur näheren Beschreibung des Beherrschungskonzepts sind in Kap. 3.3 und 3.4 die Ereignisabläufe einschließlich der im BHB vorgesehenen wesentlichen Maßnahmen beschrieben, die den realitätsnahen Ablauf ohne und mit Notstromfall für die Minimierung der Aktivitätsabgabe darstellen. In Kap.3.5 und 3.6 werden die Fälle einschließlich BHB Maßnahmen beschrieben, bei denen ein nicht näher definierter Fehler dazu führt, dass die Notkühlkriterien erreicht werden und dadurch die Sicherheitseinspeisepumpen starten. Damit werden die ungünstigsten Varianten betrachtet, sowohl für die Aktivitätsabgabe als auch für die Kernküh-

lung. In Kap. 3.7 wird ein Ereignisablauf beschrieben, wie er auftritt, wenn nur Sicherheitssysteme Berücksichtigung finden.

3.2 Aufbau des BHB

Wie unter 3.1 beschrieben führen sowohl ausgefallene HKMP als auch laufende Sicherheitseinspeisepumpen zu höheren Drücken im Primärkreislauf. Aus diesem Grund werden neben den zu erwartenden realistischen Abläufen mit und ohne Notstromfall, für die vorgelagerte automatische Maßnahmen vorgesehen sind, auch die Fälle mit angeregter Sicherheitseinspeisung, ebenfalls mit und ohne Notstromfall, betrachtet.

Es sind im BHB daher vier ereignisorientierte Ablaufvarianten beschrieben:

- a. Ohne Notstromfall, ohne Notkühlkriterien (wahrscheinlichster Fall)
- b. Mit Notstromfall, ohne Notkühlkriterien
- c. Ohne Notstromfall, mit Notkühlkriterien
- d. Mit Notstromfall, mit Notkühlkriterien.

Die Hochdruck-(HD)-Sicherheitseinspeisung wird bei den BHB-Kapiteln immer im Zusammenhang mit dem Erreichen der Notkühlkriterien betrachtet.

Zur schnellen Erkennung der Variante existieren Störungsmeldungen der Klasse S, die in die relevanten Abläufe verweisen:

- Störungsmeldung Klasse S: DE Heizrohrleck I (FD-Aktivität > 20 Imp/s **und** Druckdifferenz RSB/Atm < 30 mbar -> BHB Fall a),
- Störungsmeldung Klasse S: DE Heizrohrleck II (FD-Aktivität > 20 Imp/s **und** Druckdifferenz RSB/Atm < 30 mbar **und** Drehzahl ≥ 2 HKMP < 94 %-> BHB Fall b),
- Störungsmeldung Klasse S: DE Heizrohrleck III (FD-Aktivität > 20 Imp/s **und** Druckdifferenz RSB/Atm < 30 mbar **und** Notkühlkriterien ausgelöst-> BHB Fall c/d) (nicht bei den Konvoi-Anlagen, da dort eine automatische Förderhöhenbegrenzung vorhanden ist).

Mit der Störungsmeldung DE-Heizrohrleck I wird unabhängig von der Variante immer auf ein Heizrohrleck verwiesen. Die Störungsmeldung DE-Heizrohrleck II spricht immer an, wenn mindestens 2 HKMP ausgefallen sind, unabhängig von den weiteren Varianten. DE-Heizrohrleck III schließlich verweist auf die laufenden HD-Sicherheitseinspeisepumpen.

Der Grund für diese Variantenauswahl ist, dass bei diesen Varianten differenzierte Maßnahmen und Grenzwerte im Bereich der vorgelagerten Maßnahmen sowie entsprechend unterschiedliche Handmaßnahmen vorgesehen sind, um dem Minimierungsgebot beim Schutzziel S gerecht zu werden. Dabei geht es insbesondere um die Berücksichtigung von ausgefallenen HKMP und angeregten Sicherheitseinspeisepumpen, wie unter 3.1 ausgeführt. Andere Abläufe führen nicht zu wesentlich anderen Maßnahmen als die genannten Varianten.

Ergänzend zu diesen 4 Varianten ist im BHB ein weiteres Kapitel zum DE-Heizrohrleck enthalten, in dem ein Ablauf ohne automatisches Ansprechen der Aktivitätsgrenzwerte beschrieben ist. In diesem Fall, insbesondere bei nicht vom Volumenregelsystem überspeisbaren Leckgrößen, kann an der Reaktorschutztafel das Aktivitätssignal von Hand gesetzt werden. Damit werden alle automatischen Maßnahmen und Meldungen ausgelöst, soweit sie noch wirksam werden können, und alle Freigaben zur Durchführung von Handmaßnahmen gegeben. Über die ebenfalls ausgelösten Störungsmeldungen der Klasse S erfolgt der Übergang in eines der vier oben beschriebenen BHB Kapitel.

3.3 Ereignisablauf ohne Notstromfall, ohne Sicherheitseinspeisung (mit vorgelagerten Maßnahmen und mit laufenden Hauptkühlmittelpumpen)

Das Versagen eines Dampferzeuger-Heizrohres (2F Bruch) führt bei Vollast zu einem maximalen Leckmassenstrom auf die Sekundärseite von ca. 45 kg/s. Damit kommt es zu folgendem Ablauf:

- Erkennen des Heizrohrlecks durch diversitäre (GM Zählrohre und Ionisationskammern) Aktivitätsmessungen an der Frischdampfleitung im Ringraum durch das Reaktorschutzsystem.
- Automatische Anregung des 4-strängigen Begrenzungssystems mit redundanten und diversitären vorgelagerten Maßnahmen.
- Abfahren der Anlage mit 20 %/min (Boreinspeisung und Stabeinfahren) auf 30 % Leistung.
- Daran anschließend das Absenken des Kühlmitteldrucks durch Druckhalter-Sprühen. Das Sprühen erfolgt sowohl über das betriebliche Sprühsystem als auch über das notstromgesicherte Volumenregelsystem und das Zusatzboriersystem.
- Zusätzlich zur Verbesserung der Sprühwirksamkeit und zur Kühlmittelergänzung automatischer Start der zweiten Pumpe des Volumenregelsystems und Schließen der Entnahme des Volumenregelsystems ebenfalls automatisch bis auf die Mindestmenge.
- Die Kühlmittelergänzung nach Beendigung des Sprühens erfolgt durch das Volumenregelsystem mit 2 Pumpen und reduzierter Entnahmemenge sowie durch das Zusatzboriersystem mit 7000 ppm Borkonzentration.

Die Reaktorschnellabschaltung erfolgt entweder bei einem Kühlmitteldruck von 131 bar oder 300 s nach Ansprechen der Aktivitätsgrenzwerte.

Mit diesen automatischen Maßnahmen wird ein stabiler Zustand der Anlage bei einem Kühlmitteldruck von ca. 90 bar und einem Sekundärdruck von 76 bar bei laufenden HKMP erreicht.

Die Dampferzeugerfüllstände werden während des Abfahrens mit 20 %/min automatisch durch Absenkung von Sollwerten und Schließen von Armaturen auf einen niedrigen Wert eingeregelt, um ausreichend Volumen zur Aufnahme der von der Primärseite übergetretenen Leckagemenge zu schaffen.

Das Zusammenwirken der automatischen Maßnahmen wurde in jeder Anlage im Rahmen der Erstinbetriebsetzung als Versuch aus dem Leistungsbetrieb erprobt.

Nach Ablauf der o. g. automatischen Maßnahmen wird entsprechend den Vorgaben des BHB durch Handmaßnahmen der defekte Dampferzeuger auf der Sekundärseite frischdampf- und speisewasserseitig isoliert, so dass eine weitere Bespeisung des defekten DE sicher verhindert wird. Außerdem wird die HKMP in diesem Loop abgeschaltet und elektrisch unscharf gemacht. Anschließend wird das weitere Abfahren der Anlage manuell gestartet.

Da der Druck im defekten und isolierten Dampferzeuger annähernd konstant bleibt, fällt der Kühlmitteldruck im Verlauf des Abfahrens unter den Sekundärdruck ab. Aus dem defekten Dampferzeuger strömt dann Sekundärwasser auf die Primärseite, das sich dort mit dem rückwärts strömenden Kühlmittel in diesem Kreislauf vermischt. Der weitere Strömungsweg der Mischung aus Primärkühlmittel und sekundärseitigem Eintrag verläuft über das obere Plenum, einen weiteren vorwärts durchströmten Loop, den Reaktorfallraum und das untere Plenum. Auf diesem Weg wird das Deionat aus dem Sekundärkreislauf mit dem Primärkühlmittel weitgehend vermischt, so dass sich daraus keine relevante Verringerung der Borkonzentration ergibt, wenn das Kühlmittel in den Reaktorkern eintritt.

Die Bespeisung der intakten DE erfolgt mit den An- und Abfahrpumpen, die warmes Speisewasser aus dem Speisewasserbehälter fördern. In den defekten DE erfolgt keine weitere Einspeisung, da er frischdampf- und speisewasserseitig abgesperrt ist.

Durch diese Abfahrweise fällt der Füllstand im defekten DE soweit ab, bis die Heizrohre in den Dampfraum ragen. Infolge des Abfahrens ist das gesamte Primärkühlmittel abgekühlt, aufgrund der Rückwärtsdurchströmung auch im defekten Dampferzeuger. So lange die Heizrohre mit Wasser bedeckt sind, bleibt der sekundärseitige Druck im Dampferzeuger nahezu konstant. Ist der Füllstand im defekten DE durch die Leckage auf die Primärseite soweit abgefallen, dass die Heizrohre in den Dampfraum ragen, kondensiert der Dampf an den kalten U-Rohren und der Druck im Dampferzeuger fällt, ohne dass Dampf abgegeben werden muss. Dadurch gleichen sich die Drücke zwischen Primär- und Sekundärkreis an und der Deionateintrag in die Primärseite wird beendet. Damit fällt auch der Füllstand nicht weiter ab, so dass das Notspeisesystem nicht angefordert wird.

3.4 Ereignisablauf mit Notstromfall, ohne Sicherheitseinspeisepumpen (mit vorgelagerten Maßnahmen, ohne laufende Hauptkühlmittelpumpen)

Für die Fälle, dass mit RESA/Turbinenschnellabschaltung (TUSA) ein Notstromfall auftritt oder die HKMP aus anderen Gründen ausfallen, bildet sich eine Aufwärmspanne im Reaktorkern aus, die für einen Antrieb des Naturumlaufs sorgt. Das Kühlmittel mit der heißseitig höheren Temperatur strömt dabei auch direkt unter den Reaktordruckbehälter-(RDB)-Deckel. Dadurch wird der Sättigungsdruck unter dem RDB-Deckel bereits bei einem Kühlmitteldruck von ca. 100 bar erreicht. Eine weitere wirksame Druckabsenkung durch Sprühen ist dann nicht möglich, da die Dampfbildung unter dem RDB Deckel zu einer Volumenexpansion und damit zu einem Füllstandsanstieg im Druckhalter (DH) führt. Bei Erreichen von 0,8 m oberhalb des automatisch hochgesetzten Sollwerts, was für den DH Füllstand als Anzeichen für das Erreichen des Sättigungszustands angesehen wird, wird das Sprühen von der Begrenzung abgesteuert. Die Anlage stabilisiert

sich bei einem Kühlmitteldruck von ca. 90 bis 100 bar und einem Sekundärdruck von 75 bar nach dem Teilabfahren unter Naturumlaufbedingungen.

Nach dem Isolieren des defekten DE ist gemäß den Vorgaben des BHB vorgesehen, die Anlage in diesem Zustand zu belassen, bis die HKMP in den intakten Loops wieder zugeschaltet werden können. Die HKMP im Loop mit dem defekten DE wird nach BHB auch in diesem Fall unscharf geschaltet. Die zulässige Dauer dieser Phase ist durch die verfügbaren Deionatvorräte begrenzt, die für eine Einspeisedauer von mindestens 10 Stunden ausreichen. Bei Wiederverfügbarkeit der HKMP erfolgt das Abfahren wie in Kapitel 3.3 beschrieben. Die Bespeisung der intakten DE erfolgt auch in diesem Fall durch die An- und Abfahrpumpen aus dem Speisewasserbehälter. Eine betriebliche Bespeisung des defekten DE ist nicht erforderlich und auch nicht möglich, da er frischdampf- und speisewasserseitig gemäß BHB abgesperrt ist. Das Notspeisesystem wird aufgrund des Füllstandes im defekten DE nicht angefordert.

Während der Phase mit verfügbaren Deionatvorräten läuft der Naturumlauf in allen Loops, also auch in demjenigen mit dem isolierten DE weiter. Die Leckage zur Sekundärseite, die nach dem Isolieren des defekten Dampferzeugers und dem daraus resultierenden Druckanstieg auf der Sekundärseite zwar abnimmt, aber bis zum Druckausgleich im defekten DE vorhanden ist, wird durch die Einspeisung von boriiertem Kühlmittel aus dem Volumenregel- oder Zusatzboriersystem ergänzt. Dadurch wird sowohl der gesamte Primärkreis als auch das sekundärseitige Wasser im defekten DE aufboriiert.

Zur Einhaltung der angestrebten sekundär- und primärseitigen Druckverhältnisse infolge der Abkühlung des Druckhalters durch Wärmeverluste soll die Sekundärseite nach BHB stündlich um 2 K abgefahren werden. Dabei bleibt der Naturumlauf auch im Loop mit dem defekten DE erhalten.

Ist das Zuschalten der HKMP in den intakten Loops nicht möglich, bevor der Mindestdeionatvorrat unterschritten ist, soll gemäß BHB unter Naturumlaufbedingungen mit 50 K/h abgefahren werden. Da es dabei zum Stillstand des Naturumlaufts in dem Loop mit dem defekten DE kommt, soll gemäß BHB so abgefahren werden, dass durch Dampfabgabe über die Anwärmlleitung der Frischdampfdruck im defekten Dampferzeuger an den Kühlmitteldruck angeglichen wird, so dass möglichst keine Rückströmung von der Sekundärseite in den Primärkreis erfolgt.

Zielsetzung dieser Vorgehensweise ist, dass möglichst kein Deionat in den nicht durchströmten Loop des defekten DE gelangen kann. Falls es doch zur Rückströmung kommen sollte, tritt Sekundärwasser auf die Primärseite über, das durch die langanhaltende Leckage aus dem Primärkreis aufboriiert ist.

3.5 Ereignisablauf ohne Notstromfall, mit Sicherheitseinspeisung (durch Begrenzungen angesteuerte Maßnahmen unwirksam)

Falls bei dem maximal zu unterstellenden Heizrohrleck (äquivalent 2 F) die Druckabsenkung als unwirksam unterstellt wird, sinkt der Druckhalter-(DH)-Füllstand aufgrund der relativ hohen Leckage so stark ab, dass eine Druckhalterfüllstand von $< 2,28$ m erreicht wird. Ursache dafür ist, dass mit dem Volumenregelsystem

das Leck nicht überspeist werden kann. Mit sinkendem Füllstand sinkt auch der Druck im Primärkreislauf. Bei einem Druck von <131 bar erfolgt RESA (falls nicht bereits vorher durch andere Kriterien ausgelöst) und bei <110 bar und einem DH-Füllstand von <2,28 m werden die Notkühlkriterien ausgelöst, mit Start der Sicherheitseinspeisung. Von dem Füllstandsgrenzwert werden auch die HKMP abgeschaltet und der Primärkreisabschluss ausgelöst, womit auch das Volumenregelsystem abgesperrt wird.

Nach den automatischen Maßnahmen soll entsprechend BHB der DH-Füllstand durch Sprühen mit dem Zusatzboriersystem oder dem Volumenregelsystem (nach Wiederinbetriebnahme) angehoben und die Sicherheitseinspeisepumpen von Hand abgeschaltet werden. Dazu ist ein Teilerücksetzen der Notkühlkriterien an der Reaktorschutztafel möglich. Bei den Konvoi-Anlagen erfolgt eine Förderhöhenbegrenzung der Sicherheitseinspeisepumpen automatisch, so dass diese nicht abgeschaltet werden müssen.

Nach Rücksetzen der restlichen Notkühlsignale und des Primärkreisabschlusses und Wiederinbetriebnahme der betrieblichen Einrichtungen können die HKMP in den intakten DE wieder zugeschaltet werden. Alle weiteren Maßnahmen und das Abfahren werden im Wesentlichen wie in Kap. 3.3 beschrieben durchgeführt.

3.6 Ereignisablauf mit Notstromfall, mit Sicherheitseinspeisung (durch Begrenzungen angesteuerte Maßnahmen unwirksam, ohne laufende Hauptkühlmittelpumpen)

Tritt bei einer Variante nach Kap. 3.5 zusätzlich der Notstromfall ein, unterscheidet sich der Ablauf im Wesentlichen dahingehend, dass das Teilabfahren anspricht und eine Dampfabgabe über Dach erfolgt. Wie in Kapitel 3.5 hat auch hier das Abschalten der Sicherheitseinspeisepumpen Priorität. Danach ergibt sich wieder ein Anlagenzustand entsprechend Kap. 3.4 mit den dazugehörigen Maßnahmen wie z. B. das Einstellen eines stationären Anlagenzustands im Zustand Nulllast heiß und die Wartephase bis zur Spannungswiederkehr bzw. das Abfahren unter Naturumlaufbedingungen.

3.7 Ereignisablauf ohne vorgelagerte Maßnahmen, nur mit Sicherheitssystemen

Für den Fall, dass alle vorgelagerten Maßnahmen aus den Begrenzungen nicht berücksichtigt werden, bleibt als erste Maßnahme die RESA durch „Aktivität hoch“. Der Druckhalter-Füllstand und der Kühlmitteldruck fallen infolge der Leckage in den Dampferzeuger ab. Bei einem Druckhalterfüllstand von <2,28 m werden die Notkühlkriterien ausgelöst. Die dadurch gestarteten Sicherheitseinspeisepumpen prägen dem Primärkreis den Druck nahezu entsprechend der Nullförderhöhe der Sicherheitseinspeisepumpen auf. Für den Fall, dass der Notstromfall mit betrachtet wird, tritt dieser mit RESA/TUSA ein.

Von den Notkühlkriterien werden auch die HKMP abgeschaltet.

Nach Ablauf von 30 Minuten soll entsprechend dem BHB der DH-Füllstand durch Sprühen mit dem Zusatzboriersystem in den Druckhalter angehoben und die Sicherheitseinspeisepumpen von Hand abgeschaltet

werden, wenn im defekten DE ein Füllstand von mehr als 13,5 m erreicht ist. Danach erfolgt die Stabilisierung der Anlage auf einen Zustand, wie er beim oben beschriebenen Ereignisablauf mit Ausfall der HKMP (Kap. 3.4) vorliegt. Entsprechend sind auch die weiteren Handmaßnahmen vorgesehen.

Bei den Konvoi-Anlagen wird ergänzend zu den vorhergehend beschriebenen Maßnahmen eine automatische Begrenzung der maximalen Förderhöhe der Sicherheitseinspeisepumpen vom Reaktorschutz ausgelöst, wenn der Füllstand in einem DE > 15 m beträgt.

Sekundärseitig würde bei Nichtverfügbarkeit der An- und Abfahrpumpen der Füllstand in den intakten den DE bis auf < 5 m abfallen. Dadurch würde das Notspeisesystem gestartet und diese DE wieder aufgefüllt werden. Die Druckanpassung des isolierten Dampferzeugers an den Druck der Primärseite beim Abfahren wird dann nach Schutzziel-BHB durch die Vorsteuerventile der FD-Abschlussarmatur vorgenommen, um den Übertrag von niedrig boriertem Kühlmittel vom isolierten Dampferzeuger in den Primärkreis zu verhindern und somit die Ausbildung eines Deionatpfropfens zu vermeiden.

4 Grenzbetrachtungen zu Szenarien mit „Dampferzeugerheizrohrleck“ zur Ermittlung eines Deionatpfropfens im Primärkreislauf mit maximierter Reaktivitätszufuhr beim Eintrag in den Kern

4.1 Analyse zum EnBG-Szenario

Zur Bewertung der sicherheitstechnischen Auswirkungen des Ereignisses „DEHL“ unter den von EnBG getroffenen Annahmen, wurden von der GRS für eine Anlage exemplarische thermohydraulische [2] und vom Helmholtz Zentrum Dresden Rossendorf (HZDR) reaktordynamische [9] Analysen durchgeführt. Dabei wurden – z.T. noch über die Annahmen von EnBG hinausgehend - die Ausfälle/Fehlhandlungen derart gewählt, dass es zu einem maximierten Deionateintrag über das DEHL in den Primärkreislauf mit möglichst niedriger Temperatur und zu einer Minimierung der Borkonzentration im übrigen Primärkreis kommt.

4.1.1 Analysen der GRS

Die Analyse wurde entsprechend den Annahmen von EnBG durchgeführt. Um für das Szenarium von EnBG eine konkrete Analyse durchführen zu können, mussten zusätzliche Randbedingungen gesetzt und im Sinne einer Grenzbetrachtung weitere ungünstige Annahmen gewählt werden. Deshalb enthalten die folgenden Punkte sowohl Annahmen von EnBG als auch weitere Annahmen der GRS:

- Abriss eines Dampferzeugerheizrohres kaltseitig über dem Rohrboden (ungünstigste Lecklage für Bildung Deionatpfropfen) unmittelbar zu Zyklusbeginn (höchste Anforderung an die Borkonzentration).
- Unterstellung von Fehlern, die in der Anfangsphase des Ereignisablaufs zu einer primärseitigen Druckabsenkung über den Zielwert hinaus und damit zu einer Abschaltung der HKMP führen

-
- (durch Fehlbedienung des Sprühens aus dem Volumenregelsystems oder mehrere technischer Fehler oder durch Abdriften von 4 Druckmessungen (GVA-Effekt) im Begrenzungs-system).
- Unterstellung, dass die Schichtmannschaft bei der Entscheidung zur anzuwendenden Prozedur des BHB nach dem automatischen Abfahren
 - Fall A: DEHL ohne Notstromfall, ohne Notkühlkriterien (HKMP verfügbar),
 - Fall B: DEHL mit Notstromfall, ohne Notkühlkriterien (HKMP nicht verfügbar),sich trotz nicht laufender HKMP für Fall A entscheidet, obwohl
 - durch die Störungsmeldung der Klasse S „DE-Heizrohrleck II“ darauf hingewiesen wird, dass bei einem aufgetretenen DEHL die HKMP ausgefallen sind und
 - nach BHB ein „Abfahren über intakte DE und 3v4 HKMP auf Nachkühlsystem“ gefordert wird.
 - Unterstellung, dass die Schichtmannschaft nach dem manuell ausgelösten sekundärseitigen Abfahren zwar erkennt, dass keine automatische Druckabsenkung entsprechend der Abfahrkennlinie angeregt wird (Folge des Ausfalls der HKMP), aber dann die Ursache hierfür nicht klärt und den Druck manuell auf die Übergangsbedingungen für das Nachkühlsystem absenkt,
 - Unterstellung, dass die Schichtmannschaft den Druck nicht nur auf 32 bar absenkt (Zielwert für das automatische Abfahren in Fall A), sondern weit darüber hinaus auf 8,5 bar (Annahme, damit es in der Analyse zu einem Wiederanlaufen des Naturumlafs und damit zum Eintritt des Pfropfens in den RDB kommt).
 - Unterstellung, dass die Schichtmannschaft den Füllstand im defekten DE infolge unterlassenen Druckausgleichs soweit abfallen lässt, dass es zum automatischen Start der Notbespeisung kommt.
 - Annahme, dass im Not- und Nachkühlsystem gerade die Sicherheitseinspeisepumpe im Strang mit dem defekten DE unverfügbar ist.

Auswirkungen der Unterstellungen und Annahmen auf den Ereignisablauf:

Unter den oben genannten ungünstigen Randbedingungen wird die Sekundärseite des defekten Dampferzeugers nach der Isolation zunächst noch über primärseitigen Naturumlauf gekühlt. Mittelfristig wird der Naturumlauf beim Abfahren mit 50K/h jedoch abreißen, da die für den Antrieb des Naturumlafs vorhandene Druckdifferenz über den Reaktordruckbehälter nicht ausreicht, das über die intakten Dampferzeuger abgekühlte Kühlmittel über die U-Rohrbögen des defekten Dampferzeugers zu transportieren.

Wird entsprechend Fall A abgefahren und die primärseitige Druckabsenkung von Hand eingeleitet und kein Druckausgleich vorgenommen, entsteht eine Druckdifferenz zwischen dem defekten Dampferzeuger (Druck weitgehend konstant) und dem Primärkreis (Druckabsenkung) und somit eine Rückströmung in den Primärkreis, die zu einem ausgeprägten Füllstandsabfall im isolierten Dampferzeuger, letztlich mit Anregung des Notspeisesystems führt. Dadurch wird das Kühlmittel auf der Sekundärseite des isolierten defekten Dampferzeugers, das zu Beginn des Störfalls durch Primärkühlmittel über das Leck aufboriert wurde, über das Notspeisesystem wieder deboriert. Allerdings führt die Einspeisung auch dazu, dass der Sekundärdruck im defekten Dampferzeuger durch Kondensation fällt und damit der Leckmassenstrom wieder abnimmt.

Die Einspeisung des kalten Notspeisewassers führt zu einem raschen Kondensieren des Dampfs in den Heizrohren des defekten DE und damit zum DH-Füllstandsabfall auf $< 2,28$ m. Dadurch kommt es zum Primärkreisabschluss mit Abschaltung des Volumenregelsystems sowie zur Anregung der Notkühlkriterien und zum Start der Sicherheitseinspeisung (jedoch zu keiner Einspeisung in den Strang mit dem defekten DE wegen angenommener Unverfügbarkeit der entsprechenden Sicherheitseinspeisepumpe). Aufgrund der Einspeisekapazität der Sicherheitseinspeisung wird der Primärkreis rasch aufgefüllt.

Infolge der Rückströmung bildet sich im kalten Strang des isolierten Dampferzeugers ein niedrigborierter Kühlmittelpfropfen aus (bei Annahme, dass das Heizrohr auf der kalten Seite abgerissen ist), da der Naturumlauf zum Erliegen gekommen ist. Der niedrigborierte Kühlmittelpfropfen kann nun, abhängig von den Randbedingungen im Primärkreis, über Naturumlauf in den Reaktordruckbehälter und Reaktorkern eingetragen werden. Der Naturumlauf läuft wieder an, wenn die treibende Druckdifferenz über den Reaktordruckbehälter größer wird, als die dem Naturumlauf im defekten Dampferzeuger und Pumpenbogen entgegen wirkenden Kräfte. Damit es zum Wiederanlaufen des Naturumlaufs kommt, war in der Analyse eine Absenkung des Primärdrucks auf 8,5 bar erforderlich.

Ergebnis der GRS-Analyse mit den unterstellten Fehlern und Ausfällen

Die GRS-Analyse zeigt, dass unter den genannten Randbedingungen ein niedrigborierter Kühlmittelpfropfen von ca. 8 t (minimale Borkonzentration 88 ppm, mittlere Borkonzentration ca. 440 ppm, Dichte um 3.0 % niedriger als die Dichte des Primärkühlmittels) mit einem Massenstrom von 100 kg/s in den Ringraum des RDB einströmt, bei Massenströmen von etwa 60 kg/s in den intakten Kühlkreisläufen. Die Borkonzentration im Primärkreislauf beträgt 2200 ppm. Die Analysen der GRS mit einem Punktkinetikmodell liefern unter den genannten Bedingungen bei idealer Vermischung im Ringraum und einer Kühlmitteltemperatur von 135° C eine Unterkritikalität von ca. 6%.

4.1.2 Ergebnis der 3D-Analyse des HZDR zu dem von der GRS behandelten Szenario

Zur Absicherung der punktkinetischen Analysen der GRS hat das HZDR transiente 3D Analysen zum Reaktivitätseffekt beim Eintritt eines gemäß 4.1.1 bzw. [2] ermittelten Deionatpfropfens in den Reaktorkern durchgeführt [9]. Die Randbedingungen Pfropfengröße, Kühlmitteltemperatur im Kern bei Eintrag, Xenonkonzentration im Brennstoff entsprechend Vollast-Gleichgewichtsbedingungen (d.h. ohne Berücksichtigung des Xe-Aufbaus nach RESA), Reaktorschnellabschaltung mit allen Steuerstäben wurden aus [2] übernommen. Der Unterschied in der kritischen Borkonzentration zwischen dem Kern der o.g. Analyse und dem hier betrachteten wurde berücksichtigt. Zusätzlich konservativ im Sinne einer Grenzbetrachtung wurden jedoch die Borkonzentration im Pfropfen bei Eintritt in den RDB mit 0 ppm angenommen (in 4.1.1 mittlere Borkonzentration 440 ppm) und die erhöhte B-10-Anreicherung in den Zusatzborierbehältern vernachlässigt.¹

¹ Im Rahmen der HZDR Analyse wurde angenommen, dass die B10-Anreicherung des beim Kerneintritt des Pfropfens im Primärsystems enthaltenen Kühlmittels einheitlich für alle Anteile (Primärwasser des Leistungsbetriebs, Einspeisung mittels Volumenregelsystem und Zusatzboriersystem) 30% beträgt. In einigen Anlagen beträgt die B10-Anreicherung des durch das Zusatzboriersystem eingespeisten Kühlmittelanteils jedoch 50%. Daher ist auch die Borwirksamkeit des Kühlmittels insgesamt höher als bei einem Wert

Die gekoppelten 3D-Neutronenkinetik/1D-Thermohydraulik-Analysen wurden unter Vorgabe von zeitabhängigen Randbedingungen der Borkonzentration am Kerneintritt in jedes der 193 Brennelemente durchgeführt. Diese Borkonzentrationen wurden auf Basis von ROCOM-Experimenten zur Vermischung unter Naturumlaufbedingungen in allen vier Schleifen unter Vorgabe der in [2] spezifizierten Pfropfengröße ermittelt, so dass ein inhomogener Eintritt von unterschiedlich borierterem Kühlmittel in den Reaktorkern entsprechend den ROCOM Versuchsergebnissen modelliert wurde. Die den Analysen zu Grunde liegenden ROCOM-Experimente waren mit gleicher Kühlmitteldichte in allen Schleifen durchgeführt worden. Der in [2] ausgewiesene Dichteunterschied von 3.0 % konnte bei diesem Ansatz nicht berücksichtigt werden. Ein Dichteunterschied zwischen dem Kühlmittel aus den verschiedenen Schleifen ist in jedem Fall vermischungsfördernd und führt zu einer weiteren Aufborierung des in den Reaktordruckbehälter eingebrachten minderborierten Pfropfens (siehe hierzu z.B. [14; 15]). Auch aus diesem Grund sind die Ergebnisse des HZDR als Grenzbeurteilung anzusehen.

Diese Bedingungen führten in der 3D-Kernrechnung zu einer minimalen Unterkritikalität von 7.7 %.

4.1.3 Zusammenfassung zum EnBG-Szenario

Für die Analyse des EnBG-Szenariums wurden abdeckende Randbedingungen gewählt, die zu einer Maximierung der Größe des minderborierten Pfropfens und zu einer Minimierung der Borkonzentration im Pfropfen geführt haben. Durch die vollständige Auffüllung des kalten Strangs im Kühlkreislauf mit dem defekten Dampferzeuger mit fast reinem Deionat (infolge der Einspeisung von Notspeisewasser in den defekten Dampferzeuger) wurde die maximal in PKL-Versuchen bestätigte Pfropfengröße berechnet.

In einer 3D-Kernrechnung wurde dafür die minimale Unterkritikalität mit 7.7 % berechnet. Bei dieser Berechnung wurde die Zufuhr von negativer Reaktivität in Folge des transienten Xenonaufbaus vernachlässigt, ebenso die erhöhte B-10-Anreicherung in den Zusatzborierbehältern. Zusätzlich wurde die vermischungsfördernde Wirkung des Dichteunterschiedes zwischen dem Pfropfenwasser und dem umgebenden Kühlmittel vernachlässigt.

4.2 Grenzbetrachtung unter ausschließlicher Berücksichtigung von Sicherheitssystemen zum Aufborieren

In einer weiteren Analyse [8] hat die GRS ein fiktives Szenario unter den Randbedingungen untersucht, dass

- für die Einspeisung von Bor ausschließlich Sicherheitssysteme berücksichtigt werden (im EnBG-Szenario auch Einspeisung von Bor über das Volumenregelsystem),
- Handeingriffe erst nach 30 Minuten vorgenommen werden und danach nur Handeingriffe durchgeführt werden, die im BHB beschrieben sind,

von 30%. Würde dies im Rahmen der HZDR Analysen berücksichtigt, ergäbe sich eine gegenüber dem berechneten Wert vergrößerte Unterkritikalität.

-
- o kein Druckausgleich zwischen dem defekten DE und dem Primärkreis durchgeführt wird.

GRS-Ergebnisse

In der ersten halben Stunde nach Auslösung des DEHL werden vom Reaktorschutz die Zusatzboriersysteme und die Sicherheitseinspeisepumpen gestartet, die boriertes Kühlmittel in den Primärkreis einspeisen. Nach einer halben Stunde werden die im BHB vorgegebene Handmaßnahmen eingeleitet (Bespeisung des Primärkreises aus dem Borierbehälter, Abschaltung der Sicherheitseinspeisepumpen, Isolation des defekten Dampferzeugers, Abfahren der intakten Dampferzeuger auf 70 bar). In diesem Zeitraum bis zu einer Stunde nach der Lecköffnung werden etwa 80 t boriertes Kühlmittel in den Primärkreis eingespeist und der Primärkreis auf 1550 ppm und der defekte Dampferzeuger auf etwa 1000 ppm aufboriert (Borkonzentration bei Vollast und Zyklusbeginn (BOC): 1150 ppm).

Die weitere Aufborierung ist abhängig von der Strategie, die von der Schicht zur Haltung des Füllstands im Druckhalter angewendet wird:

- a. Füllstandshaltung durch Bespeisung des Primärkreises mit dem Zusatzboriersystem
- b. Füllstandshaltung durch Druckhaltersprühen mit dem Zusatzboriersystem

Zu a.):

In der Analyse wurde angenommen, dass die Füllstandshaltung durch Bespeisung des Primärkreises mit dem Zusatzboriersystem erfolgt. Bei dieser Strategie erfolgt eine Aufborierung des Primärkreises auf etwa 2000 ppm und des defekten Dampferzeugers auf etwa 1600 ppm. Bei dieser Strategie ist eine Druckabsenkung im Primärkreis auf die Übernahmbedingungen des Nachkühlsystems nach dem Abfahren der intakten Dampferzeuger nicht möglich.

Primärseitige Maßnahmen zur Druckabsenkung könnten zu einer Absenkung des Füllstands und einer Bespeisung über das Notspeisesystem im defekten Dampferzeuger führen. Der Bruchmassenstrom zum Primärkreis würde die Borkonzentration im Primärkühlmittel nur unwesentlich wegen der bereits sehr hohen Borkonzentration im defekten Dampferzeuger verringern. Eine Unterschreitung von 1800 ppm im Primärkreis und dem Reaktordruckbehälter ist nicht zu erwarten. In diesem Fall sind die Ausbildung und der Transport eines minder borierten Pfropfens wie im zuvor betrachteten Szenarium (Kap. 4.1) zu erwarten.

Zu b.):

Zur weiteren Aufborierung des Primärkreises über die 1550 ppm bei der Strategie, den Druckhalterfüllstand durch Druckhaltersprühen auf dem Sollwert zu halten, wurde von der GRS keine rechnerische Analyse durchgeführt. Stattdessen wurde vom HZDR eine 3D-Kritikalitätsanalyse mit einer Borkonzentration von 1500 ppm (abgerundet) im Primärkühlkreislauf vorgenommen.

HZDR-Ergebnisse

In der gleichen Art wie in Kapitel 4.1.2 beschrieben wurde für diese Bedingungen eine 3D-Kernanalyse durchgeführt. Die Größe und der Borgehalt des unterstellten Pfropfens entsprechen denen aus der Analyse in Kap. 4.1. Die minimale Unterkritikalität für diese Bedingungen wurde mit 1.0 % berechnet.

Zur Einschätzung der Konservativität dieses Wertes wurde im HZDR eine CFD (Computational Fluid Dynamics)-Analyse der Vermischung innerhalb des Reaktordruckbehälters unter den o.g. Randbedingungen durchgeführt, allerdings mit Berücksichtigung des Dichteunterschiedes zwischen dem minderborierten Pfropfen und dem Umgebungswasser. Aus dieser CFD-Analyse wurden, wie bei einem ROCOM-Experiment, zeitabhängige Randbedingungen am Eintritt in jedes Brennelement als Randbedingung für eine 3D Kernanalyse mit dem Rechenprogramm DYN3D extrahiert. Bei ansonsten identischen Randbedingungen ergibt sich in dieser 3D Kernanalyse ein Wert für die minimale Unterkritikalität von 4.9 %. Diese Differenz zum o.g. Wert von 1.0 % verdeutlicht die Konservativität des Ansatzes ohne Berücksichtigung des Dichteunterschiedes.

5 Bewertung durch den Ausschuss

Das Energiebüro Gorxheimetal (EnBG) sowie das Institut für Sicherheits- und Risikowissenschaften Wien (ISR) haben dem Ausschuss zum Ereignis „Dampferzeugerheizrohleck bis maximal 2F“ eine Reihe von Aussagen bzw. Fragen vorgelegt. Diese beziehen sich auf den Eintritt des Ereignisses, dessen Behandlung im Betriebshandbuch, auf verschiedene Ereignisablaufvarianten sowie die Beherrschung des Ereignisses im Hinblick auf einen Deionateintrag in den Reaktorkern. In diesem Kapitel 5 bewertet der Ausschuss die drei folgenden, aus seiner Sicht wesentlichen Aspekte:

- Eintrittshäufigkeit eines 2F Dampferzeugerheizrohrbruchs
- Darstellungen zur Ereignisbehandlung im Betriebshandbuch
- Beherrschung des Ereignisses im Hinblick auf einen Deionateintrag in den Reaktorkern

5.1 Eintrittshäufigkeit eines 2F Dampferzeugerheizrohrbruchs

Dampferzeuger-Heizrohrschäden traten in der Vergangenheit insbesondere bei Heizrohren aus Inconel 600 auf. In den deutschen DWR Anlagen kommt ausschließlich der Werkstoff Incoloy 800 zum Einsatz, der als wesentlich korrosionsbeständiger zu bewerten ist. Ergänzend dazu ist das restriktive Vorgehen in Deutschland zu beachten, das ein sehr frühzeitiges Verschließen der Heizrohre bei Vorliegen von Schädigungen infolge von korrosiven Angriffen vorsieht. Für die Bestimmung der Eintrittshäufigkeit für einen 2F-Bruch eines Dampferzeuger-Heizrohres in deutschen DWR ist daher nicht die weltweite Erfahrung zugrunde zu legen, sondern die für deutsche Dampferzeuger Spezifische. Da bisher in deutschen DWR kein 2F-Bruch aufgetreten ist, ergibt sich auf Basis einer Nullfehlerstatistik ein Erwartungswert für die Eintrittshäufigkeit von ca. $1,5 \cdot 10^{-3}/a$, der in den Probabilistischen Sicherheitsanalysen (PSA) im Rahmen der Sicherheitsüber-

prüfungen verwendet wurde. Unter Berücksichtigung der praktizierten Verschlussstrategie für geschädigte Heizrohre, der Wasserchemie und Prüfstrategie ist tatsächlich ein deutlich geringerer Wert zu erwarten (siehe auch RSK Stellungnahme aus der 447. Sitzung [12]).

Für das kleine Leck am Primärkreis mit 2-25 cm² wird in der PSA mit $1,4 \cdot 10^{-3}/a$ eine vergleichbare Eintrittshäufigkeit angesetzt. Die Vermutung von EnBG, es gebe eine zunehmende Wahrscheinlichkeit für Heizrohrleck-Störfälle, so dass diese wahrscheinlicher seien als ein sonstiges kleines Leck im Primärkreis, ist somit nach dem aktuellen Kenntnisstand für deutsche DWR unzutreffend.

5.2 Darstellungen zur Ereignisbehandlung im Betriebshandbuch

Die nachfolgenden Aussagen basieren auf einem dem Ausschuss exemplarisch vorgestellten ereignisorientierten BHB.

Das ereignisorientierte BHB hat die Aufgabe, der Schichtmannschaft Anweisungen zu geben, wie bei der Beherrschung eines aufgetretenen Ereignisses für einen repräsentativen Ablauf vorzugehen ist. Im Fall eines DEHLs muss zunächst der Austrag des kontaminierten Kühlmittels durch Isolierung des defekten Dampferzeugers verhindert bzw. begrenzt und die Wärmeabfuhr über die intakten Dampferzeuger sichergestellt werden. Danach muss die Anlage auf die Übernahmbedingungen der Nachkühlssysteme abgefahren und die Nachwärmeabfuhr sichergestellt werden.

Die Schichtmannschaft erkennt das aufgetretene Ereignis über Störungsmeldungen der Klasse S und weitere Anzeigen in der Warte. Auf Basis dieser Informationen muss die Schichtmannschaft das entsprechende Kapitel im ereignisorientierten BHB identifizieren und danach vorgehen.

Beim Dampferzeuger Heizrohrleck ist aufgrund der Störungsmeldungen Klasse S das Kapitel „DE-Heizrohrleck mit Ansprechen der FD-Aktivitätsmessstellen“ heranzuziehen. Entsprechend der Zusatzmeldungen „DE-Heizrohrleck I bis III“ sind verschiedene Handlungsabläufe vorgesehen, die von den Randbedingungen des aufgetreten DEHLs abhängen.

In dem ereignisorientierten Teil des BHB, welches den Ausschussberatungen zugrunde lag, sind vier Abläufe beschrieben:

- a. Ohne Notstromfall, ohne Sicherheitseinspeisung
- b. Mit Notstromfall, ohne Sicherheitseinspeisung
- c. Ohne Notstromfall, mit Sicherheitseinspeisung
- d. Mit Notstromfall, mit Sicherheitseinspeisung

Damit werden vier repräsentative Varianten beschrieben, die sich hinsichtlich bestimmter Effekte, die für die Ereignisbeherrschung wesentlich sind, unterscheiden. Diese vier Varianten spannen zusammen mit der schutzzielorientierten Vorgehensweise einen Rahmen für die Ereignisbeherrschung auf. Vor diesem Hinter-

grund sind die im ereignisorientierten Teil des BHB definierten vier Varianten nach Auffassung des Ausschusses geeignet gewählt.

Allerdings besteht, wie bei allen im ereignisorientierten BHB beschriebenen Ereignisabläufen, das grundsätzliche Problem, dass sich Abweichungen zu den beschriebenen Abläufen ergeben können. Dies ist z.B. dann der Fall, wenn zusätzliche Funktionsausfälle unterstellt werden (z.B. Unverfügbarkeit von Begrenzungsmaßnahmen in der Anfangsphase eines DE-Heizrohrbruchs). In diesen Fällen muss das Schichtpersonal auf Basis der verfügbaren Informationen unter Berücksichtigung der im BHB festgelegten schutzzielorientierten Vorgehensweise geeignete Maßnahmen auswählen und durchführen. Aus Sicht des Ausschusses sind die in den schriftlichen betrieblichen Regelungen getroffenen Festlegungen geeignet zur Ereignisbeherrschung.

5.3 Beherrschung des Ereignisses im Hinblick auf einen Deionateintrag in den Reaktorkern

Der Ausschuss hat im Rahmen seiner Beratungen zur Bewertung des Potentials für die Ausbildung eines Deionatpfropfens mit nachfolgender Rekritikalität nach einem 2F Dampferzeugerheizrohrbruch keine Einsicht in anlagenspezifische Analysen genommen. Vielmehr verfolgt der Ausschuss den Ansatz, auf Basis von Grundsatzüberlegungen zum verfahrenstechnischen Ablauf [16], von exemplarischen thermohydraulischen Analysen, durchgeführt von der GRS [2], [8], und von neutronenkinetischen 3D Kernrechnungen, durchgeführt vom HZDR [9], (siehe Kapitel 4.1 und 4.2), eine exemplarische Grenzbetrachtung vorzunehmen. Damit sollen die ausschlaggebenden Randbedingungen unter Beachtung physikalisch-technischer Gegebenheiten so hinreichend abdeckend abgeschätzt werden, dass unter den für ein Ereignis der Sicherheitsebene 3 anzusetzenden Analyse-Bedingungen keine ungünstigeren Ergebnisse unterstellt werden müssen.

Diese Grenzbetrachtung umfasst im Wesentlichen die folgenden vier Bedingungen:

1. Ermittlung der Größe und des Borgehalt eines anzusetzenden Deionatpfropfens:

Die Ermittlung der Größe und des Borgehalt eines anzusetzenden Deionatpfropfens erfolgt auf Basis der in Kapitel 4.1 beschriebenen Analysen der GRS. Dabei kommt es zu einer Pfropfengröße, die, unter Beachtung vorhandener thermohydraulischer Randbedingungen, in etwa dem durch die Gegebenheiten im Pumpenbogen und kalten Strang geometrisch maximal Möglichen (ca. 8 t) entspricht², mit einer minimalen Borkonzentration von ca. 100 ppm. Die mittlere Borkonzentration beim Eintritt in den Reaktordruckbehälter beträgt ca. 440 ppm.

² Der Pumpenbogen und kalte Strang einschließlich der HKMP umfassen etwa 12 m³ und das DE-Austrittsplenum etwa 6 m³. Daraus ergibt sich für einen maximalen Deionatpfropfen ein maximales Volumen von bis zu 18 m³. Da das DE - Austrittsplenum bei der Ausbildung des Deionatpfropfens nur teilweise gefüllt ist (durch PKL Versuche bestätigt) verringert sich dieses Volumen auf etwa 14 m³. Der in [2] (siehe darin Abb. 7) ermittelte niedrig borierte Pfropfen von etwa 8 t hat bei Berücksichtigung der Dichte ein Volumen von 9 m³. Die Verringerung der Pfropfengröße von etwa 14 m³ auf 9 m³ ist die Folge eines teilweisen Abströmen des niedrig borierten Pfropfens zur Sekundärseite des defekten DE, wenn dieser zweimal an der Bruchstelle vorbeigeschoben wird (beim Wiederauffüllen der U-Rohre und beim Anlauf des Naturumlaufts, ebenfalls durch PKL Versuche bestätigt) und der Ausbildung flacherer Flanken beim zeitversetzten Anlauf des Naturumlaufts in den einzelnen U-Rohren und der Durchströmung des Pfropfens durch das DE Austrittsplenums (ebenfalls durch PKL bestätigt).

Bei einer solchen Grenzbetrachtung erübrigen sich aus Sicht des Ausschusses Detailüberlegungen zu möglichen Variationen im Ereignisablauf (bspw. hinsichtlich Variationen in Fehlhandlungen oder Systemunverfügbarkeiten oder deren Zeitpunkt) hinsichtlich der Ermittlung der Größe und des Borgehalt eines anzusetzenden Deionatpfropfens.

2. Ermittlung des Borgehalts im Primärsystem:

Die Ermittlung des Borgehalts im Primärsystem erfolgt auf Basis der ausschließlichen Kreditierung der Aufborierung durch Sicherheitseinrichtungen auf Basis einer einfachen Massenbilanz gemäß [16]. Dabei wird im Sinne der Grenzbetrachtung unterstellt, dass insgesamt durch Sicherheitseinspeise- und Zusatzborierpumpen ca. 67 t boriertes Kühlmittel eingespeist werden. Diese setzen sich zusammen aus:

- 60 t aus den Flutbehältern mit 2200 ppm und 30% B10-Anteil. Dies entspricht der durch den verfahrenstechnisch Ablauf bis zum Isolieren des Dampferzeugers (unterstellt 30 Minuten nach Ereignisbeginn) vorgegebenen eingespeisten Masse.
- ca. 7 t Kühlmittel aus den Zusatzborierbehältern mit 7000 ppm und 50% B10-Anteil. Dies entspricht einem Anteil von ca. 30% des insgesamt vorhandenen Mindestinventars in den Zusatzborierbehältern von $4 \times 6 \text{ t} = 24 \text{ t}$). Durch die Begrenzung der Einspeisung aus den Borierbehältern wird das Potenzial für die Aufborierung des Pfropfens durch das umgebende Kühlmittel sowie der Abstand zur Kritikalität minimiert.

3. Vermischung des Deionatpfropfens bis zum Erreichen des Reaktorkerns:

Die Vermischung des Pfropfens auf dem Weg zum Reaktorkern erfolgt unter Heranziehung abdeckender in der ROCOM Versuchsanlage experimentell ermittelter Randbedingungen. Abdeckend bezüglich der sich ergebenden Verteilung der Borkonzentration am Kerneintritt sind die Vernachlässigung der anfänglichen Borkonzentration im Pfropfen durch Setzen dieses Wertes auf 0 ppm und die Nichtberücksichtigung des Dichteunterschiedes zwischen dem Pfropfen und dem Umgebungswasser. Beide Effekte führen zu niedrigeren Borkonzentrationen am Kerneintritt, wobei der Dichteunterschied einen deutlich stärkeren Einfluss hat. Letzteres ist dadurch bedingt, dass bei Vorliegen eines anfänglichen Dichteunterschiedes die Vermischung des deborierten Pfropfens auf dem Weg zum Kerneintritt zu einem deutlich stärkeren Abbau der Störung führt. Aus Sicht des Ausschusses ist die Anwendung dieses Vorgehens für die angestrebte Grenzbetrachtung geeignet.

4. Reaktivitätseffekt bei Eintritt des minderborierten Kühlmittels in den Reaktorkern:

Für den o. g. maximierten Deionatpfropfen (s. 1.), seine dreidimensional modellierte Vermischung bis zum Kerneintritt auf Basis von ungünstigst ausgewählten ROCOM Versuchsergebnissen (s. 3.) und eine minimierte Borkonzentration im Reaktorkern bei Eintritt minderborierten Kühlmittels (s. 2.) zeigen die vom HZDR durchgeführten 3D-reaktordynamischen Rechnungen mit dem Rechenprogramm DYN3D für einen exemplarischen Reaktorkern (für den ungünstigsten Zykluszeitpunkt (BOC Reaktivitätszustand des Reaktorkerns), bei Vernachlässigung des transient günstig wirkenden Xenonaufbaus sowie einer Kühlmitteltemperatur von 140 °C) [9] eine minimale Unterkritikalität von 1 % .

Insgesamt kann aus Sicht des Ausschusses daher festgestellt werden, dass bei Ansatz der beschriebenen Grenzbetrachtung ein ausreichender Abstand zur Kritikalität bestehen bleibt.

Beratungsunterlagen

- [1] Energiebüro Gorxheimertal, 24.03.2014, Beschreibung des Störfalls Dampferzeuger-Heizrohrleck (DEHL) mit Zusatzstörung
- [2] GRS, 16.09.2013, Stellungnahme zu einem Schreiben von Herrn Mayer (Energiebüro Gorxheimertal) an den Vorsitzenden der RSK vom 19. Februar 2013: „Risiko durch Deionatpfropfen beim Dampferzeugerheizrohrleck in einem DWR“
- [3] Nikolaus Müllner, 23. Jänner 2014, Institut für Sicherheits- und Risikowissenschaften, Universität für Bodenkultur Wien, Stellungnahme zu Stellungnahme Pointner, GRS 16.9.2013, zu Schreiben von Mayer, Energiebüro Gorxheimertal, an den Vorsitzenden der RSK und an das BMU, 21.05.2013: „Risiko durch Deionatpfropfen beim Dampferzeugerheizrohrleck in einem DWR“
- [4] Dipl.-Ing. Helmut Mayer, EnBG Energiebüro Gorxheimertal, Präsentation "DEHL bei Ausfall HKMP, Risiko durch Deionatpfropfen beim Dampferzeugerheizrohrleck in einem Druckwasserreaktor“, Anhörung in der 97. Sitzung des AST der Reaktorsicherheitskommission an 08.05.2014 in Bonn
- [5] N. Müllner, Stellungnahme zu „Stellungnahme Pointner, GRS 16.09.2013, zu Schreiben Mayer, Energiebüro Gorxheimertal 19.02.2013, an den Vorsitzenden der RSK und an das BMU, 21.05.2013: „Risiko durch Deionatpfropfen beim Dampferzeugerheizrohrleck in einem DWR“, Präsentation, RSK-Sitzung 8. Mai 2014, Bonn
- [6] W. Pointner, GRS, Risiko einer Rekritikalität durch einen Deionatpfropfen beim Dampferzeugerheizrohrleck in einem Druckwasserreaktor, Präsentation, 97. Sitzung des RSK-Ausschusses AST
- [7] Nikolaus Müllner Institut für Sicherheits- und Risikowissenschaften, Universität für Bodenkultur Wien, 30.06.2014, Schlussfolgerungen nach der 97. AST-Sitzung, 8.5.2014, zu „Risiko durch Deionatpfropfen beim Dampferzeugerheizrohrleck in einem DWR“
- [8] W. Pointner, Orientierungsanalyse zum Dampferzeugerheizrohrleck unter Auslegungsbedingungen, GRS, 06, August 2014
- [9] S. Kliem, 3D-Kernrechnungen zur Borverdünnung mit DYN3D, Juli 2014

-
- [10] P. Dräger et. al., Ermittlung des Standes von Wissenschaft und Technik bei der Durchführung und Bewertung von Störfallanalysen und der Verwendung von Analysesimulatoren, GRS-A-3635, Dezember 2011
- [11] RSK-Stellungnahme, Empfehlungen zur maximalen zulässigen Borkonzentration zur Sicherstellung der Unterkritikalität nach „Reflux-Condenser-Betrieb“ beim kleinen Leckstörfall, 446. Sitzung, April 2012
- [12] RSK-Stellungnahme, Stellungnahme „Zu unterstellende Leckagen an Dampferzeuger(DE)-Heizrohren, Mehrfachrohrbruch/Lecköffnung wanddickengeschwächter DE-Heizrohre“, 447. Sitzung, Mai 2012
- [13] TÜV Nord Gruppe, Schreiben an den BMU vom 17.9.2003, Gemeinsame Stellungnahme von GRS und TÜV zur Deborierung bei Störfällen mit kleinem Primärkreisleck und Reflux-Condenser-Betrieb
- [14] S. Kliem, H.-M. Prasser, T. Sühnel, F.-P. Weiss, A. Hansen: “Experimental de termination of the boron concentration distribution in the primary circuit of a PWR after a postulated cold leg small break loss-of-coolant-accident with cold leg safety injection” Nucl. Eng. Design, vol. 238(7), pp. 1788-1801 (2008)
- [15] T. Höhne, S. Kliem, U. Rohde, F.-P. Weiss: “Buoyancy driven coolant mixing studies of natural circulation flows at the ROCOM test facility using ANSYS CFX”, Nucl. Eng. Design, vol. 238(8), pp. 1987-1995 (2008)
- [16] Brettner/Pistner: „Abschätzung der Bormischkonzentration für eine Grenzbetrachtung auf Basis einer einfachen Massenbilanz“, Datum: 10.09.2014