

**Ergänzung der
bestehenden PSA
der Stufe 2 um
Ereignisbaumstruktur,
-quantifizierung und
mitigative menschliche
Handlungen**

Ergänzung der bestehenden PSA der Stufe 2 um Ereignisbaumstruktur, -quantifizierung und mitigative menschliche Handlungen

Horst Löffler
Michael Kowalik
Michael Hage
Sören Johst
Wolfgang Preischl

März 2018

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde liegende F&E-Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) unter dem Kennzeichen 4715R01345 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.

Deskriptoren

Ereignisbaum, Freisetzungskategorien, Personalhandlungen, PSA Stufe 2, Quellterme

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Einheitliche Ereignisbaumstruktur.....	3
2.1	Freisetzungskategorien (FK) und Quellterme.....	5
2.1.1	Notwendigkeit der Gruppenbildung	5
2.1.2	Freisetzungskategorien (FK).....	6
2.1.3	Quellterme	11
2.2	Ablaufentscheidende Phänomene	17
2.3	Informationsübermittlung aus der PSA Stufe 1	18
2.3.1	Darstellung der Kernschadenzustände (KSZ)	19
2.3.2	Übertragung der Kernschadenzustände (KSZ)	24
2.4	Schlüsselfragen im Ereignisbaum.....	25
2.5	Berücksichtigung von mitigativen Notfallmaßnahmen (NFM)	27
2.6	Gleichzeitiger Unfallablauf im Reaktorkern und im BELB.....	28
2.7	Der einheitliche Ereignisbaum	30
3	Überschlägige Quantifizierung der einheitlichen Ereignisbaumstruktur.....	33
3.1	Notfallmaßnahmen	33
3.2	Ergebnisdarstellung	34
3.2.1	Auswertungsmöglichkeiten im Überblick.....	34
3.2.2	Ergebnisbeispiele	36
4	Ergänzende Untersuchungen zu mitigativen menschlichen Handlungen im Bereich schwerer Unfallabläufe	39
4.1	Anleitung zur Analyse und Bewertung schädlicher Eingriffe.....	41
4.2	Analyse und Bewertung wissensbasierten mitigativen Handelns	42
4.3	Anwendungsbeispiel: Wiederherstellung der Möglichkeit zur Sumpfansaugung über Nachkühlpumpen	47
4.3.1	Randbedingungen der Ereignisse.....	48
4.3.2	Handlungsmodell.....	52

4.3.3	Analyse und Bewertung	58
4.3.4	Einfügen des Anwendungsbeispiels in den Ereignisbaum	62
4.4	Anwendungsbeispiel: Einspeisung mittels Volumenregelsystem.....	64
4.4.1	Randbedingungen des Ereignisses	64
4.4.2	Handlungsmodell.....	64
4.4.3	Analyse und Bewertung	64
4.4.4	Einfügen des Anwendungsbeispiels in den Ereignisbaum	67
4.5	Anwendungsbeispiel verspätete sekundärseitige Druckentlastung	68
4.5.1	Randbedingungen des Ereignisses	68
4.5.2	Handlungsmodell.....	68
4.5.3	Analyse und Bewertung	69
4.5.4	Einfügen des Anwendungsbeispiels in den Ereignisbaum	71
4.6	Anwendungsbeispiel verspätete primärseitige Druckentlastung.....	73
5	Vertiefte Untersuchungen zu induzierten Dampferzeuger- Heizrohrlecks	75
5.1	Stand von Wissenschaft und Technik	75
5.1.1	Zusammenfassung des Vergleichs	81
5.2	Auswertung und Interpretation vorhandener Arbeiten aus RS 1529.....	82
5.2.1	Beschreibung des untersuchten Szenarios	82
5.2.2	Struktur der Daten der Simulation	84
5.3	Modellierung im Ereignisbaum.....	85
5.4	Zusammenfassung der Integration von MCDET-Analysen in den Ereignisbaum.....	98
6	Ergebnisauswertung	99
6.1	SB-Versagen und Freisetzungskategorien.....	99
6.1.1	Ergebnisauswertung: SB-Versagen	99
6.1.2	Ergebnisauswertung: Freisetzungskategorien	102
6.2	Radionuklidfreisetzungen.....	106
6.3	Ermittlung der absoluten Wahrscheinlichkeit für ein DEHEIRO-Leck	108
6.4	Schlussfolgerungen zur Ergebnisauswertung	110

7	Zusammenfassung	113
	Literaturverzeichnis.....	115
	Abbildungsverzeichnis.....	121
	Tabellenverzeichnis.....	123
	Abkürzungsverzeichnis.....	125

1 Einleitung

In den Vorhaben werden Arbeiten zur „Entwicklung von Programmen für Störfall- und Unfallanalysen unter Nutzung der Betriebserfahrung“ durchgeführt. Die Arbeiten untergliedern sich in die Arbeitspakete:

- Arbeitspaket 5.1 „Verifizierung von Analysesimulatoren“
- Arbeitspaket 5.2 „Ergänzung der bestehenden PSA der Stufe 2“
- Arbeitspaket 5.3 „Untersuchungen zur deterministischen Bewertung der Einwirkungen aus Gasfreisetzungen und chemischen Explosionen“
- Arbeitspaket 5.4 „Generische Untersuchungen zu den Zuständen im Ringraum eines DWR KONVOI unter unfallbedingt erhöhten Leckagen aus dem Sicherheitsbehälter (SB) und Ableitung von potentiellen Notfallmaßnahmen zur Schadensbegrenzung“

Der vorliegende Bericht dokumentiert abschließend die Arbeiten im Arbeitspaket 5.2 „Ergänzung der bestehenden PSA der Stufe 2“ vom Vorhabensbeginn im März 2015 bis zum Vorhabensende im März 2018.

Der Leitfaden zur Durchführung der „Sicherheitsüberprüfung gemäß § 19a des Atomgesetzes – Leitfaden Probabilistische Sicherheitsanalyse –“ für Kernkraftwerke in der Bundesrepublik Deutschland /BMU 05/ stellt Anforderungen an eine PSA der Stufe 2, die sich auf den Leistungsbetrieb und auf interne einleitende Ereignisse beschränken. Die internationale Entwicklung wendet sich insbesondere auch nach den Unfällen in Japan von derartigen Beschränkungen ab und strebt eine umfassendere Analyse an, siehe hierzu z. B. auch die Aktivitäten im Rahmen der EU zu „extended PSA“ im EU-Projekt ASAMPSA-E (<http://asampsa.eu/>).

Die GRS hat über den Rahmen der Anforderungen im Leitfaden Probabilistische Sicherheitsanalyse (PSA-Leitfaden) hinaus im Auftrag des Bundes Unfallabläufe für einzelne andere Kombinationen von Auslösern und Anlagenzuständen (z. B. Einwirkungen von außen während des Leistungsbetriebs bzw. interne auslösende Ereignisse im Nichtleistungsbetrieb) sowie im Brennelementlagerbecken untersucht. Dabei wurden u. a. punktuell Ansätze zur strukturierten Ergebniszusammenfassung und -auswertung mittels Ereignisbaumtechnik entwickelt. Es liegt jedoch kein Konzept für eine umfassende und weitgehend vollständige probabilistische Bewertung der Unfallabläufe für

Anlagen mit der Berechtigung zum Leistungsbetrieb vor. Deshalb ist im vorliegenden Abschlussbericht ein Ansatz zu einer einheitlichen und allgemeinen probabilistischen Bewertung von Unfallabläufen mittels Ereignisbaumstruktur erarbeitet worden. Dies geschieht am Beispiel einer DWR-Anlage vom Typ Konvoi.

Im Rahmen dieser Aufgabe ist z. B. untersucht worden, ob es möglich und sinnvoll ist, einen einzelnen allgemein abdeckenden Ereignisbaum zu entwickeln oder ob mehrere einzelne Ereignisbäume für einzelne Unfallabläufe zu empfehlen sind. Ferner wurde für den empfohlenen Ansatz eine Ereignisbaumstruktur erstellt, die einen Rahmen für eine umfassende probabilistische Unfallanalyse bietet. Damit wird das Ziel verfolgt, eine begründete und praktikable Grundlage für eine umfassende PSA der Stufe 2 zu schaffen. Ausarbeitungen von Verzweigungswahrscheinlichkeiten und quantitative Arbeiten sind in diesem Bericht ebenfalls dokumentiert, wobei die Quantifizierungen nur beispielhaft vorgenommen wurden, um die Anwendbarkeit des entwickelten Konzeptes zu zeigen. Eine umfassende PSA der Stufe 2 ist nicht Gegenstand dieses Vorhabens.

Ein Ereignisablauf kann Eingriffe des Personals erfordern, die in Prozeduren und Training nicht vorgesehen sind. Das Personal steht in solchen Situationen vor der Aufgabe, ad hoc ein Vorgehen zu entwickeln und zu realisieren. Diese Art des Handelns ist charakteristisch für die in einer PSA Level 2 untersuchten Unfallsituationen, in denen die Maßnahmen des Betriebs- und Notfallhandbuchs an Randbedingungen einer Unfallsituation angepasst werden müssen oder allein nicht mehr ausreichen, um das Ziel, Schäden zu begrenzen, zu erreichen. Mit den hier durchgeführten Arbeiten ist eine praktische, anwendungsorientierte Anleitung zur Analyse und Bewertung von Personalhandlungen in Unfallsituationen entwickelt worden. Mit diesem Vorgehen wurden Personalhandlungen beispielhaft so modelliert, dass sie in die Ereignisbaumanalyse eingebunden werden können.

2 Einheitliche Ereignisbaumstruktur

Der Leitfaden zur Durchführung der „Sicherheitsüberprüfung gemäß § 19a des Atomgesetzes – Leitfaden Probabilistische Sicherheitsanalyse –“ für Kernkraftwerke in der Bundesrepublik Deutschland stellt Anforderungen an eine PSA der Stufe 2, die sich auf den Leistungsbetrieb und auf interne einleitende Ereignisse beschränken /BMU 05/. Im Jahre 2001 hat die GRS eine PSA der Stufe 2 veröffentlicht /GRS 01/, die den entsprechenden Stand von Wissenschaft und Technik repräsentierte und die wesentlich zur Entwicklung des PSA-Leitfadens beigetragen hat. Diese Analysetechnik beruht im Hinblick auf die probabilistischen Analysen auf einem großen Ereignisbaum (bis zu 100 Verzweigungen), der mithilfe des Rechenprogramms EVNTRE /GÄN 15/, /GRI 89/ bearbeitet wird. Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen werden dabei mittels des GRS-Rechenprogramms SUSA durchgeführt.

Ausgehend von diesem Stand werden im PSA-Leitfaden /BMU 05/ folgende Aspekte durch PSA der Stufe 2 nicht abgedeckt:

- Unfallabläufe ausgehend von Einwirkungen von außen (EVA)
- Unfallabläufe im Nichtleistungsbetrieb (NLB)
- Unfallabläufe im Brennelement-Lagerbecken (BELB)

Zu allen drei Aspekten bestehen neuere Analysen der GRS, z. B. aus Arbeiten zu Unfallabläufen im BELB /NUR 98/, /NRC 17/, /STE 14/, /IRS 15/, /LÖF 16/, /INE 08/ die sich mit Unfallabläufen im NLB und bei EVA befasst. Diese Arbeiten sind im Wesentlichen auf deterministische Unfallabläufe konzentriert. Es liegt demnach eine Reihe von Unfallsimulationen unter verschiedenen Randbedingungen vor, die die möglichen Szenarien weitgehend abdecken. In jedem der genannten Vorhaben wurde auch zum jeweiligen Thema ein probabilistischer Ansatz mittels Ereignisbaumstruktur entwickelt. Es fehlte bisher jedoch ein einheitlicher und umfassender Ansatz, mit dem z. B. die relative Bedeutung der unterschiedlichen Aspekte ermittelt werden könnte.

In Bezug auf mitigative Notfallmaßnahmen beschränken sich die PSA der Stufe 2 meist auf die Bewertung der gefilterten Druckentlastung des Sicherheitsbehälters (SB). In der Realität sind hingegen weitere Maßnahmen denkbar. Die GRS hat umfassende Erfahrungen mit der Modellierung von Notfallmaßnahmen, die im vorliegenden Vorhaben eingebracht werden.

Hierzu gehören die Forschungsprojekte RS1112 /GRS 03/, RS1180 /GRS 10/ und RS1198 /GRS 15a/. Darin wurden Modelle entwickelt, mit denen Handlungen in Unfallsituationen untersucht und bewertet werden können. Derartige Modelle werden im vorliegenden Vorhaben schematisch in die Ereignisbaumstruktur integriert (Arbeitsschritt 5.2.). Es ist eine praktische, anwendungsorientierte Anleitung zur Analyse und Bewertung von Personalhandlungen in Unfallsituationen entwickelt worden. Mit diesem Vorgehen wurden Personalhandlungen beispielhaft so modelliert, dass sie in die Ereignisbaumanalyse eingebunden werden können.

Die hier entwickelten Ereignisbaumstrukturen sind auf die Nutzung durch das Rechenprogramm EVNTRE /GÄN 15/, /GRI 89/ ausgerichtet, das es ermöglicht, auch sehr große und komplexe Ereignisbäume zu bearbeiten. Damit hat es grundsätzlich auch das Potenzial, einen einheitlichen umfassenden Ereignisbaum zu erfassen.

Es hat sich bewährt, beim Aufbau eines Ereignisbaumes von zentralen interessierenden Fragen auszugehen (z. B. von der Frage nach Art und Wahrscheinlichkeit von Radionuklidfreisetzungen in die Umgebung – "Freisetzungskategorien") und dann schrittweise die Fragen in Unterfragen zu zerlegen (z. B. nach Art und Ursache und Zeitpunkt des Versagens von Barrieren). Auf diese Weise wird auch im vorliegenden Vorhaben vorgegangen – deshalb ist die nachfolgende Gliederung der Abschnitte nicht chronologisch, sondern sie geht von den Zielgrößen (d. h. von den Freisetzungskategorien) aus und schreitet von dort aus „rückwärts“ zum Beginn der Stufe 2 fort.

Mit diesem Vorgehen wurde zunächst eine allgemeine Ereignisbaumstruktur geschaffen, die als Endpunkte alle möglichen Kombinationen von Barrierenversagen und die daraus sich ergebenden Freisetzungskategorien (FK) für alle Abläufe enthält. Hierbei ist u. a. auch beachtet worden, ob und wie FK aus dem BELB mit FK aus dem Reaktorkern zusammen gruppiert werden können.

In einem weiteren Schritt werden nach dem vorliegenden Zwischenbericht ablaufentscheidende Phänomene für das Barrierenversagen und für die Mobilisierung von Radionukliden in den Ereignisbaum eingefügt und überschlägig quantifiziert.

Durch die beschriebene möglichst vollständige Berücksichtigung aller Phänomene und durch deren Kombinationsmöglichkeiten kann ein sehr umfangreicher Ereignisbaum entstehen. In einem weiteren Schritt wird geprüft, ob dieser rechentechnisch realisierbar ist und wie ggf. Vereinfachungen oder Aufteilungen in Unterabschnitte die Handhabbarkeit verbessern können.

2.1 Freisetzungskategorien (FK) und Quellterme

2.1.1 Notwendigkeit der Gruppenbildung

Jeder Endzweig eines Ereignisbaumes stellt einen ganz bestimmten Ereignisablauf mit den zugehörigen Phänomenen und Wahrscheinlichkeiten dar. Die Anzahl von Endzweigen eines Ereignisbaumes ist in der Regel unübersehbar hoch. Deshalb ist es für eine Erfassung und Bewertung der Ergebnisse unerlässlich, die Ereignisabläufe bzw. Endzweige zu Gruppen zusammenzufassen. Der englische Fachbegriff für diese Gruppenbildung lautet „binning“.

Ein typisches und allgemein bekanntes Vorgehen zur Gruppenbildung besteht in einer PSA der Stufe 1 z. B. darin, alle Abläufe zusammenzufassen, die in (irgend-)einen Kernschadenzustand münden.

Eine allgemein übliche Analogie für dieses Vorgehen besteht in PSA der Stufe 2 nicht. Vielmehr werden verschiedene Indikatoren zur Ergebnischarakterisierung einer PSA der Stufe 2 herangezogen. Eine der bekannteren Gruppierungen besteht z. B. darin, „frühe große Freisetzungen“ auszuweisen. Dies ist jedoch nicht befriedigend, weil einerseits die Begriffe „früh“ und „groß“ nicht klar definiert sind und weil damit andererseits das nicht unerhebliche Risiko durch „späte“ oder „weniger große“ Freisetzungen ausgeblendet wird.

Allgemein gebräuchlich und gemäß /BMU 05/ empfohlen ist die Gruppierung in „Freisetzungskategorien“ und „Quellterme“. Diese Art der Gruppenbildung wird auch im vorliegenden Vorhaben vorgenommen. Eine FK beschreibt insb. die Pfade (und ggf. einige wenige weitere Charakteristika), die die Radionuklidfreisetzung in die Umgebung beschreiben. Ein Quellterm beschreibt die Freisetzung in die Umgebung nach Art, Menge und Zeitverlauf (und ggf. einige wenige weitere Charakteristika wie die Freisetzungshöhe oder die thermische Energie der Freisetzung) für relevante Radionuklide.

Oft gibt es eine eindeutige Zuordnung von FK zu Quelltermen, aber es kann z. B. auch einen hohen und einen niedrigen Quellterm für eine einzige FK geben. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sinnvollerweise etwa 10 verschiedene FK und etwa auch 10 Quellterme definiert werden müssen, um aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen. Mit jeweils 10 Ausprägungen ist allerdings die Ergebnisinterpretation bei weitem nicht so trivial wie in der Stufe 1, wo man mit dem alleinigen Merkmal „Kernschaden“ auskommt. Eine weitere Verfeinerung der Ergebnisdarstellung (z. B. mit weiteren 10 Untergruppen pro FK) ist mit den verfügbaren Rechenmethoden durchaus möglich, aber in der Praxis wenig hilfreich. Es ist z. B. kaum möglich, eine Anlagenmodifikation mithilfe von 25 verschiedenen Quelltermen zu bewerten, deren Wahrscheinlichkeiten alle simultan, aber in unterschiedlicher Tendenz von der Modifikation betroffen sind.

2.1.2 Freisetzungskategorien (FK)

In den o. g. früheren Arbeiten der GRS wurden komplette Ereignisbäume (für den Leistungsbetrieb mit internen auslösenden Ereignissen) oder Grundstrukturen von Ereignisbäumen (für alle anderen Abläufe) entwickelt. Diese enthalten Freisetzungskategorien (FK) wie folgt (siehe Tab. 2.1 bis Tab. 2.3):

Tab. 2.1 FK und Quellterme in DWR für interne auslösende Ereignisse /GRS 01/

FK	Freisetzungspfade zur Atmosphäre (ATM)	Freisetzungsteil in ATM	Freisetzungsteil in ATM	Freisetzungsteil in ATM
FKA	SB → (RR) → Umgebung <i>oder</i> Gr. Bypass zum RR → Umgebung	~1.0	>0.5	>0.5
FKB	SB → betriebl. SB-Lüftung → Umgebung <i>oder</i> Gr. Bypass zum RR → betriebl. RR-Lüftung → Umgebung <i>oder</i> SB → RR früh → betr. RR-Lüftung → Umgebung	~1.0	0.13... 0.24	0.14... 0.23
FKC	Bypass durch Dampferzeuger → Frischdampf-Ventile → Umgebung	~1.0	0.025... 0.15	0.025... 0.15
FKD	Kl. Bypass, Leck RR → Umgebung (auch verursacht durch SB-Versagen zum RR hin)	~0.9 spät	0.01	0.01... 0.055
FKE	SB → RR spät → betr. RR-Lüftung → Umgebung	~0.9 spät	2.4E-4... 6E-3	0.055

FK	Freisetzungspfade zur Atmosphäre (ATM)	Freisetzungsteil in ATM	Freisetzungsteil in ATM	Freisetzungsteil in ATM
FKF	SB → Venting ungefiltert Dachhöhe	~0.9 spät	6E-6... 1.2E-4	0.0275
FKG	Gr. Bypass zum RR → gefilterte Störfall-RR-Absaugung	~ 0.9	2E-4... 4E-4	2.5E-4... 4.5E-4
FKH	SB → Venting gefiltert Dachhöhe oder Kl. Bypass zum RR mit Störfall-RR-Absaugung und gefiltertes Venting	~0.9 spät	2E-7... 1E-5	0.0001
FKI	SB → Venting gefiltert Kaminhöhe	~0.9 spät	2E-7... 1E-5	0.0001
FKJ	Kl. SB-Leckage → Störfall-RR-Absaugung	~0.9 spät	3E-10... 2E-8	0.0001

Tab. 2.2 Freisetzungskategorien (FK) in DWR für NLB und EVA /IRS 15/, /INE 08/, /IRS 15/, /LÖF 16/, /HAG 17/

FK	Freisetzungspfad zur ATM
FKA ohne SB-Bypass	SB → beschädigter RR → Umgebung
FKA mit SB-Bypass	Freisetzung durch unbedecktes DE-Heizrohrleck
FKB SB offen	SB → betriebl. SB-Lüftung → Umgebung
FKB SB versagt früh	SB → RR früh → betriebl. RR-Lüftungskanäle (ungefiltert) → Umgebung
FKC SB-Bypass durch Wasservorlage	Freisetzung durch bedecktes DE-Heizrohrleck
FKE spätes SB-Versagen (Durchschmelzen, Überdruck)	SB → RR spät → betriebl. RR-Lüftungskanäle (ungefiltert) → Umgebung
FKF ungefiltertes. Venting wg. Schaden am Ventingsystem	SB → Venting ungefiltert Dachhöhe
FKF erhöhte SB-Leckage ohne wesentliche Rückhaltung im RR	erhöhte SB-Leckage → RR → ungefiltert in Umgebung
FKI intaktes gefiltertes Venting	SB → Venting gefiltert Kaminhöhe
FKJ SB intakt ohne Venting	Auslegungsgemäße SB-Leckage → gefilterte Störfall-RR-Absaugung

Tab. 2.3 Freisetzungskategorien (FK) in DWR für Unfallabläufe im BELB /HAG 17/

FK	Freisetzungspfad zur ATM
FKA-BE (offene SB-Schleuse)	SB → Schleuse → HAG → Umgebung
FKB1-BE (kein SB-Lüftungsabschluss)	SB → Lüftungsanlage → Zulufteinlassöffnung oder Kamin → Umgebung
FKB2-BE (frühes SB-Versagen)	SB (gr. frühe Leckage) → RR → Tür zur Umgebung oder Tor zum HAG → Umgebung oder RR-Lüftungskanäle → Umgebung
FKE-BE (spätes SB-Versagen)	SB (gr. späte Leckage) → RR → Tür zur Umgebung oder Tor zum HAG → Umgebung oder RR-Lüftungskanäle → Umgebung
FKF-BE (Venting, ungefiltert, bodennah)	SB → Ventingsystem mit defektem Filter → Leck zur Umgebung aus defekter Ventingleitung
FKH-BE (Venting, gefiltert, bodennah)	SB → Ventingsystem mit intaktem Filter → Leck zur Umgebung aus defekter Ventingleitung
FKI-BE (Venting, gefiltert, über Kamin)	SB → intaktes Ventingsystem → Umgebung
FKJ-BE (nur SB-Auslegungsleckage)	SB (Auslegungsleckage) → RR → Störfallringraumabsaugung → Umgebung

Auf dieser Grundlage werden für den allgemeinen Ereignisbaum die FK wie folgt abgeleitet: Um die Vielfalt der möglichen Abläufe zu erfassen, musste bei der Gruppenbildung schematischer als bei den früheren eingeschränkteren Fragestellungen vorgegangen werden. Damit ist es jedoch zugleich auch unvermeidlich, dass die in eine einzige FK eingeordneten Abläufe gewisse Unterschiede der Quellterme aufweisen können.

Tab. 2.4 enthält die für den allgemeinen Ereignisbaum vorgeschlagenen FK sowie entsprechende Erläuterungen.

Tab. 2.4 Freisetzungskategorien (FK) in DWR für den allgemeinen Ereignisbaum

FK	Freisetzungspfade zur ATM	Kommentar
	BYPASS des SB	
FK-ByRR	Kernschmelzen im RDB → primärseitiges Leck zum RR (z. B. am Volumenregelsystem) → RR und sonstige Gebäude ohne wesentliche Rückhaltung → Umgebung	
FK-ByDE	Kernschmelzen im RDB → Dampferzeuger-Heizrohrleck → Frischdampfventile zur Umgebung mind. zeitweise offen → Umgebung	Dampferzeuger-Heizrohrlecks können als auslösendes Ereignis, aber auch induziert auftreten. Eine Unterscheidung in bedecktes / unbedecktes Heizrohrleck wird hier nicht vorgenommen, kann aber durch die Unsicherheit über den entsprechenden Quellterm abgedeckt werden. FK-ByDE kann nicht bei einem Unfall im BELB vorkommen.
	kein BYPASS des SB, SB offen oder beschädigt	
FK-SBo<10	Kernschmelzen im RDB oder BELB → SB-Barriere offenstehend → Umgehung des RR → Umgebung < anlext. NFM	„Offenstehen“ der SB-Barriere bedeutet Versagen des SB-Abschlusses oder offene Schleuse (z. B. bei NLB) und ungefilterte Freisetzung in die Umgebung durch weitere Gebäude. Der RR spielt dabei keine Rolle. „Beschädigung“ der SB-Barriere bedeutet, dass die Auslegungsleckage zum RR hin weit überschritten wird. Schon bevor der SB beschädigt ist, ergibt sich eine gewisse Auslegungsleckage und Freisetzung aus dem RR über die gefilterte RR-Störfallabsaugung, insb. von Edelgasen. Falls z. B. Wasserstoffbrand im RR vorkommt (was relativ wahrscheinlich ist), kann dies dann zur Beschädigung des RR führen. „< anlext. NFM“ bedeutet, dass die Hauptfreisetzung in die Umgebung beginnt, bevor anlagenexterne Notfallmaßnahmen (NFM) zum Schutz der Bevölkerung wirken (< 10h nach einleit. Ereignis angenommen) analog: > anlext. NFM, d.h. >10h nach einleit. Ereignis angenommen
FK-SBb<10	Kernschmelzen im RDB oder BELB → SB-Barriere beschädigt → Freisetzung in den RR → RR-Barriere offenstehend oder beschädigt → Umgebung < anlext. NFM	
FK-SBo>10	Kernschmelzen im RDB oder BELB → SB-Barriere offenstehend → Umgehung des RR → Umgebung > anlext. NFM	
FK-SBb>10	Kernschmelzen im RDB oder BELB → SB-Barriere beschädigt → Freisetzung in den RR → RR-Barriere offenstehend oder beschädigt → Umgebung > anlext. NFM	

FK	Freisetzungspfade zur ATM	Kommentar
FK-SBb-RRF	Kernschmelzen im RDB oder BELB → SB-Barriere beschädigt → RR-Barriere dauerhaft auslegungsgemäß wirksam (gefilterte Ringraumabsaugung) → Umgebung	Wenn der Volumenstrom durch den beschädigten SB gering ist, kann die gefilterte Störfall-RR-Absaugung u. U. die gesamte Leckage aus dem SB beherrschen. Es besteht Unsicherheit über gasförmige Jodfreisetzungen. Dies ist durch entsprechende Unsicherheiten im Quellterm abzudecken
kein BYPASS, SB intakt mit Venting		
FK-VFvers	Kernschmelzen im RDB oder BELB → SB-Barriere intakt mit Venting → Ventingfilter wirkt nicht auslegungsgemäß → Umgebung	Die nicht auslegungsgemäße Funktion des Ventingfilters kann sowohl einen völligen Ausfall als auch eine begrenzte Verletzung der Auslegungswerte bedeuten. Dies kann durch die Unsicherheit über den entsprechenden Quellterm abgedeckt werden.
FK-VeOK	Kernschmelzen im RDB oder BELB → SB-Barriere intakt mit Venting → Ventingfilter intakt → Umgebung	Bei erfolgreichem gefiltertem Venting ist der Quellterm relativ gering, er kann jedoch durch gasförmiges Jod in schwer quantifizierbarer Weise dominiert werden. Dies ist durch entsprechende Unsicherheiten im Quellterm abzudecken.
kein BYPASS, SB intakt ohne Venting		
FK-SBOK	Kernschmelzen im RDB oder BELB → SB-Barriere auslegungsgemäß dicht → RR-Barriere auslegungsgemäß wirksam → Umgebung	Es besteht Unsicherheit u.a. über gasförmige Jodfreisetzungen. Dies ist durch entsprechende Unsicherheiten im Quellterm abzudecken.

Diese FK sind nach absteigender Gefährdung für die Umgebung geordnet. FK-ByRR hat also z. B. eine größere Gefährdung als FK-SBb<10. Es können nun Ereignisabläufe vorkommen, bei denen zwei FK auftreten. Beispielsweise könnte ein Ablauf mit Bypass zum RR hin zunächst zu einer sehr hohen anfänglichen Freisetzung führen. Falls es dann aber noch gelingt, das Leck zum RR hin zu sperren, wäre diese FK beendet und später könnte eine weitere Freisetzung entstehen, z. B. FK-SBb<10. Ebenso wäre es z. B. möglich, dass zunächst ein gefiltertes Venting stattfindet (FK-VeOK), was sich nach unterstelltem Filterversagen zu FK-VFvers entwickelt.

Es ist naheliegend, bei Kombinationen von FK in einem einzigen Ablauf diejenige auszuwählen, die die höhere Gefährdung darstellt. Dies ist zweifellos gerechtfertigt, wenn die gefährdendere Kategorie zuerst auftritt und dann später die weniger gefährdende. Bei umgekehrter Reihenfolge ist dies jedoch nicht offensichtlich. Tatsächlich ist jedoch die Anzahl der möglichen Kombinationen von zunächst geringeren und dann höheren Gefährdungen sehr begrenzt. Nur folgende Kombinationen sind vorstellbar:

- FK-VeOK → FK-VFvers
- FK-SBb-RRF → FK-SBb<10 oder FK-SBb>10

Nun sind in beiden Fällen die Ursachen, die zu den gefährdenderen Abläufen führen, in ihrem zeitlichen Ablauf zu diskutieren:

Beim Übergang FK-VeOK → FK-VFvers ist das Ventingfilterversagen wahrscheinlich durch einen frühen Wasserstoffbrand im Ventingsystem verursacht. Ein späterer Brand nach dem Siedebeginn im Ventingwäscher ist eher unwahrscheinlich, weil dann das gesamte System viel Wasserdampf enthält. Ein relativ kurzer Zeitabschnitt mit intaktem Venting wäre also gefolgt von einem langen Abschnitt mit defektem Filter. Es ist bei dieser Sachlage gerechtfertigt, von vornherein nur die FK mit Filterversagen zu betrachten.

Beim Übergang FK-SBb-RRF → FK-SBb ist es jedoch grundsätzlich denkbar, dass ein langer Zeitraum vergeht, bis ein Schaden im Ringraum (RR) auftritt, z. B. weil sich eine zündfähige Atmosphäre im RR erst spät entwickelt. Bereits vor diesem Schaden am RR wären jedoch eine weitgehende Freisetzung der nicht filterbaren Edelgase und eine sehr geringe Freisetzung filterbarer Radionuklide über die Ringraumabsaugung geschehen. Dies ist jedoch bereits abgedeckt durch den Fall FK-SBb, bei dem definitionsgemäß vor dem späten Versagen eine Freisetzung über die Ringraumabsaugung unterstellt wird. Deshalb kann die genannte Kombination FK-SBb-RRF → FK-SBb ohne Informationsverlust allein durch FK-SBb abgedeckt werden.

Aus diesen Überlegungen folgt, dass keine Kombinationen der aufgeführten FK zusätzlich eingeführt werden müssen.

2.1.3 Quellterme

Jeder Freisetzungskategorie (FK) ist ein Quellterm zuzuordnen. Weil in jede FK zahlreiche nicht identische Ereignisabläufe münden, ist der zugehörige Quellterm nicht eindeutig bestimmt, sondern er umfasst eine gewisse Bandbreite. Dies ist bereits bei den auf den Leistungsbetrieb beschränkten PSA der Fall und umso mehr trifft dies zu, wenn Ereignisse im NLB oder aus dem BELB mitberücksichtigt werden.

Deshalb wird für jede FK bei Bedarf nicht nur ein einzelner Quellterm festgelegt, sondern ggf. auch mehrere.

Grundsätzlich wäre es im Ereignisbaum technisch einfach möglich, wesentlich mehr FK zu definieren, um die Variation des Quellterms pro Kategorie zu verringern. Man könnte z. B. die Kategorie mit offener SB-Barriere unterteilen in Abläufe mit Kernschmelzen im RDB und Schmelzen im BELB. Dies führt dann zu einer wesentlich höheren Anzahl von FK. Rechentechnisch ist dies problemlos, aber es wird dann zunehmend schwierig, das Ergebnis zu bewerten. Deshalb wird die Anzahl der Freisetzungskategorien im Ereignisbaum auf 10 begrenzt.

Zusätzlich liegen im Ereignisbaum auch die Ergebnisse für die in der Tab. 2.5 genannten 15 Quellterme vor. Der Nutzer der Analyse hat somit die Möglichkeit, sowohl aus den Ergebnissen für 10, als auch für 15 Gruppen zu wählen. Die Benennung („Freisetzungskategorien“ oder „Quellterme“) ist dabei nicht von Bedeutung.

Die Aufteilung der Freisetzungskategorien (FK) in Quellterme zeigt Tab. 2.5.

Tab. 2.5 Quellterme in DWR für den allgemeinen Ereignisbaum

FK	Freisetzungspfade zur ATM	Quellterme (QR = RDB, QB = BELB)
	BYPASS des SB	
FK-ByRR	Kernschmelzen im RDB → primärseitiges Leck zum RR (z. B. am Volumenregelsystem) → RR und sonstige Gebäude ohne wesentliche Rückhaltung → Umgebung	QR-ByRR: Es gibt nur einen einzigen Quellterm, weil auch nur eine bestimmte Gruppe von Abläufen mit Schmelzen im RDB zu dieser FK führt.
FK-ByDE	Kernschmelzen im RDB → DE-Heizrohrleck → Frischdampfventile mind. zeitweise offen → Umgebung	QR-ByDE: Es gibt nur einen einzigen Quellterm, weil auch nur eine bestimmte Gruppe von Abläufen mit Schmelzen im RDB zu dieser FK führt.
	kein BYPASS, SB offen oder beschädigt	
FK-SBo<10	Kernschmelzen im RDB oder BELB → SB-Barriere offenstehend → Umgebung des RR → Umgebung < anlext. NFM	QR-SBo<10: wegen „< anlext. NFM“ kann dieser Ablauf nur aus Schmelzen im RDB stammen, denn Kernschmelzabläufe im BELB dauern deutlich länger als die Einleitung anlagenexterner Notfallmaßnahmen. Eine weitere Differenzierung erscheint nicht sinnvoll.

FK	Freisetzungspfade zur ATM	Quellterme (QR = RDB, QB = BELB)
FK-SBb<10	Kernschmelzen im RDB oder BELB → SB-Barriere beschädigt → Freisetzung in den RR → RR-Barriere offenstehend oder beschädigt → Umgebung < anlext. NFM	<p>Wegen „< anlext. NFM“ kann dieser Ablauf nur aus Schmelzen im RDB stammen, denn Kernschmelzabläufe im BELB dauern deutlich länger als die Einleitung anlagenexterner NFM.</p> <p>Eine Differenzierung erscheint wie folgt sinnvoll:</p> <p>QR-SBbE<10: die Beschädigung der SB-Barriere wird durch eine EVA verursacht.</p> <p>QR-SBbI<10: die Beschädigung der SB-Barriere wird durch interne Ereignisse (z. B. Wasserstoffverbrennung) verursacht.</p>
FK-SBo>10	Kernschmelzen im RDB oder BELB → SB-Barriere offenstehend → Umgebung des RR → Umgebung > anlext. NFM	<p>Wegen „> anlext. NFM“ kann dieser Ablauf auch aus Schmelzen im BELB stammen.</p> <p>Eine Differenzierung erscheint wie folgt sinnvoll:</p> <p>QR-SBo>10: der Unfall findet im RDB statt.</p> <p>QB-SBo>10: der Unfall findet im BELB statt.</p>
FK-SBb>10	Kernschmelzen im RDB oder BELB → SB-Barriere beschädigt → Freisetzung in den RR → RR-Barriere offenstehend oder beschädigt → Umgebung > anlext. NFM	<p>Wegen „> anlext. NFM“ kann dieser Ablauf auch aus Schmelzen im BELB stammen.</p> <p>Eine Differenzierung erscheint wie folgt sinnvoll:</p> <p>QR-SBb>10: der Unfall findet im RDB statt.</p> <p>QB-SBb>10: der Unfall findet im BELB statt.</p>
FK-SBb-RRF	Kernschmelzen im RDB oder BELB → SB-Barriere beschädigt → RR-Barriere dauerhaft auslegungsgemäß wirksam (gefilterte RR-Absaugung) → Umgebung	<p>Die Freisetzungen und Zeitverläufe sind bei Unfällen im RDB deutlich anders als im BELB. Eine Differenzierung erscheint wie folgt sinnvoll:</p> <p>QR-SBb-RRF: der Unfall findet im RDB statt.</p> <p>QB-SBb-RRF: der Unfall findet im BELB statt.</p>

FK	Freisetzungspfade zur ATM	Quellterme (QR = RDB, QB = BELB)
	kein BYPASS, SB intakt mit Venting	
FK-VFvers	Kernschmelzen im RDB oder BELB → SB-Barriere intakt mit Venting → Ventingfilter wirkt nicht auslegungsgemäß → Umgebung	Das Versagen des Ventingfilters kann sehr unterschiedliche Radionuklidfreisetzungen verursachen (z. B. unterschiedlich bei Überhitzung oder mechanischer Beschädigung) Untersuchungen hierzu fehlen. Es wird pauschal eine Differenzierung vorgenommen: Qh-VFvers: bei Ventingfilterversagen ist die Radionuklidfreisetzung hoch Qn-VFvers: bei Ventingfilterversagen ist die Radionuklidfreisetzung niedrig Eine Unterscheidung in Abläufe aus dem RDB bzw. aus dem BELB wird als nicht erforderlich angesehen.
FK-VeOK	Kernschmelzen im RDB oder BELB → SB-Barriere intakt mit Venting → Ventingfilter intakt → Umgebung	Q-VeOK: Bei erfolgreichem gefiltertem Venting ist der Quellterm in jedem Fall relativ gering. Eine weitere Differenzierung, z.B. nach RDB oder BELB, wird als nicht erforderlich angesehen.
	kein BYPASS, SB intakt ohne Venting	
FK-SBOK	Kernschmelzen im RDB oder BELB → SB-Barriere auslegungsgemäß dicht → RR-Barriere auslegungsgemäß wirksam → Umgebung	Q-SBOK: Bei intaktem SB ist der Quellterm in jedem Fall relativ gering. Eine weitere Differenzierung, z.B. nach RDB oder BELB wird als nicht erforderlich angesehen.

Auch wenn die Quellterme differenzierter sind als die FK, sind sie zunächst nur qualitativ festgelegt.

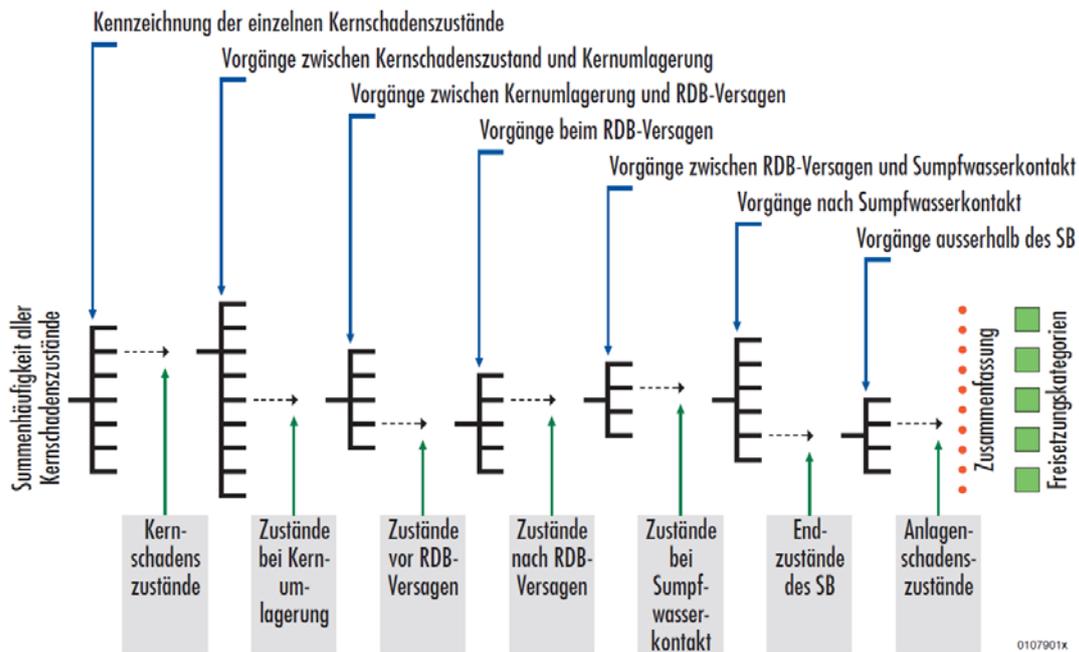


Abb. 2.1 Ausgehend von den Kernschadenszuständen werden über Verzweigungen unterschiedliche Ereignisabläufe in einem Ereignisbaum zusammengefasst /GRS 01/

Eine weitere Vertiefung und Quantifizierung der Aussage ist im Ereignisbaum mittels folgender Elemente realisiert worden:

Die probabilistische Bewertung in der PSA bestimmt mittels Ereignisbaumanalyse die bedingten Wahrscheinlichkeiten für die sehr zahlreichen möglichen Ereignisabläufe, dessen Endzustände schließlich zu Freisetzungskategorien zusammengefasst werden. Der grundsätzliche Aufbau eines Ereignisbaums der PSA Level 2 ist in Abb. 2.1 dargestellt.

Der erweiterte Baum enthält eine Verzweigung, mit der für jede Quelltermgruppe der jeweiligen Freisetzungskategorien (siehe Tab. 2.5) die Freisetzungsteile aus dem Kern oder dem Brennelementlagerbecken in die Umgebung eingegeben werden. Die Datenquelle für diese Freisetzungsteile sind z. B. Ergebnisse von durchgeführten integralen Unfallablaufanalysen. Für jede Quelltermgruppe werden einschlägige Unfallanalysen daraufhin ausgewertet, welche Kerninventaranteile in die Umgebung gelangen, und die erhaltenen Anteile werden in die genannte Verzweigung eingegeben. Im vorliegend entwickelten Ereignisbaum wurde dies beispielhaft für die chemische Gruppe Cäsium vorgenommen. Da die Unfallanalysen in der Regel diese Freisetzungsteile als Ergebnisse dokumentieren, besteht insofern kein grundsätzliches Problem.

Es kann jedoch sein, dass für einzelne Quelltermgruppen keine unmittelbar nutzbaren Analysen vorliegen, und wegen des dafür erforderlichen Aufwandes auch nicht ohne weiteres erstellt werden können. In solchen Fällen muss auf eine Expertenschätzung zurückgegriffen werden. Um Unsicherheiten der zugrunde liegenden Analysen und ggf. der Schätzungen abzudecken, können und sollen die entsprechenden Freisetzunganteile mit Unsicherheiten versehen werden. Es ist jedoch das Ziel, die Datenbasis grundsätzlich auf eine möglichst breit fundierte Analytik zu stützen. Die Berücksichtigung weiterer chemischer Gruppen über Cäsium hinaus ist im Ereignisbaum methodisch problemlos möglich.

In einer weiteren Verzweigung des Baumes werden die Aktivitätsfreisetzungen von Radionukliden aus dem Kern bzw. dem Brennelementlagerbecken (in Bq) ermittelt und in Gruppen eingeteilt. Es können beispielsweise Gruppen über 10^{18} Bq, von 10^{17} bis 10^{18} Bq, von 10^{16} bis 10^{17} Bq usw. gebildet werden. Für diese Ermittlung wurden die Aktivitätsinventare von Kern und Brennelementlager in einer vorhergehenden Verzweigung bei der Festlegung des Kern-Entladezustandes eingegeben. Über die Quantifizierung dieser Verzweigung kann dann z.B. herausgefunden werden, ob und wie sich die Wahrscheinlichkeiten für die Aktivitätsfreisetzungen für verschiedene Kernschadenszustände oder zwischen Kern und Brennelementlager unterscheiden. Auch diese Funktion wurde im vorliegenden Ereignisbaum nur für Cs-137 realisiert, aber eine Erweiterung auf andere Isotope ist methodisch ohne weiteres möglich.

In das neu programmierte Auswerteroutine von EVNTRE wurde abschließend die Ermittlung eines „Quelltermrisikos“ oder „Aktivitätsrisikos“ eingefügt. Eine derartige zusammenfassende Größe wird bereits in einigen PSA der Stufe 2 in Deutschland praktiziert und sie wird von der GRS in einer Auswertung von PSA empfohlen /GRS 15/. Das Quelltermrisiko wird bestimmt, indem für jeden einzelnen Zweig des Baumes sein Produkt aus der Häufigkeit und der Aktivitätsfreisetzung gebildet wird und diese Produkte über alle Zweige aufsummiert werden. Als Ergebnis erhält man einen Wert mit der Einheit Aktivität pro Zeit, also z. B. 10^{12} Bq/a. Dieses summarische Maß sollte detailliertere Angaben nicht ersetzen, aber ergänzen. Es ist z. B. geeignet um einen Überblick über die Wirksamkeit von Notfallmaßnahmen zu erhalten.

Für die vorliegende Version des Ereignisbaumes wurde lediglich das Isotop Cs-137 berücksichtigt. Falls neben dem radiologisch wichtigsten Isotop Cs-137 weitere Isotope eingebracht werden sollen, was methodisch ohne weiteres möglich wäre, ist zu berücksichtigen, dass die Aktivitätsfreisetzung der Edelgase quantitativ in den meisten

Unfallabläufen dominiert, so dass die anderen Elemente und Isotope insofern weniger Bedeutung erlangen. Andererseits sind Edelgase radiologisch weniger relevant. Es empfiehlt sich daher, einen isotopspezifischen Gewichtungsfaktor in die Analyse einzubeziehen, wie er z. B. aus /INE 08/ entnommen werden kann. Dieser Faktor ist in der vorliegenden Programmierung bereits eingeführt, aber bei der alleinigen Berücksichtigung von Cs-137 noch ohne Bedeutung.

2.2 Ablaufentscheidende Phänomene

Eine der hauptsächlichen Fragestellungen im Ereignisbaum betrifft die möglichen Ursachen für das Barrierenversagen und die Mobilisierung von Radionukliden. Generell haben im Bereich der PSA der Stufe 2 – anders als bei der PSA der Stufe 1 – die unterschiedlichen einleitenden Ereignisse (also z. B. Einwirkungen von innen oder außen) keinen entscheidenden Einfluss auf die Entwicklung des Unfallablaufes. Dies liegt daran, dass die Stufe 1 der PSA überwiegend mit Schadenszuständen von Systemen befasst ist, die in vielfältiger Kombination und abhängig von äußeren Einflüssen entstehen können. Demgegenüber analysiert die Stufe 2 überwiegend physikalisch-chemische Vorgänge beim Kernschmelzen, die wenig davon abhängen, wodurch das Kernschmelzen ausgelöst wird.

Folglich kann die Modellierung von Phänomenen in einem allgemeinen Ereignisbaum im Wesentlichen so wie in herkömmlichen Ereignisbäumen vorgenommen werden. Folgende Ausnahmen oder Ergänzungen sind dennoch zu beachten:

- Wenn der RDB offen ist (NLB), oder wenn ein Schmelzen im Brennelementlagerbecken (BELB) geschieht, dann sind oberhalb der Schmelze hohe Temperaturen zu berücksichtigen. Dies wiederum bedingt Fragen nach der Belastung darüber befindlicher Strukturen.
- Wenn der SB offen ist oder wenn im SWR Schmelzen im BELB ablaufen, dann ist die SB-Funktion von Anfang an nicht gegeben. Unter diesen Umständen ist eine Analyse des Radionuklidverhaltens in den verbleibenden Gebäudeteilen (z. B. Ringraum, Hilfsanlagegebäude, Maschinenhaus) von besonderer Bedeutung, um eine realistische Abschätzung der Freisetzung in die Umgebung zu ermitteln.

Auch wenn diese Phänomene schwierig zu bewerten sind, bedeuten sie für die Struktur des Ereignisbaumes keine Besonderheit. Die entsprechenden Fragen müssen lediglich zusätzlich in eine bestehende Struktur eingefügt werden.

2.3 Informationsübermittlung aus der PSA Stufe 1

Eine PSA der Stufe 2 schließt sich üblicherweise an eine PSA der Stufe 1 an. Die Informationen, die für die Stufe 2 benötigt werden, müssen von der Stufe 1 übertragen werden. Dabei ist es nicht entscheidend, ob die Stufe 1 und Stufe 2 einheitlich in einem Rechenprogramm behandelt werden (sog. integraler Ansatz) oder ob für beide Stufen unterschiedliche Rechenprogramme verwendet werden (sog. separater Ansatz). Bei beiden Ansätzen müssen die in der Stufe 1 ermittelten Sequenzen die in der Stufe 2 erforderlichen Informationen ausweisen. Unterschiede zwischen separatem und integrealem Ansatz ergeben sich jedoch in der praktischen Realisierung der Schnittstelle von Stufe 1 zu Stufe 2, in der realisierbaren Komplexität des Ereignisbaumes und der dem rechentechnischen Aufwand.

Die Herausforderung für diesen Übergang von Stufe 1 auf Stufe 2 besteht darin, diejenigen Informationen und Parameter zu identifizieren und in die Ereignisbaumstruktur einzufügen, die für die Beschreibung der Schnittstelle erforderlich sind. Ein Beispiel für eine derartige Liste für den Leistungsbetrieb ist z. B. im PSA-Leitfaden (/FAK 05/ Methodenband) enthalten. Bei der praktischen Durchführung einer PSA ist dabei zu berücksichtigen, dass die Analysen der Stufe 1 oft nicht oder nur mit Schwierigkeiten in der Lage sind, alle Informationswünsche aus der Stufe 2 zu berücksichtigen. Ein einfaches Beispiel dafür besteht z. B. in der Frage der Funktion des SB-Abschlusses. Dieser ist für die Analyse der Kernschadenshäufigkeit nicht von Interesse und er wird deshalb in der Stufe 1 oft auch nicht berücksichtigt, während er für die Stufe 2 offensichtlich sehr relevant ist.

Im hier vorliegenden Vorhaben besteht eine der Aufgaben in ergänzenden Untersuchungen zu mitigativen wissensbasierten Handlungen im Bereich schwerer Störfälle. Für derartige Handlungen sollen einige Beispiele modelliert werden. Damit solche Handlungen auch im Ereignisbaum der Stufe 2 behandelt werden können, müssen die dafür erforderlichen Informationen aus der Stufe 1 in die Stufe 2 übertragen werden. Dabei handelt es sich z. B. um die Verfügbarmachung oder Reparierbarkeit von Systemen unter den Bedingungen des jeweiligen KSZ. Dies ist eine neue Dimension von

Fragen, die sich in bisherigen PSA so nicht gestellt haben. Vielmehr wurde i. d. R. lediglich die kennntnisbasierte gefilterte Druckentlastung des SB berücksichtigt, die vergleichsweise einfach zu erfassen ist. Es wird in einem nachfolgenden Abschnitt dargelegt, wie derartige Aspekte beim Übergang von Stufe 1 zu Stufe 2 berücksichtigt werden können.

Es ist davon auszugehen, dass für die hier entworfene umfassende Ereignisbaumanalyse der Stufe 2 keine einheitliche und umfassende PSA der Stufe 1 bzw. deren Ergebnisse verfügbar sind. Deshalb werden plausible Annahmen für die KSZ und ihre Eigenschaften und Wahrscheinlichkeiten getroffen.

2.3.1 Darstellung der Kernschadenzustände (KSZ)

Der einheitliche und umfassende Ereignisbaum für die Stufe 2 muss mit einer erheblich größeren Anzahl von verschiedenen KSZ umgehen als bisherige Ereignisbäume mit einer begrenzten Themenstellung. Deshalb ist es nicht praktikabel, die einzelnen KSZ und ihre Wahrscheinlichkeiten einzeln zu beschreiben. Vielmehr wird eine praktisch handhabbare Tabellenform beschrieben, die sowohl für die Darstellung und Beschreibung der KSZ als auch für ihre Übertragung in den Ereignisbaum geeignet ist. Die Tabellenform ist in gleicher Weise wie die entsprechenden Tabellen A.1 und A.2 in /GRS 01/ aufgebaut.

Die Spalten der Tabelle entsprechen den einzelnen KSZ-Merkmalen (z. B. Druck im RDB) mit ihren Ausprägungen (z. B. hoch, mittel und niedrig). Die Zeilen der Tabelle entsprechen den einzelnen KSZ. Somit wird jeder KSZ durch den Satz seiner Merkmale und deren Ausprägungen charakterisiert. Tab. 2.6 enthält einen beispielhaften Auszug aus der erarbeiteten Matrix. Tab. 2.7 beschreibt alle Merkmale vollständig.

Tab. 2.6 Beispielhafter Auszug aus der KSZ-Matrix, die in die EVNTRE-Datei „Baum.txt“ einprogrammiert wurde

Merkmal	1	2	3	4
KSZ-Nr.	relative Häufigkeit	auslösendes Ereignis <u>Verschlüsselung:</u> 0: KMV25K (KMV) 1: KMV80K (KMV) 2: KMVDHK (KMV) 3: AHSK (Trans.) 4: AHWK (Trans.) 5: AHSHWK (Trans.) 6: ANWRNK (Trans.) 7: ANWBNK (Trans.) 8: ANWRBK (Trans.) 9: ANWBBK (Trans.) 10: ANWFAK (Trans.) 11: SBYDjK (KMV) 12: SBYRjK (KMV) 13: DeBgeK (Debor.) 14: DeBloK (Debor.)	RDB-Deckelzustand: <u>Verschlüsselung:</u> 0: geschlossen, 1: offen	Zustand Beckenschütz: <u>Verschlüsselung:</u> 0: gesetzt 1: gezogen
1	4.24E-02	10	0	0
2	4.24E-02	8	0	0
3	6.96E-03	8	1	0
4	6.96E-03	6	1	0
5	6.56E-04	8	0	0
6	5.23E-04	8	0	0
7	6.96E-03	6	1	0
8	8.35E-03	7	1	1
9	5.97E-07	12	0	0
10	1.03E-01	14	0	0

Tab. 2.7 Merkmale der Kernschadenzustände (KSZ)

Relative Häufigkeit des KSZ (im Kern) bzw. des BSZ (Brennstoffschadenzustand) (im BELB)
Anteil des jeweiligen KSZ/BSZ an allen KSZ und BSZ

Betriebszustand NLB oder LB

0: NLB
1: LB

auslösendes Ereignis

0: KMV25K (KMV bis 25 cm²)
1: KMV80K (KMV bis 200 cm²)
2: KMVDHK (KMV am Druckhalter-Ventil)
3: AHSK (Transiente infolge Ausfall Hauptspeisewasser)
4: AHWK (Transiente infolge Ausfall Hauptwärmesenke)
5: AHSHWK (Transiente infolge Ausfall Hauptspeisewasser und Hauptwärmesenke)
6: ANWRNK (Transiente mit KSZ im RDB infolge Ausfall der NWA durch Notstromfall)
7: ANWBK (Transiente mit BSZ im BELB infolge Ausfall der NWA durch Notstromfall)
8: ANWRBK (Transiente mit KSZ im RDB infolge Ausfall der NWA durch Betriebsversagen)
9: ANWBBK (Transiente mit BSZ im BELB infolge Ausfall der NWA durch Betriebsversagen)
10: ANWFAK (Transiente infolge Ausfall der NWA im RDB durch Fehlanregung der Notkühlkrit.)
11: SBYDjK (SB-Bypass durch Dampferzeugerheizrohrleck)
12: SBYRjK (SB-Bypass durch primärseitiges Leck im RR)
13: DeBgeK (Deborierung kontinuierlich im gesamten Primärkreis)
14: DeBloK (Deborierung lokal im Primärkreis (Deionatpropfen))
15. KMOVBEK KMV im BELB

Zeit zwischen Abschalten des Reaktors und auslösendem Ereignis

Parameter, der die Zeit in Stunden angibt

Zeit zwischen auslösendem Ereignis und KSZ

Parameter, der die Zeit in Stunden angibt

RDB-Deckelzustand:

0: geschlossen
1: offen

Zustand Beckenschütz:

0: gesetzt
1: gezogen

Beladezustand des BELB:

0: Normalbeladung, normal
1: Teilausladung, teil
2: Vollausladung, voll

Beckenkühlung:

0: nicht ausreichend
1: ausreichend

Zeit zwischen auslösendem Ereignis und KSZ im RDB

0: < 10 h
1: > 10 h

Zeit zwischen auslösendem Ereignis und BSZ im BELB

0: < 10 h
1: > 10 h

Verfügbarkeit der Primärkreis-Druckabsicherung

0: nicht verfügbar
1: verfügbar

Zur Kernflutung vor KSZ eingespeiste Wassermenge

Parameter, der die Wassermenge in m³ angibt

Stressfaktor für die Mannschaft

Parameter, der die relative Stressbelastung angibt

Mannschaftsstärke für Notfallmaßnahmen (NFM)

0: nicht vorhanden

1: teilweise vorhanden

2: vollständig

3: vollständig mit Fremdpersonal

primärseitige Druckentlastung:

0: nicht verfügbar

1: verfügbar, hat nicht stattgefunden,

2: verfügbar, hat stattgefunden

3: nicht relevant

Existenz eines primärseitigen Lecks:

0: kein Leck

1: kleines Leck

2: großes Leck

3: DEHEIRO-Leck

primärseitiger Druck (inkl. evtl. vor dem KSZ durchgeführter PDE):

0: hoch

1: mittel

2: niedrig

HD-Einspeisesysteme

Angaben zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit für die Inbetriebnahme mittels NFM, u.a.:

0: 0 Stränge verfügbar, 0 Stränge intakt und freigeschaltet, Rest ist nicht intakt

1: 0 Stränge verfügbar, ≥ 1 Stränge intakt und freigeschaltet, Rest ist nicht intakt

2: ≥ 1 Stränge verfügbar, 0 Stränge intakt und freigeschaltet, Rest ist nicht verfügbar

3: ≥ 1 Stränge verfügbar, ≥ 1 Stränge intakt und freigeschaltet, Rest ist nicht intakt

MD-Einspeisesysteme

Angaben zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit für die Inbetriebnahme mittels NFM, u.a.:

0: 0 Stränge verfügbar, 0 Stränge intakt und freigeschaltet, Rest ist nicht intakt

1: 0 Stränge verfügbar, ≥ 1 Stränge intakt und freigeschaltet, Rest ist nicht intakt

2: ≥ 1 Stränge verfügbar, 0 Stränge intakt und freigeschaltet, Rest ist nicht verfügbar

3: ≥ 1 Stränge verfügbar, ≥ 1 Stränge intakt und freigeschaltet, Rest ist nicht intakt

ND-Einspeisesysteme

Angaben zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit für die Inbetriebnahme mittels NFM, u.a.:

0: 0 Stränge verfügbar, 0 Stränge intakt und freigeschaltet, Rest ist nicht intakt

1: 0 Stränge verfügbar, ≥ 1 Stränge intakt und freigeschaltet, Rest ist nicht intakt

2: ≥ 1 Stränge verfügbar, 0 Stränge intakt und freigeschaltet, Rest ist nicht verfügbar

3: ≥ 1 Stränge verfügbar, ≥ 1 Stränge intakt und freigeschaltet, Rest ist nicht intakt

Eigenbedarfsversorgung

0: komplette Unverfügbarkeit

1: nur D2-Netz in ≥ 1 Strang,

2: D1 und D2 in ≥ 1 Strang

3: komplett verfügbar

Anzahl der beim KSZ befüllten Dampferzeuger:

- 0: 1 Dampferzeuger
- 1: 2 Dampferzeuger
- 2: 3 Dampferzeuger
- 3: 4 Dampferzeuger

Anzahl der kurzfristig nach KSZ bespeisbaren Dampferzeuger:

- 0: 0 Dampferzeuger
- 1: 1 Dampferzeuger
- 2: 2 Dampferzeuger
- 3: 3 Dampferzeuger
- 4: 4 Dampferzeuger

Sekundärseitige Druckentlastung und Bespeisung mit mobiler Pumpe (als mitigative NFM):

- 0: nicht verfügbar (oder hat vor KSZ stattgefunden und ist beendet / erschöpft)
- 1: verfügbar
- 2: nicht relevant

Sekundärseitige Druckentlastung und Bespeisung aus SpW-Behälter (als mitigative NFM):

- 0: nicht verfügbar (oder hat vor KSZ stattgefunden und ist beendet / erschöpft)
- 1: verfügbar
- 2: nicht relevant

Dichtheit des SB

- 0: > 100 fache Auslegung, großes Versagen
- 1: > 100 fache Auslegung, kein großes Versagen
- 2: 1...100 fache Auslegung
- 3: gemäß Auslegung

Verfügbarkeit der SB-Druckentlastungsfunktion

- 0: nicht verfügbar
- 1: verfügbar
- 2: nicht relevant

Verfügbarkeit des Filters der SB-Druckentlastung

- 0: nicht verfügbar
- 1: verfügbar
- 2: nicht relevant

Schleusen des SB

- 0: ≥ 1 Schleuse offenstehend
- 1: keine Schleuse offenstehend

Gebäudeabschluss des SB

- 0: Abschluss nicht gegeben
- 1: Abschluss liegt vor

Integrität des Reaktorgebäudes

- 0: beschädigt
- 1: nicht beschädigt

Integrität des Abluftkamins

- 0: beschädigt
- 1: nicht beschädigt

Verfügbarkeit der RR-Störfallabsaugung

- 0: nicht verfügbar
- 1: verfügbar

2.3.2 Übertragung der Kernschadenzustände (KSZ)

Im vorliegenden Vorhaben wird das Rechenprogramm EVNTRE /GÄN 15/, /GRI 89/ für die PSA der Stufe 2 genutzt, weil es flexibel ist und mit sehr großen Ereignisbäumen umgehen kann. Dies sind besonders vorteilhafte Eigenschaften für einen umfassenden allgemeinen Ereignisbaum. Da EVNTRE für eine Stufe 1 nicht geeignet ist, folgt daraus, dass die KSZ aus der Stufe 1 in die Stufe 2 übertragen werden müssen. Im vorliegenden Abschnitt wird beschrieben, wie dies praktisch geschieht.

Wegen der großen Anzahl von verschiedenen KSZ ist es nicht praktikabel, die einzelnen KSZ und ihre Wahrscheinlichkeiten einzeln manuell von Stufe 1 auf Stufe 2 zu übertragen. Vielmehr wird die im vorhergehenden Abschnitt beschriebene Tabellenform dafür effizient genutzt. Es gibt eine spezielle Möglichkeit in EVNTRE, Verzweigungswahrscheinlichkeiten durch vom Nutzer beliebig programmierbare Unterprogramme zu berechnen. Damit können die KSZ effizient in den Ereignisbaum übertragen werden.

Die Tabelle mit den Verschlüsselungen wird hierzu in ein FORTRAN-Feldformat umgewandelt und in das nutzerdefinierte Unterprogramm von EVNTRE eingetragen. Für jedes der KSZ-Merkmale wird eine eigene Verzweigung angelegt, die als Zweige die jeweiligen Ausprägungen des Merkmals erhält. Es gibt also z. B. für das letzte der Merkmale in Tab. 2.7 die Verzweigung „Ist die Störfall-Ringraumabsaugung verfügbar?“ mit den Ausprägungen „nicht verfügbar“ und „verfügbar“. Die Zweigwahrscheinlichkeiten werden durch einen entsprechenden Zugriff auf das im Unterprogramm hinterlegte Datenfeld bestimmt.

KSZ in Tabellenform lagen aus dem Vorhaben zur Untersuchung von Unfallabläufen im NLB und bei EVA bereits vor (/HAG 17/, /IRS 15/, /INE 08/, /LÖF 16/), enthielten aber noch nicht alle o. g. Merkmale. Insbesondere waren noch keine ausreichenden Informationen in Bezug auf mitigative NFM enthalten. Diese erforderlichen zusätzlichen Angaben wurden anhand der übrigen Eigenschaften der KSZ plausibel abgeschätzt und die Tabelle entsprechend ergänzt.

Für Analysen aus dem Leistungsbetrieb mit internen einleitenden Ereignissen wurde auf Informationen aus der PSA zu einem fortschrittlichen DWR /GRS 01/ zurückgegriffen. Die damaligen Analysen verwendeten ebenfalls EVNTRE, aber die Übergabe der KSZ erfolgte noch in herkömmlicher Weise über den Eingabedatensatz für den Ereignis-

nisbaum. Aus arbeitsökonomischen Gründen wurden die Merkmale dieser KSZ auch weiterhin in dieser Weise eingegeben, indem die entsprechenden Teile des früheren Eingabedatensatzes kopiert und in den allgemeinen Ereignisbaum eingesetzt wurden.

Die Möglichkeit, in derselben Analyse KSZ sowohl über den Eingabedatensatz als auch mittels Unterprogrammen einzugeben, zeigt einmal mehr die Flexibilität des verwendeten Programms EVNTRE auf. Für praktische Anwendungen in einer PSA ist es demnach auch möglich, KSZ in verschiedener Form aus verschiedenen Quellen in eine gemeinsame Analyse einzubringen.

2.4 Schlüsselfragen im Ereignisbaum

Der Ereignisbaum enthält zahlreiche Verzweigungen, die in meist chronologischer Reihenfolge dem Unfallablauf folgen. Einige dieser Fragen betreffen Schlüsselaspekte zur Charakterisierung des Ablaufes (z. B. die Frage nach den FK mit der Angabe, ob ein SB-Versagen geschieht), andere Fragen dienen der Quantifizierung der zentralen Aspekte (z. B. eine Frage nach der Ursache des SB-Versagens). Letztere Art von Fragen wird auch häufig weiter in teilweise zahlreiche Unterfragen aufgespalten (z. B. ob ein SB-Versagen infolge von statischem Überdruck oder infolge einer Wasserstoffverbrennung stattfindet usw.). In der Struktur des Ereignisbaumes erscheinen alle Arten von Fragen gleichartig, so dass ein Überblick schwierig zu erreichen ist. Deshalb werden hier die Schlüsselfragen vorgestellt.

Eine zentrale Schlüsselfrage ist die Frage nach den FK. Es gibt 10 mögliche FK, die im Abschnitt 2.1.2 beschrieben sind und folglich hat die entsprechende Verzweigung im Ereignisbaum 10 Zweige.

Aus den FK ergeben sich unmittelbar Schlüsselfragen nach der Funktion des SB. Dabei ist u. a. auch die zeitliche Entwicklung der SB-Funktion von Interesse, um frühe oder späte Freisetzungen unterscheiden zu können. Dabei ist der Begriff „früh“ oder „spät“ für den allgemeinen Ereignisbaum schwierig einzugrenzen, weil sehr unterschiedliche Abläufe mit dem Baum erfasst werden sollen. So können z. B. Abläufe im BELB Tage andauern, während im Reaktorkern typischerweise mit Stunden gerechnet wird. Andererseits ist es für die Ermittlung der Unfallfolgen und somit für die Angaben zum Quellterm entscheidend, ob anlagenexterne Notfallmaßnahmen (NFM) noch vor einer erheblichen Radionuklidfreisetzung möglich sind. Deshalb werden die nachfol-

gend angegebenen Schlüsselfragen auf den Zeitbereich vor bzw. nach der Möglichkeit für anlagenexterne NFM bezogen. Aus diesen Vorüberlegungen und der Definition der FK ergeben sich folgende **Schlüsselfragen für die frühe Phase des Ereignisbaums**:

- Liegt ein SB-Bypass vor der Möglichkeit zu anlagenexternen NFM vor?
- Ist der SB vor der Möglichkeit zu anlagenexternen NFM offen oder beschädigt?
- Findet vor der Möglichkeit zu anlagenexternen NFM eine Druckentlastung des SB statt?

Falls der SB früh beschädigt ist, muss er selbstverständlich auch in allen nachfolgenden Phasen beschädigt sein. Bei den anderen Phänomenen kann sich jedoch eine Änderung ergeben: Ein SB-Bypass könnte abgesperrt werden, eine späte Druckentlastung kann vorgenommen werden, ein zunächst noch intakter SB kann später beschädigt werden. Deshalb ist eine **Wiederholung dieser Schlüsselfragen zu einem späteren Zeitpunkt erforderlich**.

Nach dem Zeitpunkt zum Wirksamwerden anlagenexterner NFM bietet sich kein bestimmter phänomenologischer Zeitpunkt an, bei dem die Schlüsselfragen erneut zu stellen wären. Folglich werden Schlüsselfragen erst am Ende der Analyse erneut gestellt. Die Analyse wird dann beendet, wenn keine weitere wesentliche Radionuklidfreisetzung mehr in die Umgebung zu erwarten ist.

Damit die FK am Ende der Analyse definiert werden können, sind folgende Schlüsselfragen am Ende des Ereignisbaumes enthalten:

Fragen zum SB-Druckentlastungssystem am Ende der Analyse

- Bestehen am Ende der Analyse Lecks am Ventingsystem bei intakter Filterfunktion?
- Bestehen am Ende der Analyse ungefilterte Freisetzungen aus dem Ventingsystem?
- Wurde bzw. wird vor dem Ende der Analyse eine erfolgreiche SB-Druckentlastung durchgeführt?

Fragen zum langfristigen Zustand der SB-Struktur

- Ist die SB-Struktur am Ende der Analyse intakt?

- Ist der SB am Ende der Analyse auslegungsgemäß abgeschlossen?

Fragen zum Zustand des Ringraumes (RR) am Ende der Analyse

- Ist ein Schaden am RR aufgetreten bevor (oder nachdem) anlagenexterne NFM möglich sind?

Die praktische Realisierung aller genannten Fragen geschieht am Ende des Ereignisbaumes in der zusammenfassenden Definition der FK. Somit sind dann auch an einer einzigen Stelle des Baumes die wesentlichsten Aspekte ablesbar.

2.5 Berücksichtigung von mitigativen Notfallmaßnahmen (NFM)

Ein Ereignisablauf kann Eingriffe des Personals erfordern, die in Prozeduren und Training nicht vorgesehen sind. Das Personal steht in solchen Situationen vor der Aufgabe, ad-hoc ein Vorgehen zu entwickeln und zu realisieren. Diese Art des Handelns ist charakteristisch für die in einer PSA Level 2 untersuchten Unfallsituationen, in denen die Maßnahmen des Betriebs- und Notfallhandbuchs an Randbedingungen einer Unfallsituation angepasst werden müssen oder allein nicht mehr ausreichen, um das Ziel, Schäden zu begrenzen, zu erreichen.

Mit den durchgeführten Arbeiten ist eine praktische, anwendungsorientierte Anleitung zur Analyse und Bewertung von Personalhandlungen in Unfallsituationen entwickelt worden. Mit diesem Vorgehen wurden drei Personalhandlung beispielhaft so modelliert, dass sie in die vorhandene Ereignisbaumstruktur eingebunden werden konnten. Diese Arbeiten sind im Einzelnen in Abschnitt 4 dieses Berichts beschrieben. Die NFM sind im Einzelnen:

- **Wiederherstellung der Möglichkeit zur Sumpfansaugung über Nachkühlpumpen:** Dieses Beispiel dient der Veranschaulichung des Vorgehens zur Analyse und Bewertung wissensbasierter mitigativer Handlungen der Art „Beheben/Kompensieren eines beobachteten Defekts“.
- **Einspeisung mittels Volumenregelsystem:** Dieses Beispiel dient der Veranschaulichung des Vorgehens zur Analyse und Bewertung wissensbasierter mitigativer Handlungen der Art „Einsatz von noch vorhandenen Systemen in einer ursprünglich nicht dafür vorgesehenen Vorgehensweise“.

- **Verspätete sekundärseitige Druckentlastung:** Dieses Beispiel dient der Veranschaulichung des Vorgehens zur Analyse und Bewertung wissensbasierter mitigativer Handlungen der Art „Durchführen einer Maßnahme mit schädlicher Wirkung im Zuge des auslegungsüberschreitenden Ereignisablaufs“.

Die Anwendungsbeispiele sind in einem gemeinsamen Szenario angesiedelt: Auslösendes Ereignis ist ein kleines Leck am Primärkreis (Querschnitt 20 cm²) mit komplettem Ausfall der Dampferzeugerbespeisung, einer zeitlichen Verzögerung bei der Vorbereitung der Notfallmaßnahme „Sekundärseitige Druckentlastung und Bespeisung (über eine mobile Pumpe)“ und einem Ausfall der Sumpfumschaltung nach Entleerung der Flutbehälter aufgrund gemeinsam verursachtem Ausfall der Sumpf/Flutumschaltarmaturen. Die Bestimmung des sicherheitstechnisch vorteilhaften wissensbasierten mitigativen Handelns erfolgt in der Beschreibung eines Handlungsmodells (siehe Kapitel 4.3.2, 4.4.2 und 4.5.2).

2.6 Gleichzeitiger Unfallablauf im Reaktorkern und im BELB

Es wird nachfolgend diskutiert, welchen Einfluss ein gleichzeitiger Unfallablauf im BELB und im Reaktorkern auf die Struktur eines vorhandenen allgemeinen Ereignisbaumes hat. Zu diesem Zweck wird der Ablauf im Lagerbecken in vier Phasen unterteilt und der jeweilige Einfluss auf den Ereignisablauf wird angegeben:

Vor Siedebeginn im BELB: kein erheblicher Einfluss auf den Ablauf des Kernschmelzens im RDB

Nach Siedebeginn und vor Brennstoffschmelzen im BELB: Der aus dem Lagerbecken gebildete Dampf erhöht die Temperatur und den Druck in der SB-Atmosphäre (DWR) und er wirkt inertisierend.

Nach Beginn Brennstoffschmelzen und vor Beginn Schmelze-Beton-Wechselwirkung im BELB: Die Wasserstoffproduktion beeinflusst die SB-Atmosphäre (DWR) oder die Atmosphäre im Reaktorgebäude (SWR). Radionuklide aus dem Lagerbecken erhöhen die radiologische Belastung.

Nach Beginn der Schmelze-Beton-Wechselwirkung im BELB: Die Erzeugung verschiedener Gase (Wasserstoff, CO, CO₂, Dampf) beeinflusst die SB-Atmosphäre

(DWR) oder die Atmosphäre im Reaktorgebäude (SWR). Radionuklide aus dem Lagerbecken erhöhen die radiologische Belastung.

Diese grundsätzlichen Beiträge aus dem BELB gelten sowohl für den LB als auch für den NLB sowie für offenen und geschlossenen RDB. Die Berücksichtigung dieser Vorgänge in der Struktur des Ereignisbaumes für den Reaktorkern lässt sich grundsätzlich realisieren, indem am Beginn jeder Phase des Baumes für den Reaktorkern eine Verzweigung eingefügt wird, die nach der jeweilig herrschenden Phase im Ablauf für das Lagerbecken fragt. So würde beispielsweise jeder einzelne Zeitabschnitt des gemeinsamen Ereignisbaumes wie folgt beginnen:

Verzweigung x: Welcher Zustand herrscht im aktuellen Zeitabschnitt im Lagerbecken?

- Zweig 1: Noch kein Sieden
- Zweig 2: Sieden findet statt, Brennelemente noch intakt
- Zweig 3: Brennelemente schmelzen, Beckenboden noch nicht betroffen
- Zweig 4: Schmelze-Beton-Wechselwirkung am Beckenboden.

Die Wahrscheinlichkeiten der Zweige müssten aus den jeweiligen relativen Zeitabläufen im RDB und im Lagerbecken abgeleitet werden. Die Quantifizierung der einzelnen physikalisch-chemischen Phänomene in den Zeitabschnitten muss dann den jeweiligen Beitrag aus dem Lagerbecken mit einbeziehen.

Als Basis für die Bewertung der Vorgänge im Lagerbecken kann z. B. der Bericht /NUR 98/, /NRC 17/, /STE 14/ dienen. In diesem Bericht werden u. a. Abläufe bei verschiedenen Beladezuständen des Lagerbeckens beschrieben und es wird u. a. deutlich, wie sehr die Abläufe vom Beladezustand abhängen. Bei Unfallabläufen nach EVA im Leistungsbetrieb ist dieser Aspekt einfach, weil dabei von der Normalbeladung des Lagerbeckens ausgegangen werden kann. Bei NLB sind jedoch sowohl eine Teilausladung als auch eine Vollausladung des Kerns und eine entsprechende Beladung des Lagerbeckens möglich. Daher kann es geboten sein, diese beiden Beladungszustände im Ereignisbaum zu unterscheiden.

Die angedeutete Struktur ist grundsätzlich einfach und naheliegend. Es ist jedoch zu erwarten, dass bei der praktischen Umsetzung erhebliche Bewertungsschwierigkeiten bestehen, weil sich einerseits die Anzahl der möglichen Zweigkombinationen vervielfacht und weil keine einschlägigen Unfallablaufanalysen unter gleichzeitiger Beteiligung der beiden Brennstoffquellen (RDB und Lagerbecken) vorliegen. Im vorliegenden Vorhaben ist die Entwicklung eines derartigen gemeinsamen Ereignisbaumes nicht vorgesehen, daher wird auf diese Aspekte nicht weiter eingegangen.

2.7 Der einheitliche Ereignisbaum

Der Ereignisbaum enthält folgende Elemente:

- Vollständige Charakterisierung aller relevanten KSZ für Leistungsbetrieb mit internen und externen auslösenden Ereignissen, für den NLB und für das BELB. Es handelt sich um insgesamt ca. 100 KSZ mit jeweils etwa 30 Merkmalen. Hierfür werden ca. 36 Verzweigungen im ersten Teil des Ereignisbaumes genutzt.
- 11 Schlüsselfragen zum Ereignisablauf vom Kernschaden bis zu FK. Aus derzeitiger Sicht sind die Fragen vollständig.
- Je Schlüsselfrage einige detailliertere Fragen zur präziseren Quantifizierung der Schlüsselfrage, z. B.:
Schlüsselfrage: Versagt der SB?
Detaillierte Frage 1: Schmilzt der SB am Sumpfsaugrohr durch?
Detaillierte Frage 2: Versagt der SB durch Überdruck?
- Fragen zum Zeitbedarf / der Verfügbarkeit / den Randbedingungen u. Ä. für verschiedene Schritte einer NFM. Folgende mitigative Notfallmaßnahmen sind im Ereignisbaum vorhanden: Primärseitige Druckentlastung, Wiederherstellung der Sumpfschaltung, Einspeisen mittels Volumenregelsystem und sekundärseitige Druckentlastung und Bespeisung.
- Vollständiger Satz von 10 FK mit ihren Abhängigkeiten von den Schlüsselfragen.

Der so gebildete Ereignisbaum hat insgesamt 117 Verzweigungen. Er ist lauffähig und benötigt pro Analyse nur wenige Sekunden Rechenzeit.

Als eines der Ergebnisse des Vorhabens kann folglich geschlossen werden, dass ein einheitlicher Ereignisbaum für alle auslösenden Ereignisse und Betriebszustände praktisch handhabbar ist.

Eine detaillierte Darstellung des Einbaus von Notfallmaßnahmen finden sich in den Kapiteln 4.3.4, 4.4.4 und 4.5.4. Ausführliche Informationen zur Quantifizierung des Ereignisbaums finden sich u.a. in den Kapiteln 4.3.1, 4.4.1 und 4.5.1.

Die Ergebnisauswertung des Ereignisbaumes anhand von exemplarischen Ergebnissen findet sich in Kapitel 6.

3 Überschlägige Quantifizierung der einheitlichen Ereignisbaumstruktur

Im Arbeitsschritt 5.2.1 wurde eine grundsätzlich nutzbare allgemeine Ereignisbaumstruktur entwickelt. Im Arbeitsschritt 5.2.2 wird diese Ereignisbaumstruktur mit Daten, im Wesentlichen Zweigwahrscheinlichkeiten sowie einem Modell für mitigative NFM, überschlägig ergänzt und quantifiziert.

Der vorliegende Ereignisbaum enthält für die Daten und Phänomene lediglich Abschätzungen, zum Teil übernommen aus früheren Analysen. Somit weisen die Endergebnisse eine gewisse Plausibilität auf, aber sie sind nicht für Sicherheitsbewertungen unmittelbar anwendbar.

3.1 Notfallmaßnahmen

Im Abschnitt 4.3 wird beschrieben, wie die Notfallmaßnahme „Wiederherstellung der Möglichkeit der Sumpfansaugung“ in einem Schema quantitativ bewertet werden kann. Dieses Schema wurde in den einheitlichen Ereignisbaum integriert, indem für jeden Schritt des Schemas eine Verzweigung eingeführt wurde. Zusätzlich war es erforderlich, einige weitere Verzweigungen zur Verbindung mit dem Hauptteil des Ereignisbaumes einzuführen. Insgesamt ergaben sich:

- 1 Verzweigung für die Ermittlung, ob und mit welcher Wahrscheinlichkeit die für die Notfallmaßnahme zutreffenden Voraussetzungen vorliegen,
- 1 Verzweigung zur Zuordnung der möglichen schädlichen Handlungen zu im Ereignisbaum verfügbaren Schadenszuständen,
- 4 Verzweigungen zur Ermittlung, ob und mit welcher Wahrscheinlichkeit unter den gegebenen Umständen schädliche Handlungen ausgeführt werden,
- 3 Verzweigungen, um zu prüfen, ob ein Eintritt in die Phase des Problemlösens erfolgt,
- 3 Verzweigungen, um die Erfolgswahrscheinlichkeit des Problemlösens zu ermitteln,
- 1 Verzweigung, um die Erfolgswahrscheinlichkeit der ausgewählten Handlung zu ermitteln und

- 1 Verzweigung zur Zusammenfassung der entsprechenden Zweige aus den vorherigen Schritten.

Diese relativ hohe Anzahl an Verzweigungen ergibt sich durch die Anwendung der schematisch angelegten allgemeinen Schrittfolge. Es ist sicher möglich, bei einzelnen Notfallmaßnahmen einige Schritte in einer einzelnen Verzweigung zusammenzufassen. Dennoch bleibt festzuhalten, dass die Quantifizierung von mitigativen Notfallmaßnahmen einen erheblichen Modellierungsaufwand bedeutet. Es ist zwar denkbar, den Modellierungsaufwand zum Teil aus dem Ereignisbaum auszulagern und separat zu analysieren, so dass der Baum selbst entlastet wird. Am Gesamtaufwand ändert sich dadurch jedoch grundsätzlich nichts.

3.2 Ergebnisdarstellung

3.2.1 Auswertungsmöglichkeiten im Überblick

Der Ereignisbaum enthält extrem viele Endzweige und ihre bedingten Wahrscheinlichkeiten. Für jeden einzelnen Endzweig ist grundsätzlich Information darüber verfügbar, welchen Weg dieser Endzweig an den einzelnen Verzweigungspunkten genommen hat, d. h. welche Anfangszustände, Phänomene etc. zu diesem einzelnen Endzweig beitragen. Eine schematische Auflistung aller Endzweige und ihrer beitragenden Aspekte wäre nicht handhabbar und nicht aufschlussreich. Darum ist es erforderlich, die Endzweige sinnvoll zusammenzufassen (englisch: „binning“).

Eine erste Stufe der Zusammenfassung ist die Angabe über die Wahrscheinlichkeit verschiedener Zweige. Die Standardausgabe von EVNTRE liefert die Zweigwahrscheinlichkeiten für jeden Verzweigungspunkt. So wird beispielsweise für die Frage nach dem Erreichen des Ventingdruckes im output-Datensatz angegeben:

```

Wird Ventingdruck erreicht|
  SBPVnM   SBPVjM
  1         2
4.199E-01 5.803E-01

```

Abb. 3.1 Ausschnitt aus dem EVNTRE output-Datensatz bezüglich der Frage, ob der Ventingdruck erreicht wird

Im Rahmen von Monte-Carlo-Simulationen werden mehrere vorgelagerte Verzweigungspunkte mit Unsicherheitswerten und -bandbreiten versehen und so die Wahrscheinlichkeitswerte für Zwischen- und Endzweige berechnet. Dies führt beispielsweise dazu, dass im Mittel über alle Fälle und alle Monte-Carlo-Simulationen der Zweig SBPVnM (Venting-Druck wird nicht erreicht) die Wahrscheinlichkeit 0.42 erhält, während der Zweig SBPVjM (Venting-Druck wird erreicht) die Wahrscheinlichkeit 0.58 erhält (Zahlenwerte hier nur zur Illustration).

Weiterhin enthält der output-Datensatz die bedingten Wahrscheinlichkeiten separat für verschiedene Fälle (z.B. Erreichen des Venting-Druckes für Fälle mit Kernschmelzen, oder für Fälle mit Schäden im Brennelementlagerbecken). Diese Art der Ergebnisdarstellung ist sehr nützlich zum Erkennen von Ergebnistrends. Im Abschnitt 6 bzw. in /JOS 18/ sind entsprechende exemplarische Auswertungen der Ereignisbaumanalyse dokumentiert. Ein Überblick über Zusammenhänge zwischen Phänomenen ist damit jedoch kaum möglich.

Für eine umfassende Ergebnisinterpretation und das Erkennen von Zusammenhängen verfügt das Rechenprogramm EVNTRE über angekoppelte Auswerteroutinen. Der Nutzer ist frei in der Festlegung, wie die Auswertung und die Gruppierung vorzunehmen ist. Folgende Auswahl hat der Nutzer zu treffen:

Schritt 1 der Gruppierung: Der Nutzer bildet bis zu 10 Gruppen erster Ordnung unter Verwendung der Zweignamen im Ereignisbaum. Er kann dabei auf ausnahmslos alle Zweignamen zurückgreifen. Er kann also z. B. eine Gruppe „auslösende Ereignisse Detail“, eine Gruppe „Kernschadenzustände“ und eine Gruppe „SHB-Endzustand“ bilden. In jeder Gruppe kann er geeignete Merkmale festlegen, z. B. bei den „auslösenden Ereignissen Detail“ die Merkmale „kleiner Kühlmittelverlust“, „mittlerer Kühlmittelverlust“, „großer Kühlmittelverlust“, „Notstromfall“, und „Ausfall Wärmesenke“.

Schritt 2 der Gruppierung: Der Nutzer bildet bis zu 10 Gruppen zweiter Ordnung aus den Merkmalen der Gruppen erster Ordnung, z. B. die Gruppe „auslösende Ereignisse summarisch“ mit den Merkmalen „Kühlmittelverlust“ und „Transienten“.

Das Auswerteprogramm von EVNTRE liefert nun (neben anderen Informationen) Tabellen, in denen für jedes Merkmal aus einer zweiten Gruppe (also z. B. für den „Kühlmittelverlust“ angegeben wird, zu wieviel Prozent die Merkmale der ersten Gruppe dazu beitragen. Man kann also z. B. erkennen, wieviel der „kleine Kühlmittelverlust“ zum

„Kühlmittelverlust“ beiträgt, oder zu welchem Anteil der „Kühlmittelverlust“ in die verschiedenen Freisetzungskategorien übergeht. So ist dann z. B. auch erkennbar, ob aus Unfällen im Brennelementlagerbecken tendenziell gravierendere Freisetzungskategorien zu erwarten sind als aus Kernschadenzuständen.

Diese flexible Art der Auswertung liegt zunächst nur tabellarisch vor. Sie kann einfach auf graphische Darstellungen übertragen werden.

Die bisher genannten Ergebnisdarstellungen sind für Punktwerte vorgesehen. Diese ergeben sich aus Ereignisbaumanalysen ohne die Variation unsicherer Parameter, oder aus den Erwartungswerten (arithmetischen Mittelwerten) von Monte-Carlo-Simulationen. Mit jeder einzelnen Monte-Carlo-Simulation, in der die Verzweigungswahrscheinlichkeiten einiger Zweige variiert werden, wird der Ereignisbaum einmal vollständig durchlaufen, und es entsteht ein kompletter Satz von Ergebnissen (z. B. Wahrscheinlichkeiten für Freisetzungskategorien) für jede Simulation.

Unsicherheiten können für jede Ergebnisgröße (z. B. die Wahrscheinlichkeit für eine bestimmte Freisetzungskategorie) wie folgt dargestellt werden:

- Angabe von Erwartungswert, Median, 5 %- und 95 %-Fraktile für ihre Wahrscheinlichkeiten,
- ein Graph mit der Verteilung ihrer Wahrscheinlichkeit,
- Angabe derjenigen unsicheren Eingabeparameter, die besonders zur Unsicherheit der Ergebnisgröße beitragen (dies ist ein Resultat der Sensitivitätsanalyse).

3.2.2 Ergebnisbeispiele

Es ist hier vorzuschicken, dass alle in der Ergebnisdokumentation in Kapitel 6 genannten Ergebnisse nicht auf einer eingehenden Analyse für eine bestimmte Anlage beruhen. Sie beruhen vielmehr entweder auf plausiblen Annahmen, oder auf speziellen Eingaben, die die besonderen Aspekte einer übergreifenden Ereignisbaumanalyse demonstrieren sollen. Es ist nicht zulässig, die dargestellten Ergebnisse zur Sicherheitsbewertung zu nutzen. Ferner wird als Eingangshäufigkeit in den Ereignisbaum kein typischer Wert, wie z. B. 10^{-6} eingegeben, sondern „1“.

Somit sind alle nachfolgend angegebenen Ergebnisgrößen bedingte Wahrscheinlichkeiten unter der Bedingung, dass ein Brennstoffschaden (im Kern oder im Lagerbecken und aufgrund aller einleitenden Ereignisse insgesamt) eintritt.

Die vielfältig möglichen Auswertungen (siehe die Ergebnisdokumentation in Kapitel 6) werden nachfolgend zur Beantwortung folgender Fragen genutzt:

- Wie wahrscheinlich ist das Auftreten der verschiedenen SB-Endzustände?
- Wie wahrscheinlich ist das Auftreten der verschiedenen Freisetzungskategorien?
- Welche unsicheren Eingabedaten tragen dominant zur Unsicherheit über die Wahrscheinlichkeit der SB-Endzustände bei?
- Welche unsicheren Eingabedaten tragen dominant zur Unsicherheit über die Wahrscheinlichkeit der Freisetzungskategorien bei?

4 Ergänzende Untersuchungen zu mitigativen menschlichen Handlungen im Bereich schwerer Unfallabläufe

Die Untersuchungen zu mitigativen menschlichen Handlungen (Arbeitsschritt 5.2.3) sind in einen eigenständigen GRS-Bericht mit dem Thema „Ergänzende Untersuchungen zu mitigativen menschlichen Handlungen im Bereich schwerer Unfallabläufe“ /PRE 18/ dargestellt. Die folgenden Abschnitte enthalten entsprechende Auszüge aus diesem Bericht.

Die Ergebnisse der Untersuchungen von /PRE 18/ sind in den Ereignisbaum in Form von Verzweigungen und Quantifizierungen von Verzweigungswahrscheinlichkeiten eingeflossen und somit Bestandteil des umfassenden Ereignisbaums geworden.

Bei der PSA der Stufe 2 werden schwere Unfallabläufe untersucht. Für solche Unfallabläufe existieren nur punktuell vorgeplante Prozeduren und vollständige Trainings. Das Personal muss daher meist auf der Grundlage zur Verfügung stehender Informationen und Wissensinhalte versuchen, den Anlagenzustand zu verbessern oder zumindest zu stabilisieren.

Die Entwicklung eines entsprechenden Vorgehens, wird als Problemlösen verstanden, da der Handelnde hierbei vor dem Problem steht, dass er zunächst nicht weiß, wie er vorgehen soll und das zur Zielerreichung nötige Handeln ad-hoc zu finden hat. Handeln aufgrund einer Problemlösung gehört der Ebene wissensbasierten Verhaltens an.

Diese Art des Handelns ist charakteristisch für die in einer PSA Level 2 untersuchten Unfallsituationen, in denen die Maßnahmen des Betriebs- und Notfallhandbuchs an Randbedingungen einer Unfallsituation angepasst werden müssen oder allein nicht mehr ausreichen, um das Ziel, Schäden zu begrenzen, zu erreichen. In der erfolgreichen Durchführung solcher Handlungen besteht noch eine erhebliche Sicherheitsreserve, durch die Unfälle verhindert oder deren Auswirkungen verringert werden können. Deshalb sind entsprechende wissensbasierte Personalhandlungen zu identifizieren, in die Ereignisbaumstruktur einzubinden und probabilistisch zu bewerten. Können solche Handlungsweisen identifiziert werden, besteht objektiv gesehen ein Bedarf an deren Durchführung, da sie zur Verbesserung oder Stabilisierung des Anlagenzustandes beitragen. Daher werden sie in dieser Arbeit auch als wissensbasierte Handlungsweisen mit technischer Notwendigkeit bezeichnet.

Es ist aber auch möglich, dass Operateure aufgrund von kognitiven Fehlern, wie Fehleinschätzungen, ad-hoc Maßnahmen durchführen, die ebenfalls nicht in Prozeduren und Trainings vollständig vorgeplant sind, aber zu einer Verschlechterung des Anlagenzustandes führen. Diese Maßnahmen werden im Folgenden als wissensbasierte Handlungen ohne technische Notwendigkeit bezeichnet. Diese sind in der PSA getrennt von solchen mit einer Handlungsnotwendigkeit zu betrachten. Diese Aufteilung ist durch das PSA-Verfahren begründet: Bei einer PSA werden Ereignisabläufe betrachtet. Dabei werden die Verfügbarkeiten / Unverfügbarkeiten von Systemfunktionen untersucht. Die Abfolge von Systemfunktionen führt zu definierten Schadenszuständen. Aus der Abfolge der Systemfunktionen ergeben sich Anforderungen für Tätigkeiten des Personals. Diesen Tätigkeiten werden entsprechend der Randbedingungen Fehlerwahrscheinlichkeiten zugeordnet. Hieraus resultiert dann mit dem Erfolg bzw. Misserfolg einer Personalhandlung die Verfügbarkeit bzw. Unverfügbarkeit einer Systemfunktion. Im Fall einer schädlichen Personalhandlung ohne technische Notwendigkeit wird aber ein anderer Ansatzpunkt verfolgt. Ausgehend von den in der PSA erstellten Ereignisablaufdiagrammen wird die Frage untersucht, welche Personalhandlungen denkbar sind, die die im Diagramm modellierten und zunächst verfügbaren Funktionen in nicht akzeptabler Weise beeinträchtigen. Deshalb ist hier ein methodisch anderes Vorgehen notwendig.

Beide Aspekte des wissensbasierten Handelns sind insbesondere in Situationen, für die der Umfang an ausreichend vorgeplanten Maßnahmen und Handlungen reduziert ist, zu untersuchen. Wie bereits bei den regelbasierten Handlungen, d. h. Handeln auf der Grundlage vorgeplanter und trainierter Regeln und Prozeduren, wird hier der Untersuchungsumfang auf wissensbasierte Handlung begrenzt, die auf der Grundlage eines zuvor ermittelten Handlungsziels durchgeführt werden. Handeln ohne vorangehenden strukturierten Denkprozess, wie es in Phasen der Konfusion nach Eintreten unerwarteter Ereignissituationen verbunden mit sehr hoher Stressbeanspruchung denkbar ist, ist nicht Gegenstand der hier vorgestellten Methoden. Die Identifikation und Bewertung schadensvergrößernder Handlungen in Phasen der Konfusion ist nicht Stand von Wissenschaft und Technik auf dem Gebiet der probabilistischen Bewertung von Personalhandlungen. Zur Verhinderung möglicher negativer Folgen solchen Verhaltens wurde in deutschen Anlagen eine Reihe von technischen Vorkehrungen getroffen (u. a. hoher Automatisierungsgrad und Vorrangkonzept).

4.1 Anleitung zur Analyse und Bewertung schädlicher Eingriffe

Grundsätzlich wird innerhalb einer PSA davon ausgegangen, dass die Operateure Handlungen ausführen, die aus ihrer Sicht sinnvoll und adäquat sind und welche mit dem technisch vorliegenden Umfeld in einem direkten Zusammenhang stehen. Bewusst inkorrektes Verhalten (Sabotage) wird in probabilistischen Sicherheitsanalysen nicht untersucht.

Mit der im Folgenden vorgestellten Methode kann auch untersucht werden, in wieweit Fehler in der Informationsverarbeitung des Menschen (kognitive Fehler) dazu führen, dass das Personal Handlungen ausführt, die unterschiedlich zu der systemtechnisch erforderlichen Handlung sind, oder dass eine Handlung ausgeführt wird, obwohl systemtechnisch keine Handlung erforderlich ist. In der Betriebserfahrung gibt es Beispiele für diese Art von Handlungen. Aus ausländischen Anlagen ist bekannt, dass sie zu schwerwiegenden Ereignisabläufen mit großen Folgen führen können.

Gerade nach Eintritt eines Störfalls gewinnen kognitive Fehler an Bedeutung, da die dort vorherrschenden systemtechnischen Randbedingungen die Auslösung kognitiver Fehler begünstigen. Wesentliche begünstigende Randbedingungen sind z. B. Instrumentierungsausfälle, dem Operateur ungewohntes bzw. unbekanntes Systemverhalten, geringere Vorplanungstiefe möglicher Gegenmaßnahmen sowie zunehmender Stress. Daneben müssen teilweise systemtechnische Vorkehrungen, die ungünstige Handlungen auf Grund kognitiver Fehler auffangen würden, unwirksam gemacht werden. Unter diesen Randbedingungen muss der Operateur dann auf ihm bekannte Erfahrungsmuster zurückgreifen, die möglicherweise im gegebenen Anlagenzustand nicht adäquat sind. Für eine aussagekräftige Bewertung von Personalhandlungen ist es daher erforderlich, ungünstig wirkende Handlungen aufgrund kognitiver Fehler einzubeziehen. Im Rahmen des Forschungsvorhabens RS1112 (vgl. /FAS 03/) wurde eine Methode zur Bewertung solcher Handlungen entwickelt, die sich aus drei Teilschritten zusammensetzt:

- Systematische Bestimmung von Eingriffen, die in einer konkret vorgegebenen Anlagensituation schädlich sind,
- Identifikation von zu unterstellenden Denkfehlern, die in einer konkret vorgegebenen Anlagensituation zu unterstellen sind sowie

- Qualitative und quantitative Einschätzung der Wahrscheinlichkeit, dass das Auslösemuster einer schädlichen Handlung irrtümlich als gegeben eingeschätzt und ein schädlicher Eingriff ausgeführt wird.

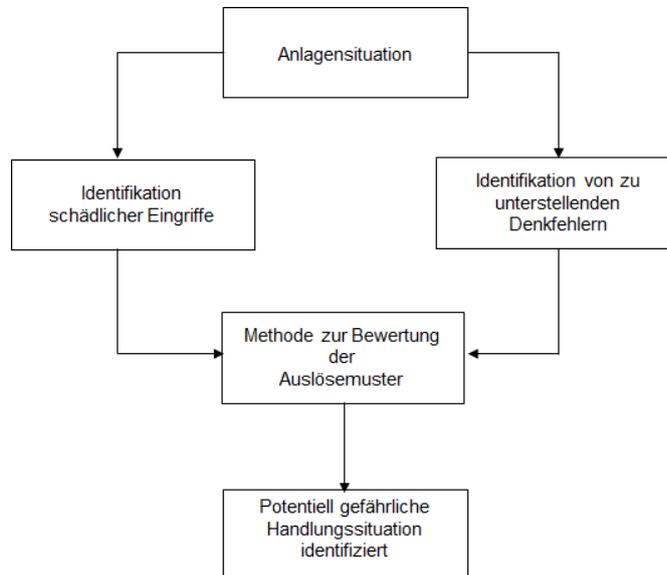


Abb. 4.1 Methodischer Ansatz zur Bewertung schädlicher Eingriffe (aus /PRE 18/)

Der Ansatz der Methode wird in /PRE 18/ weiterführend dargelegt.

4.2 Analyse und Bewertung wissensbasierten mitigativen Handelns

Die folgenden Ausführungen nutzen „wissensbasiertes Handeln“ als Oberbegriff. Er umfasst „Problemlösen“ und „wissensbasierte Handlungen“ als Unterbegriffe. Sie fassen die in /FAS 10/ dokumentierten Vorgehensweisen zur qualitativen Analyse und Bewertung sowie zur probabilistischen Bewertung wissensbasierten Handelns zusammen und verbinden sie zu einem Modell des Problemlöseversuchs.

Eine Problemlösung besteht aus der technisch zulässigen, zielführenden Anwendung einzelner oder einer Kombination mehrerer bekannter Vorgehensweisen in einer Situation, für die mindestens eine dieser Vorgehensweisen weder vorgesehen noch eingeübt ist. Entsprechend /FAS 10/ ist es das Ziel der Analyse, die Erfolgsaussichten einzuschätzen, dass das Personal herausfindet, welche Handlungen auszuführen sind.

Die qualitative Einschätzung der Erfolgsaussichten des Problemlösens dient als Grundlage für die quantitative Bewertung. Zur Vorbereitung der qualitativen Einschätzung untersucht der Methodenanwender die Aspekte „Stress“, „Systematik des Problemlösens“ und „Güte der Informationen für das Problemlösen“.

Das Ausmaß an Stress ist einzuschätzen. Das Potential für Stress besteht in Situationen, die eine Person subjektiv als „gefährlich“ oder „herausfordernd“ wahrnimmt. In diesen hängt die Bildung von Stress wesentlich davon ab, wie eine Person das Verhältnis zwischen Anforderungen, die an diese gestellt werden, und ihre Anpassungsfähigkeit subjektiv bewertet. Wichtige Ursachen erhöhten oder hohen Stresses sind Zeitdruck, Aufgabenvielfalt, eingeschränkte Vorhersagbarkeit des Anlagenverhaltens, ungenaue Informationen über den Anlagenzustand, erwartete Konsequenzen fehlerhaften Handelns und bereits eingetretene Fehler.

Die Systematik des Problemlösens ist zu werten. Folgende Merkmale zeichnen ein systematisches bzw. unsystematisches Vorgehen aus:

- Die Problemlöser setzen und verfolgen ein klares Ziel, das sie während des Problemlöseprozesses nicht aus den Augen verlieren. Das Ziel der Problemlöser entspricht demjenigen, das nach den Ergebnissen der System- und Ereignisablaufanalysen erreicht werden muss. Das Ziel wird präzisiert oder geändert, wenn der Erkenntnisstand zum Beispiel zu den Ursachen des Problems dies erfordert. Während der Problemlösung überwacht das Personal den Anlagenzustand und prüft, ob er eine Änderung des Ziels erfordert (Stichwort „Zielanalyse“). Bei mehreren Zielen werden Prioritäten entsprechend der objektiv gegebenen Dringlichkeit und Wichtigkeit der einzelnen Ziele gesetzt. Ziele werden in Teilziele zerlegt, wenn die Problemlöser kein Vorgehen finden, das die gegebene Situation direkt in den Zielzustand überführt. Die Teilziele erfassen lückenlos die Etappen, die zur Erreichung des Ziels durchlaufen werden müssen. Teilziele führen zur Zerlegung des Gesamtproblems in Teilprobleme, die alle systematisch bearbeitet werden. Teilziele können ihrerseits in weitere Teilziele zerlegt werden usw. Die Merkmale der Systematik des Problemlösens sind auf alle Teilprobleme anzuwenden, die das Personal im Zuge der Problemlösung aufstellt.

- Ein unsystematisches Vorgehen besteht dagegen darin, keine, zu allgemeine oder ungenaue Ziele zu setzen, Ziele ohne sachlich triftigen Grund zu wechseln, an Zielen festzuhalten, die geändert werden müssen, oder Ziele zu verfolgen, die eng formuliert sind und dadurch allenfalls zu Teillösungen des Problems führen. Bei mehreren Zielen unterbleiben klare Prioritätensetzungen. Eventuell definierte Prioritäten orientieren sich nicht an der objektiv gegebenen Dringlichkeit und Wichtigkeit der Ziele. Das hat die Folge, Ziele zu hoch oder zu niedrig bewerten.
- Das Personal sucht und findet die genauen Ursachen dafür, dass das Ziel vom gegebenen Istzustand aus unerreichbar ist (Stichwort „Konfliktanalyse“). Bei der Suche werden alternative mögliche Ursachen gesucht und auf Stichhaltigkeit geprüft. Zum Beispiel: Geht die ausbleibende Förderleistung auf einen Defekt der Pumpe zurück oder auf einen vorrangigen Befehl der Automatik, die den Start auslegungsgemäß verhindert? Die Suche nach den Ursachen ist in der verfügbaren Zeit und mit den vorhandenen Informationen möglichst erschöpfend, Ursachenketten werden soweit möglich bis an ihren Ausgangspunkt zurückverfolgt. Bei Ursachenbündeln werden Wechselwirkungen einbezogen.
- Qualität und Erfolg des Problemlösens stehen infrage, wenn mögliche Ursachen, Ursachenbereiche oder Alternativen zu gefundenen Ursachen und/oder Wechselwirkungen zwischen Ursachen ungeprüft verworfen werden („Es kann doch gar nicht sein, dass ...“), wenn die Suche vorzeitig und nicht bei der Erstsache endet, wenn scheinbar offensichtliche Ursachen nicht näher überprüft werden und/oder wenn ein planvolles Vorgehen zur Eingrenzung und Bestimmung der Ursachen fehlt. Im Zuge des Problemlösungsprozesses werden zutreffende Lösungsprinzipien formuliert und dem Stand der Ursachenerkenntnis entsprechend verfeinert (bzw. revidiert). Lösungsprinzipien nehmen in genereller Form das tatsächliche Vorgehen zur Lösung des Problems vorweg. Sie bringen zum Ausdruck, was die Lösung ausmacht. Dies unterstützt die Suche nach den konkreten und richtigen Vorgehensweisen und Mitteln wirksam. Man weiß, wonach man zu suchen hat und was eine Lösung auszeichnet. Dagegen beeinträchtigen oder verhindern vage, unzutreffende oder fehlende Lösungsprinzipien die Suche nach adäquaten Lösungen.

- Problemlösen umfasst in der gegebenen Situation die Suche nach Möglichkeiten, einen anvisierten Lösungsweg in die Tat umzusetzen (Stichwort „Materialanalyse“). Die Methode definiert als Lösung sicherheitstechnisch zulässige Vorgehensweisen bei Routineaufgaben oder Teile daraus, die einzeln oder in Kombination die Erreichung des angestrebten Sicherheitszieles (oder eines Teilziels auf dem Weg zu diesem Ziel) ermöglichen. Systematische Lösungssuche zeichnet sich dadurch aus, die vorhandenen Unterlagen wie Betriebs- und Notfallhandbuch nach nutzbaren Vorgehensweisen zu durchsuchen und Fachkräfte nach solchen Vorgehensweisen zu befragen. Die Problemlöser achten darauf, dass jedes einzelne Teilziel den Kriterien und Bedingungen der Anwendung des Vorgehens entspricht, mit dem das nächste Teilziel erreicht werden soll.
- Die Problemlöser prüfen die gefundene(n) Vorgehensweise(n) zur Zielerreichung auf ihre sicherheitstechnische Zulässigkeit, Ausführbarkeit, Wirksamkeit und Nebeneffekte in der gegebenen Situation (Stichwörter „mentale Simulation“ und „Auswahl der Vorgehensweise“). Die Ausführbarkeit ist zum Beispiel zu beurteilen, indem man die verfügbare Zeit für die Ausführung, die Einsatzbereitschaft erforderlicher Fachkräfte, die Erreichbarkeit der Ausführungsorte und die Arbeitsbedingungen an diesen Orten in Betracht zieht und wertet. Die Ausführung kann Freischaltungen voraussetzen, die das Personal in die Betrachtung einbezieht. Werden Anwendungsbedingungen gelockert oder Nebeneffekte in Kauf genommen, erfolgt dies nach sorgfältiger Prüfung des Für und Wider. Erfüllen gefundene Vorgehensweisen die Anforderungen an Anwendbarkeit, Ausführbarkeit, Wirkung und Nebeneffekte nicht, verzichten die Problemlöser auf die Umsetzung. Entscheiden sie sich für die Umsetzung, antizipieren sie mögliche Hindernisse und Fehler bei der Ausführung und legen geeignete Vorkehrungen fest.

In einem unsystematischen Problemlösungsprozess bleibt die Nutzung der Quellen für Vorgehensweisen selektiv. Zu den Quellen gehören Unterlagen und Fachkräfte. Das Personal setzt eine gefundene Vorgehensweise um, ohne genau zu prüfen, ob sie die Anforderungen an Zulässigkeit, Ausführbarkeit und Wirksamkeit wirklich erfüllen.

Im Problemlösungsprozess benötigt das Personal Informationen über

- den Zustand der Anlage, Systeme und Komponenten
- den Aufbau der Systeme und Komponenten
- ihre system- und verfahrenstechnischen Zusammenhänge
- Prozeduren und andere Beschreibungen von Vorgehensweisen, mit denen sich System- und Komponentenzustände ändern lassen, und
- Lage, Aufbau und Aufteilung von Gebäuden, Gebäudebereichen, Räumen etc.

Der Methodenanwender hat die Güte der Informationen zu beurteilen. Zu betrachten sind Informationen auf den Benutzungsoberflächen und solche in Unterlagen. Dabei steht „Benutzungsoberfläche“ für alle Teile der Anlage innerhalb und außerhalb der Warte, an denen das Personal Kontrollen und/oder Eingriffe vorzunehmen hat. Zu den Kontrollen gehört nicht nur das Ablesen von Informationseinrichtungen, sondern auch Sichtprüfungen zum Beispiel auf Leckagen an Komponenten vor Ort. Gesichtspunkte der Einschätzung sind:

- für Informationen auf Benutzungsoberflächen: Eindeutigkeit, Zuverlässigkeit, Genauigkeit, Übersichtlichkeit und Zugänglichkeit,
- für Unterlagen: inhaltliche Korrektheit, Vollständigkeit und Klarheit, Übersichtlichkeit sowie Orientierungshilfen, mit denen der Nutzer zuverlässig erforderliche Informationen findet,
- für erinnertes Wissen (Fachkunde): Präsenz dieses Wissens aufgrund Training und Anwendung in der Praxis. Der Problemlöser hat zum erfolgreichen Handeln das erforderliche Wissen nicht nur zu besitzen sondern situativ auch parat zu haben. Erfolgreiches Problemlösen setzt somit voraus, dass das nötige Wissen, zu dem auch die Kenntnis der Quellen nötiger Informationen zählt, rechtzeitig aktiviert wird. Entsprechend müssen in der Problemsituation Hinweise („Erinnerungshilfen“) vorhanden sein, welche den Wissensabruf ausreichend unterstützen. Als solche Hinweise zählen Informationen zum Anlagenzustand auf Benutzeroberflächen und schriftliche Anweisungen. Je klarer, zuverlässiger, zusammenhängender und aussagekräftiger diese sind sowie je leichter der Zugriff auf diese erfolgen kann, desto wirkungsvoller wird die Aktivierung des Wissens erleichtert.

Vollständigkeit, Genauigkeit und ergonomisches Design der Informationen sind zu werten. Der Anwender der Methode untersucht, inwieweit es dem Personal gelingt, das Problem trotz unvollständiger, unpräziser und/oder ergonomisch suboptimal gestalteter Informationen zu lösen. Zu berücksichtigen sind Zeitverluste durch die Suche nach benötigten Informationen, Rückgriff auf zusätzliche Informationsquellen wie zum Beispiel erfahrene Kollegen, die aus ihrer Freizeit auf die Anlage geholt werden, und/oder Abschätzungen zur Ausprägung von Prozessgrößen, für die keine genaue Information auf der Benutzungsoberfläche vorliegt, etc. Liegen solche Bedingungen vor, hat der Anwender zu beurteilen, ob der Problemlösungsprozess trotz solcher Hindernisse und Fehlerquellen systematisch weiterläuft.

Im Folgenden wird die Vorgehensweise zur Bewertung mitigativer wissensbasierter Handlungen erläutert, die sich in mehrere Stufen gliedert:

- Qualitative Analyse wissensbasierter auf Problemlöseprozessen beruhender Handlungen.

Schritt 1: Bestimmung wissensbasierter mitigativer Handlungsweisen,

Schritt 2: Beurteilung der vorgelagerten Phase,

Schritt 3: Analyse des Problemlöseversuchs,

Schritt 4: Qualitative Gesamteinschätzung der Erfolgsaussichten.

- Quantitative Bewertung der Zuverlässigkeit des Problemlöseversuchs.
- Qualitative und Quantitative Bewertung der Lösungsumsetzung.

4.3 Anwendungsbeispiel: Wiederherstellung der Möglichkeit zur Sumpfansaugung über Nachkühlpumpen

Das hier angeführte Beispiel dient der Veranschaulichung des Vorgehens zur Analyse und Bewertung wissensbasierter mitigativer Handlungen der Art „Beheben / Kompensieren eines beobachteten Defekts“. Es wird vereinfacht angenommen, dass schädliche Eingriffe im vorliegenden Szenario nicht ausgeführt werden, unabhängig davon, ob solche existieren. Entsprechend werden auch die Schritte der Bestimmung und Analyse sowie die der Bewertung des Auftretens solcher Handlungen übersprungen.

Die Bestimmung des sicherheitstechnisch vorteilhaften wissensbasierten mitigativen Handelns erfolgt in der Beschreibung eines Handlungsmodells. Anschließend folgen die Schritte der Analyse und Bewertung des Problemlösevorgangs und der Lösungs- umsetzung. Zunächst werden die Randbedingungen des gewählten Ereignisses näher beschrieben.

4.3.1 Randbedingungen der Ereignisse

Im Folgenden werden die den Beispielen 1, 2 und 3 (siehe Kapitel 4.3, 4.4 und 4.5) zu- grunde liegenden Randbedingungen und die Aufgabenstellungen für das Personal zu- sammenfassend beschrieben und in einem Handlungsablaufmodell tabellarisch darge- stellt (Tab. 4.1).

Das gewählte Szenario und die damit verbundenen Randbedingungen bauen auf den Ergebnissen des Berichts GRS-A-3839 „Untersuchungen zum anlageninternen Notfall- schutz deutscher Kernkraftwerke und Darstellung der Wirksamkeit von Optimierungs- maßnahmen“ auf /GRS 15/. Es folgt die stichpunktartige Beschreibung der Randbedin- gungen und der bewerteten Maßnahmen (siehe Kap.4.1.1 in /PRE 18/):

- Auslösendes Ereignis „kleines Leck am Primärkreis (Querschnitt 20 cm²)“, z. B. an einer Hauptkühlmittelleitung
- Kompletter Ausfall der Dampferzeugerbespeisung (Hauptspeisewasser, An- und Abfahrssystem, Notbespeisung)
- Ausfall der Notfallmaßnahme „sekundärseitige Druckentlastung und Bespeisung“ (Annahme: Diverse Vorbereitungsmaßnahmen sind nicht erfolgreich)
- Ausfall der Sumpfschaltung nach Entleerung der Flutbehälter (Annahme: Ge- meinsam verursachter Ausfall, der Sumpf/Flutumschaltarmaturen JNA 10-40 AA003; tieferliegende Ursache ist ein Ansprechen der Drehmomentschalter auf- grund systematischer Fehljustierung oder Schwergängigkeit der Armaturen)
- ND-Einspeisung aus dem Sumpf und Einspeisung über ND/HD „Tandemschaltung“ dadurch ebenfalls nicht verfügbar
- Alle anderen Komponenten der ND/HD Einspeisesysteme sind verfügbar, d. h. primärseitige Füllstandhaltung über alle 4 Flutbehälter bis zu deren Entleerung

- Eigenbedarfsversorgung und alle Komponenten des Sicherheitssystems oder auch betrieblicher Systeme (außer oben genannte) sind vollständig verfügbar
- Beginn des Kernschmelzens (ohne weitere Maßnahmen) nach ca. 7 Stunden
- Maßnahmen zum Verhindern des RDB-Versagens nach 7 Stunden 30 Minuten nicht mehr wirksam
- Eintreffen der Rufbereitschaft nach ca. 30 Minuten nach Ereigniseintritt
- Übergang in das Notfallhandbuch (Kriterium 4v4 Dampfererzeugerniveaus < 4 m) nach ca. 1 Stunde 45 Minuten mit Notfallalarmierung
- Krisenorganisation ist nach ca. 2 Stunden vollständig einsatzfähig
- Ende der HD-Sicherheitseinspeisung aus den Flutbehältern nach ca. 3 Stunden 10 Minuten
- Primärkreisdruck bleibt nach dem Ende der Einspeisung aus den Flutbehältern für mehr als 7 Stunden unterhalb 10 bar,
- Als wissensbasierte Abhilfemaßnahme vom Typ „Korrektur/Behebung eines Ausfalls“ wird die Überbrückung mindestens eines Drehmomentschalters vor Ort mit Adapter am Leittechnikschrank und Umstellen der Sumpfarmatur durch Schaltbefehl am Leittechnikschrank (wissensbasierte Korrekturmaßnahme auf der Basis „Fachkunde“, Beispiel 1) bewertet. Das Erfordernis kann frühestens mit dem Umschalten auf Sumpfeinspeisung (nach etwa 3 Stunden 10 Minuten) festgestellt werden
- Entsprechend schutzzielorientiertem BHB (Schutzziel Kernkühlung) stehen zusätzlich zu der berücksichtigten Korrekturmaßnahme die folgenden Maßnahmen zur Verfügung:
 - Einspeisung über HD-Förderpumpen des Systems KBA aus den Systemen KBC und KBB
 - Einspeisung aus dem BE-Lagerlagerbecken mit den Beckenkühlpumpen.
- Es wird hier davon ausgegangen, dass das Personal die Durchführung der Maßnahme „KBA/KBC/KBB Einspeisung“ versuchen wird (Beispiel 2). Das Einleitungskriterium „Wasserstand im RDB < MIN 3“ wird nach etwa 4 Stunden 40 Minuten erreicht, wenn bis dahin keine andere Maßnahme verfügbar ist. Die im Schutzziel

BHB angesprochenen Einspeisungen aus den Flutbehältern und dem Reaktorsicherheitsbehälter Sumpf sind im beschriebenen Szenario nicht durchführbar, weil die Behälter bereits entleert sind, und weil die Sumpfschaltung nicht funktioniert.

Die Systeme KBA/KBC/KBB werden für betriebliche Aufgaben eingesetzt. Ihr Einsatz im beschriebenen Szenario ist nicht in ausreichendem Tiefgang vorbereitet. Die technische Klärung (Wie soll es gemacht werden? Was ist zu beachten?) erfolgt im Zuge des Ereignisablaufs auf der Grundlage des Fachwissens und der technischen Dokumentation. Die Maßnahme entspricht dem Typ „Einsatz von noch vorhandenen Systemen in einer ursprünglich nicht dafür vorgesehenen Vorgehensweise“.

Im Rahmen des Vorhabens wurde auf der Grundlage der zur Referenzanlage zur Verfügung stehenden Unterlagen eine technische Klärung vorgenommen, die durch Gespräche mit fachkundigem Personal der Anlage noch verifiziert werden müsste. Unter der Annahme, dass die technische Klärung den Sachverhalt korrekt erfasst hat, sind folgende Aktionen zu einem neuen Vorgehen zusammenzufügen:

- Regeleinrichtungen sind abzuschalten und die Regelventile sind von Hand zu fahren,
 - Reaktorschutzsignale sind zu überbrücken,
 - Teilsteuerungen sind abzuschalten,
 - Das Fördermengengleichgewicht über die Systeme KBA/KBC/KAA ist einzustellen und zu halten unter der Randbedingung, dass die Pumpen des KBC Systems und des KAA Systems unterschiedliche Förderkennlinien haben,
 - Eine Reihe von Armaturen ist entsprechend zu positionieren,
- Bei Erreichen des Kriteriums „alle 4 Dampferzeuger-Füllstände sinken unter 4 Meter ab“ hat das Personal die Notfallmaßnahme „Sekundärseitige Druckentlastung und Bespeisung (SDE)“ vorzubereiten und spätestens bei z. B. „Erreichen des Kriteriums „Kühlmitteleintrittstemperatur > 310 °C“ einzuleiten. Ein zu spätes Einleiten der Dampferzeugerdruckentlastung (Beispiel 3) könnte zu einem Thermoschock mit dadurch verursachten Dampferzeuger-Heizrohrlecks führen. Auf diese Gefahr wird im Handbuch mitigativer Notfallmaßnahmen (HMN) hingewiesen (Pfad A/B1 „Wärmeabfuhr über verfügbare Dampferzeuger wiederherstellen“).

Dort wird auch darauf hingewiesen, dass die Einspeiserate begrenzt werden muss, wenn der Füllstand eines zu bespeisenden Dampferzeugers bereits länger als 20 Minuten unterhalb des Anzeigebereichs der Messung abgefallen ist. Pfad A/B1 ist zu beschreiten, wenn die Brennelement-Austrittstemperatur über 650 °C ansteigt (etwa 410 Minuten nach Störfalleintritt). Ein entsprechender Hinweis im Notfallhandbuch ist nicht vorhanden.

Die Vorbereitung der Notfallmaßnahme beginnt etwa 105 Minuten nach Störfalleintritt (vgl. Tab. 4.1) und dauert bei planmäßigem Verlauf etwa 50 Minuten (dem Notfallhandbuch der Referenzanlage entnommene Zeitangabe). Bei Abschluss der Vorbereitung ist die HD Sicherheitseinspeisung aus den Flutbehältern noch in Betrieb.

Erst nach dem Ende der HD Sicherheitseinspeisung und der Erkennung, dass eine primärseitige Nachwärmeabfuhr nicht durchgeführt werden kann, wird versucht, die Nachwärmeabfuhr über die Sekundärseite durchzuführen. Es wird angenommen, dass zu diesem Zeitpunkt (inkl. einer Phase der Konfusion etwa bei $T = 200$ Minuten) für die DE Heizrohre noch keine Thermoschockgefahr besteht.

Steht zu diesem Zeitpunkt die Maßnahme SDE noch nicht zur Verfügung, so könnte sie durch das Wartpersonal auch noch zu einem späteren Zeitpunkt, wenn dann die Vorbereitung erfolgreich abgeschlossen ist, eingeleitet werden. Mit einer erheblichen Erwärmung des Primärkühlmittels und damit einem Thermoschock ist erst nach dem Ende der Druckspeichereinspeisung zu rechnen (ab etwa 225 Minuten nach Störfalleintritt). Für das hier untersuchte Beispiel wird angenommen, dass nach etwa 280 Minuten die Temperatur soweit angestiegen ist, dass Dampferzeuger-Heizrohrbrüche auftreten können. Wie die thermohydraulischen Analysen zeigen, ist der Füllstand zu diesem Zeitpunkt bereits auf das Niveau $< \text{MIN } 3$ abgesunken.

Die Wahrscheinlichkeit, dass die Maßnahme SDE nicht zur Verfügung steht wurde in einem Forschungsvorhaben der GRS /GRS 98/ mit $P = 7 \times 10^{-2}$ ermittelt. Dieser Wert wird hier als Schätzwert für die Wahrscheinlichkeit angesetzt, dass eine Situation entsteht, in der eine Dampferzeugerdruckentlastung zu Dampferzeuger-Heizrohrlecks führt.

4.3.2 Handlungsmodell

Ausgehend von diesen Randbedingungen wurde das in Tab. 4.1 dargestellte Handlungsmodell erstellt.

Tab. 4.1 Beschreibung des Ereignisablaufs für Beispiel 1 – 3 (aus /PRE 18/)

Zeit (Min.) nach Störfall- eintritt	Handlungsablauf/Geschehen	Kommentierung
30	– Rufbereitschaft ist vor Ort	
105	<ul style="list-style-type: none"> – 4 von 4 Dampferzeugerniveaus < 4 m – Notfallorganisation wird alarmiert – Beginn der Arbeiten zur Vorbereitung der Notfallmaßnahme SDE. Der Zeitbedarf dafür wird im Notfallhandbuch der Referenzanlage auf 50 Minuten geschätzt. 	<ul style="list-style-type: none"> – Angenommene Dauer bis Notfallorganisation (Krisenstab und Fachbereiche) vollständig einsatzbereit: 2 h (Erfahrungswert aus vorlaufenden Projekten zur Beurteilung der Notfallorganisation der Referenzanlage) – Beginn der vorbereitenden Maßnahmen zur Einleitung von SDE entsprechend den Anweisungen des Notfallhandbuchs (Abschluss bei planmäßigem Verlauf bei T = 155 Min.)
190	<ul style="list-style-type: none"> – 4 von 4 Flutbehälter sind leer, Sicherheitseinspeisepumpen speisen nicht mehr in den Primärkreislauf ein – Umschalten auf Sumpfbetrieb versagt – Annahme: Sehr hoher Stress, Beginn einer Phase der Konfusion 	<ul style="list-style-type: none"> – Angenommene Dauer der Phase der Konfusion aufgrund vorliegenden Stressniveaus: 10 Min.

Zeit (Min.) nach Störfall- eintritt	Handlungsablauf/Geschehen	Kommentierung
200	<ul style="list-style-type: none"> – Phase der Konfusion ist überwunden – Wartenpersonal erkennt die Notwendigkeit, die Nachwärmeabfuhr über die Notfallmaßnahme SDE fortzusetzen, auch wenn das Einleitungskriterium dafür noch nicht vorliegt. Zu diesem Zeitpunkt sind noch keine Folgeschäden der DE-Heizrohre zu besorgen. – Ursachen des Versagens der Umschaltung auf Sumpfbetrieb werden geklärt: <ul style="list-style-type: none"> – Entsprechende Meldebilder (für jede Armatur) in der Leitwarte werden inspiziert und interpretiert – Aktivitäten zur Kontrolle der Armaturenzustände vor Ort: <ul style="list-style-type: none"> ○ Entsenden eines Maschinisten zu den Armaturen durch den Schichtleiter ○ Maschinist geht durch Kontrollbereich in den Ringraum ○ Maschinist inspiziert der Reihe nach alle 4 Armaturen (optische Prüfung) ○ Maschinist kehrt in die Warte zurück ○ Maschinist gibt Auskunft 	<ul style="list-style-type: none"> – Für den weiteren Ablauf wird angenommen, dass SDE erst verspätet eingeleitet werden kann. – Für die Aktivitäten zur Kontrolle der Armaturenzustände vor Ort werden insgesamt 45 Minuten angenommen (→ weiter mit 245). Dieser Schätzwert beruht auf groben Kenntnissen bzgl. der Örtlichkeit (waren im Rahmen des Projektes nicht überprüfbar). – Die Interpretation der Meldebilder und Auswertung der Störmeldungen in den Protokollen verläuft parallel.
225	<ul style="list-style-type: none"> – Notfallorganisation ist vollständig einsatzbereit – Ende der Druckspeichereinspeisung und Beginn einer erheblichen Zunahme der Kühlmitteltemperatur 	<ul style="list-style-type: none"> – Dies bedeutet, dass eine Einsatzbereitschaft für die parallele Durchführung verschiedener Maßnahmen gegeben ist.

Zeit (Min.) nach Störfall- eintritt	Handlungsablauf/Geschehen	Kommentierung
245	<ul style="list-style-type: none"> – Maßnahmen SDE noch nicht erfolgreich – Fakten bezüglich der Ursache des Versagens der Umschaltung auf Sumpfbetrieb liegen vor: <ul style="list-style-type: none"> ○ Ergebnisse der Prüfung der Armaturen vor Ort durch Maschinenisten zeigen keine Ausfallserscheinungen. ○ Drehmomentschutzabschaltungen aller Drehmomentarmaturen haben angesprochen. – Kognitive Prozesse des Problemlösens finden statt. Gelingen diese, liegt als Ergebnis die Problemlösung vor. – Grundlagen des Problemlösens: <ul style="list-style-type: none"> ○ Gute Kenntnisse und Arbeitsmittel zu der Interpretation des Meldebildes. ○ Gute Kenntnisse über die erforderlichen Eingriffe am Leitechtechnikschrank. ○ Gute Kenntnisse zu den Drehmomentreserven der Stellventilantriebe. ○ Kenntnisse zu möglichen Schäden bei Öffnen von schwergängigen Armaturen mit hoher Stellkraft. – Prozesse des Entscheidens zur Lösungsumsetzung finden statt. Diese beinhalten auch die Erfolgsabschätzung der anderen Maßnahmen. Es ist plausibel anzunehmen, dass Risiken eines Armaturenlecks vertretbar in Hinblick auf den möglichen Nutzen beim Erfolg der Maßnahmen eingestuft werden. 	<ul style="list-style-type: none"> – Ansprechen des Drehmomentschutzes kann in einem Fehler leittechnischer oder mechanischer Art begründet liegen. Durch die äußere Prüfung wird dem Maschinenisten nicht ersichtlich, welche Versagensart vorliegt. – Die Wahrscheinlichkeit des Erfolgs der Lösungsfindung hängt von den Erfolgsaussichten des Problemlösens sowie vom Zeitbudget für diesen Prozess ab. Dabei ist zu beachten, dass zur Verhinderung der Kernschmelze weniger Zeit (7 h) als für die des RDBs (7 h 30 min.) verbleibt. – Es gilt die Gefahr sowie Folgen eines möglichen Armaturenversagens auf der einen Seite und den möglichen Nutzen bei Erfolg der Maßnahmen auf der anderen Seite einzuschätzen und beides gegeneinander abzuwägen. Hierbei gilt es zu berücksichtigen, dass <ul style="list-style-type: none"> ○ alternativ laufende Maßnahmen bisher erfolglos waren und in naher Zukunft als wenig erfolgsversprechend eingestuft werden dürften. ○ der Erfolg der Maßnahme mit einem hohen Nutzen verbunden wird.

Zeit (Min.) nach Störfall- eintritt	Handlungsablauf/Geschehen	Kommentierung
		<ul style="list-style-type: none"> ○ die Möglichkeit eines Armaturenlecks durch Beobachtung des Armaturenverhaltens vor Ort und vorsichtiges Öffnen am Armaturenschrank größtmöglich gemindert wird. ○ Die benötigte Zeit für das Finden der Problemlösung und den Entscheidungsprozess zur Durchführung der Maßnahme wird im Weiteren mit x Minuten bezeichnet.
245 + x	<ul style="list-style-type: none"> – Aktivitäten zur Umsetzung der gefundenen Problemlösung <ul style="list-style-type: none"> ○ Entsendung eines Maschinisten zu einer Armatur sowie eines Elektrikers zum zugehörigen Leittechnikschrank (durch den Schichtleiter). ○ Maschinist geht durch den Kontrollbereich zu dieser Armatur. ○ Elektriker geht zur zugehörigen Leittechnikeinrichtung. ○ Elektriker überbrückt den Drehmomentschutz und gibt vorsichtig Stellbefehl ○ Maschinist beobachtet die Folgen der Überbrückung und des Befehls. Dies ermöglicht das Abbrechen, wenn etwas nicht optimal verläuft. 	<ul style="list-style-type: none"> – Für die Dauer der Aktivitäten zur Umsetzung der gefundenen Problemlösung wird insgesamt 30 Minuten angenommen (→ weiter mit 275 + x Minuten). (Dauer der Aktivitäten kann gegebenenfalls in fortführenden Projektarbeiten Gegenstand von Variation sein).
275 + x	Problemlösung wurde umgesetzt.	

Zeit (Min.) nach Störfall- eintritt	Handlungsablauf/Geschehen	Kommentierung
280	<ul style="list-style-type: none"> – Falls mindestens eine Sumpfarmatur bis dahin nicht umgestellt werden konnte, ist der Füllstand im Reaktordruckbehälter unter das Niveau Min 3 abgefallen. Entsprechend dem Schutzziel-BHB sind weitere Maßnahmen zu ergreifen. – Falls erst jetzt die Vorbereitung der Notfallmaßnahme SDE abgeschlossen ist und die Maßnahme ohne Drosselung der Einspeisemenge eingeleitet wird, wird angenommen, dass es zu Folgebrüchen von Dampferzeuger-Heizrohren kommt. 	<ul style="list-style-type: none"> – Der Hinweis zur gedrosselten Dampferzeuger-Bespeisung befindet sich im Handbuch mitigativer Notfallmaßnahmen an einer Stelle, die zu diesem Zeitpunkt noch nicht zu bearbeiten ist. – Lt. Schutzziel-BHB ist die Maßnahme „Einspeisen aus der Kühlmittellagerung KBB über die Systeme KBC und KAB“ vorzubereiten und einzuleiten. – Die erforderlichen Schalthandlungen und Eingriffe in die automatischen Steuerungen sind situativ im Rahmen einer technischen Klärung zu ermitteln. Die Aufgabe wird durch die zuständige Fachabteilung der Krisenorganisation unterstützt. Neben der Fachkunde müssen auch Erkenntnisse aus den vorhandenen Unterlagen (Systemschaltpläne, Systembeschreibungen, die entsprechenden Abschnitte des Betriebshandbuchs und die Funktionspläne der Steuerungen) verwendet werden. – Der Zeitbedarf zur Durchführung der technischen Klärung wird auf 60 Minuten und der für die Schalthandlungen auf 10 Minuten geschätzt. Diese Schätzung beruht auf den Erfahrungen, die mit der in diesem Vorhaben versuchten technischen Klärung gemacht wurden. Sie müsste im Rahmen einer Anlagenbegehung und Gesprächen mit Fachpersonal verifiziert werden.

Zeit (Min.) nach Störfall- eintritt	Handlungsablauf/Geschehen	Kommentierung
350	Bei anhaltender Erfolglosigkeit der Korrekturmaßnahme „Sumpfarmaturen“ könnte nun mit der Maßnahme „Einspeisen aus der Kühlmittellagerung KBB“ begonnen werden.	Entsprechend den in GRS-A-3839 dokumentierten Analysen kann mit dem in KBB vorhandenen Kühlmittelvorräten das Kernschmelzen um etwa 6 Stunden hinausgezögert werden (T = 7 Std ohne KBB + 6 Std mit KBB).
420	Kernschmelzprozess beginnt, wenn bis dahin keine Maßnahme erfolgreich war.	Ab diesem Zeitpunkt kann nur noch das Versagen des RDB verhindert werden

4.3.3 Analyse und Bewertung

4.3.3.1 Vorgelagerte Phase des Problemlösevorgangs

Im vorliegenden Ereignis ist anzunehmen, dass die folgenden für die Beurteilung des Stressniveaus relevanten Punkte erfüllt sind:

- Für die Situation bestehen keine Vorkehrungen in Sinne vorab geplanter und ein-trainierter Vorgehensweisen,
- die Fachkompetenz des Personals ist über die Grenzen der Routine hinaus gefor-dert,
- es besteht Unsicherheit über den Erfolg des Handelns,
- das Personal trägt eine hohe Verantwortung für die Sicherheit von Mensch, Um-welt und/oder Anlage.

Das Stressniveau ist als „hoch“ einzustufen. Aufgrund der ungünstigen Randbedingun-gen des Ereignisses und des vorliegenden hohen Stressniveaus, wird davon ausge-gangen, dass die Handelnden zunächst in einer Situation sind, in der sie starke negati-ve Emotionen zu bewältigen haben. Dies gilt sowohl für die Situation nach Ende der Sicherheitseinspeisung aus den Flutbehältern und dem Versagen der Umschaltung auf Sumpfansaugung als auch für die Situation nach Absinken des RDB Füllstands unter das Niveau < MIN 3. Es sprechen jedoch genug Aspekte dafür, dass diese Phase nach einer gewissen Zeit bewältigt wird (ausreichend verfügbares Personal, Unterstützung durch Notfallorganisation, Zeitbudget im Bereich mehrerer Stunden,...). Daher wird an-genommen, dass das Personal die Phase der Konfusion überwinden wird, aber dass dies das verfügbare Zeitbudget für wissensbasiertes Handeln verringert. Dies gilt für beide in der Folge zu bewertenden mitigativen Maßnahmen.

4.3.3.2 Beurteilen der Erfolgsaussichten des Problemlösens

Die Einstufung beruht auf der Einschätzung des „Fachwissens der Problemlöser“, der „Güte verfügbarer Informationen für das Problemlösen“ und der „Systematik des Prob-lemlösens“. Nachfolgend werden diese Punkte der Reihe nach behandelt:

Das relevante Fachwissen beinhaltet das Wissen um

- die Stellkraftreserven der Motor-Armaturen für die Sumpfschaltung,
- die nötigen Maßnahmen zur Überbrücken eines Motorschutzes (Eingriffe zur Umsetzung des Ersatzstellbefehls direkt am Leittechnikschrank zur Kompensation leittechnischer Probleme),
- Schwergängigkeit der Motoren bei Vorliegen eines mechanischen Defekts,
- die Möglichkeit zum Umstellen der Armatur bei Schwergängigkeit eines Motors durch Nutzung der Stellkraftreserve des Motors,
- die Möglichkeit, dass bei mechanischem Defekt durch Fahren einer Armatur Schäden an dieser auftreten können,
- Vorgehen zur Minimierung von Gefahren, die aufgrund von Schäden an den Armaturen resultieren können (Beordern eines Maschinisten an die Armatur zur Beobachtung und Reaktion bei Anzeichen eines Lecks).

Diese Wissensinhalte werden als gut im Fachwissen des relevanten Personals (Maschinisten / Elektriker) verankert eingestuft: Das Wissen um die nötigen Überbrückungsmaßnahmen der Armatur ist zum gängigen Fachwissen der Elektriker, das Wissen um die Stellkraftreserven der Motoren sowie solches, welches mit der Schwergängigkeit der Armaturen verbunden ist, ist zum Fachwissen der Maschinisten zu rechnen. Diese Wissensinhalte werden regelmäßig im Kontext von Übungen oder anderen Situationen abgerufen (evtl. auf Regelmäßigkeit von Trainings und Inhalte von Übungen hinweisen?). So besteht die Anforderung lediglich darin, dieses Wissen zu aktivieren und auf den gegebenen Sachverhalt zu übertragen.

Informationen zum Zustand der Anlage, der relevanten Systeme und Komponenten, als auch über deren Aufbau und Zusammenhänge werden als verfügbar eingestuft. Anhand der gegebenen Meldebilder ist das Störungsbild (Versagens des Umschaltens auf Sumpfbetrieb aufgrund systematischer Drehmomentschutzschalterabschaltung) eindeutig und zuverlässig zu bestimmen.

Hinsichtlich der Systematik des Problemlösens ist folgendes festzustellen:

- Die Primärursache (systematische Drehmomentschutzschalterabschaltung) ist auf Basis der gegebenen Rechnermeldungen und verfügbarer Betriebsmittel gut diagnostizierbar. Die tiefergehende Ursache für die systematische Drehmomentschutzabschaltung ist zwar unter den gegebenen Rahmenbedingungen vom Personal nicht sicher feststellbar, aber es ist anzunehmen, dass beide Möglichkeiten (mechanisch / elektrisch) für das Auftreten dieser Störung erkannt und bedacht werden. Daher dürften, wenn die Lösung (Drehmomentüberbrückung) gefunden werden sollte, auch deren mögliche negative Folgen bei Vorliegen eines mechanischen Defekts in Betracht gezogen werden. Insgesamt wird angenommen, dass die Ursachensuche vom Personal erschöpfend vorangetrieben wird (soweit es die Randbedingungen erlauben).
- Das Ziel (Wiederherstellung der Sumpfumschaltung) ist hochwertig und wird erwartungsgemäß vom Personal auch so wahrgenommen: Der Erfolg des wissensbasierten Eingriffs geht mit großem Nutzen einher (Verhindern Kernschmelze bzw. des Reaktordruckbehälterversagens), wohingegen alternative Vorgehensweisen unter den gegebenen Randbedingungen erfolglos verbleiben. Daher kann angenommen werden, dass die Verfolgung des Zieles die sicherheitstechnisch richtige Priorität erhält. Ferner wird erwartet, dass eine systematische Zerlegung des Ziels in Teilziele erfolgt und die Lösungsumsetzung zielorientiert vorangetrieben wird, da die erforderlichen Einzelhandlungen dem Personal gut bekannt sind.

Gesamtbeurteilung der Erfolgsaussichten des Problemlösungsprozesses

Die hier gewonnen Erkenntnisse wurden zu folgender Gesamtbeurteilung verknüpft (siehe /PRE 18/):

Ergebnis der Analyse:

Alle drei der folgenden Aussagen treffen zu. Negative Einflüsse der vorgelagerten Phase sind zu berücksichtigen.

- Fachwissen ausreichend
- Erforderliche Informationen (auf Benutzungsoberflächen und in Unterlagen) verfügbar
- Problemlösungsprozess systematisch ohne schwerwiegende Fehlermöglichkeiten durchführbar

Erfolgsaussichten: gut

4.3.3.3 Quantitative Bewertung des Problemlösens

Die Zuverlässigkeit der kognitiven Prozesse des Problemlösens sind abhängig von den gegebenen Erfolgsaussichten und den dafür verfügbaren Zeitbudget zu bewerten. Die Erfolgsaussichten wurden als „gut“ eingeschätzt und die maximal zur Verfügung stehende Zeitspanne wird nachfolgend bestimmt.

Das für die gesamte wissensbasierte Aufgabe (Problemlösung und deren Umsetzung) verfügbare Zeitbudget wird im gegebenen Szenario wie folgt ermittelt:

- Die Umsetzung des wissensbasierten Handelns kann frühestens nach 245 Minuten erfolgen (siehe Handlungsmodell, Tab. 4.1). Entsprechend verbleiben für die Verhinderung der Kernschmelze (nach ca. 420 Minuten) noch ca. 175 Minuten. Zur Verhinderung des RDB-Versagens (nach ca. 450 Minuten) noch ca. 205 Minuten.
- Der Zeitaufwand für die Ausführung der gefundenen Problemlösung wird bei der Analyse und Bewertung der wissensbasierten Handlungsweise mit 30 Minuten geschätzt.
- Die Differenzen der Werte ergeben als maximale für das Problemlösen verfügbare Zeit
 - 145 Minuten für die Verhinderung einer Kernschmelze
 - 175 Minuten für die Verhinderung des RDB-Versagens

Bei guten Erfolgsaussichten kann der Schätzwert für die Fehlerwahrscheinlichkeit der kognitiven Problemlöseprozesse bestimmt werden. Die Problemlöseprozesse zur Verhinderung der Kernschmelze (145 Minuten) scheitern mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. $9,4 \times 10^{-3}$, die zur Verhinderung des RDB-Versagens (175 Minuten) mit einer Wahrscheinlichkeit von $9,1 \times 10^{-3}$ /PRE 18/.

Bewertung der Handlungsausführung, Gesamtergebnis

Die Eingriffe zur Umsetzung der gefundenen Problemlösung setzen sich aus hochgeübten Handlungen zusammen. Die Wahrscheinlichkeit für Fehler bei Lösungsumsetzung kann in Anlehnung an die Vorgehensweisen der Methoden THERP /SWA 83/ oder ASEP /SWA 87/ erfolgen, die beide im Methodenband zur Durchführung einer PSA empfohlen werden /FAK 16/. Im Rahmen des Vorhabens war es nicht möglich die für eine Anwendung der genaueren Methode THERP erforderliche Begehung der An-

lage und der Handlungsorte durchzuführen. Hier wird daher die Methode ASEP angewendet die aus einer Vereinfachung der Methode THERP hervorging. Der durch die Vereinfachung bedingte Verlust an Genauigkeit wird bei dieser Methode durch pessimistische Basisdaten und Basisannahmen kompensiert, so dass die mit ASEP ermittelten Ergebnisse obere Abschätzungen für die Wahrscheinlichkeit von Fehlhandlungen darstellen.

Mit ASEP ergibt sich die Wahrscheinlichkeit dafür, dass Fehler bei der Handlungsausführung auftreten zu $P = 1 \times 10^{-2}$ und damit als Gesamtergebnis für Beispiel 1 „Wiederherstellung der Möglichkeit zur Sicherheitsbehälter-Sumpfansaugung über die Nachkühlpumpen“ von $1,9 \times 10^{-2}$. Das Endergebnis gilt für beide Anforderungen (Maßnahme vor Kernschmelzen und Maßnahme vor RDB Versagen), da die Wahrscheinlichkeit einer nicht erfolgreichen Problemlösung bei größeren zur Verfügung stehenden Zeitbudgets kaum noch abnimmt, siehe Abb. 3.6 in /PRE 18/. Hierbei wird angenommen, dass bei grundsätzlichen (wenn auch wenig wahrscheinlichen) Problemen höhere Zeitbudgets kaum noch einen positiven Einfluss auf die Problemlösung haben.

4.3.4 Einfügen des Anwendungsbeispiels in den Ereignisbaum

Das Einfügen des Beispiels in die Baumstruktur wurde direkt nach Beginn der Phase „mögliche Bespeisung des RDB zwischen KSZ und KU (Kernumlagerung)“ vorgenommen.

Zunächst wird das Vorliegen der Randbedingungen zur Verfügbarmachung der Sumpfansaugung abgefragt: Vorliegen eines Kernschadens, Verfügbarkeit elektrischer Leistung und Sumpfansaugung als Ursache für Bespeisungsversagen.

Nun werden einzelne Schritte der Handlung abgefragt (ausführliche Darstellung in /PRE 18/):

- Ist eine schädliche Handlung möglich? Nur bei Vorliegen der Randbedingungen grundsätzlich möglich.
- Kurzfristige Stresshöhe bezüglich schädlicher Handlungen: Das Ansprechen des Drehmomentschutzes geschieht unerwartet ohne vorherige Anzeichen und es ist dem Personal bewusst, dass dies sehr gravierend ist. Daher ist der Stressfaktor zunächst hoch.

- Schädlicher Eingriff in der Konfusionsphase: Randbedingungen für die Maßnahme bestehen und es liegt ein hoher Stress vor, eine Konfusionsphase findet statt. Ein schädlicher Eingriff mit Beschädigung der Ventilgehäuse ist jedoch nicht schnell und ohne Vorbereitung durchführbar. Deshalb wird in der Phase der Konfusion keine schädliche Handlung unterstellt.
- Gibt es eine wissensbasierte Handlung für die Wiederherstellung der Sumpfschaltung: dies ist gegeben.
- Stresshöhe bezüglich mitigativer Handlungen: Wenn der Stress in der Anfangsphase hoch war, dann wird mit 50 % Wahrscheinlichkeit angenommen, dass er von „hoch“ zu „erhöht“ abnimmt. Wenn der Stress bereits in der Anfangsphase nur erhöht war, dann bleibt er das auch und steigt nicht.
- Überwindung der Konfusionsphase: Wenn der Stress hoch ist, dann wird die Phase der Konfusion mit 50 % Wahrscheinlichkeit überwunden. Ist der Stress nicht hoch, wird die Phase der Konfusion zu 100 % überwunden.
- Erfolgsaussichten des Problemlösens (gut/mäßig/keine): die Erfolgsaussichten des Problemlösens für diese Maßnahme sind gut.
- Findet Übergang zu mitigativem Handeln statt?
 - für NFM untersuchte Randbedingungen liegen vor. Die Problemlöseprozesse zur Verhinderung des RDB-Versagens (maximale für das Problemlösen verfügbare Zeit: 175 Minuten) scheitern demnach mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. $9,1 \times 10^{-3}$.
 - Für NFM untersuchte Randbedingungen liegen nicht vor: Variation der Wahrscheinlichkeit für Versagen der Problemlösung mit Gleichverteilung um den Mittelwert $9,1 \times 10^{-3}$.
- Quantifizierung der NFM SU1 zur Wiederherstellung Sumpfschaltung, um RDB-Versagen zu verhindern. Hier gibt es drei Zweige: „(Nicht-)Gelingen der Maßnahme zwischen KSZ und KU“ und „Nicht-Gelingen mit dabei verursachtem Schaden“. Fehler bei der Handlungsausführung werden auf 1 % geschätzt. Hier wird die zusätzliche Annahme getroffen, dass in der Hälfte der Fälle der Fehler zu einem Schaden führt (0,5 %). Unter den Randbedingungen des Szenarios erfolgt daher zu 99 % ein Gelingen der Maßnahme, zu 0,5 % ein Scheitern und zu 0,5 % ein Scheitern mit verursachtem Schaden.
- Schädliche Auswirkung: Besteht ein Bypass zum Ringraum vor KU? Dies ist nur positiv zu beantworten, falls ein Fehler mit Schaden bei der Durchführung gemacht wurde.

- Gelingt die Wiederherstellung der Sumpfumschaltung zwischen KSZ und KU? Dies ist positiv zu beantworten in 99 % der Fälle (siehe Quantifizierung der Sumpfumschaltung /PRE 18/).

In die im Ereignisbaum vorhandene Frage „Verfügbarkeit primärseitige Einspeisesysteme vor Kernumlagerung“ wird der Fall hinzugefügt, dass das ND-Einspeisesystem zunächst wegen Ausfall der Sumpfumschaltung nicht verfügbar war und infolge Reparatur verfügbar geworden ist. Somit ist die Wirkung der eingeführten Maßnahme vollständig in die Logik des Ereignisbaumes eingefügt.

Eine zweite, bisher nicht definierte NFM zur Herstellung der Sumpfumschaltung wurde zusätzlich als Platzhalter in den Ereignisbaum eingefügt.

4.4 Anwendungsbeispiel: Einspeisung mittels Volumenregelsystem

Dieses Beispiel dient der Veranschaulichung des Vorgehens zur Analyse und Bewertung wissensbasierter mitigativer Handlungen der Art „Einsatz von noch vorhandenen Systemen in einer ursprünglich nicht dafür vorgesehenen Vorgehensweise“.

Die Bestimmung des sicherheitstechnisch vorteilhaften wissensbasierten mitigativen Handelns erfolgt in der Beschreibung eines Handlungsmodells (gemeinsame für alle Beispiele, siehe Tab. 4.1). Anschließend folgen die Schritte der Analyse und Bewertung des Problemlösevorgangs und der Lösungsumsetzung. Zunächst werden die Randbedingungen des gewählten Ereignisses näher beschrieben.

4.4.1 Randbedingungen des Ereignisses

Es gelten die in Kapitel 4.3.1 beschriebenen Randbedingungen.

4.4.2 Handlungsmodell

Der Ereignisablauf dieses Beispiels ist in auch in Tab. 4.1 enthalten.

4.4.3 Analyse und Bewertung

Die vorgelagerte Phase des Problemlösevorgangs ist gemeinsam für Anwendungsbeispiel 1 und 2 (siehe Kap. 4.3 und 4.4) in Abschnitt 4.3.3.1 beschrieben.

4.4.3.1 Beurteilen der Erfolgsaussichten des Problemlösens

Die im Rahmen des Vorhabens durchgeführte technische Klärung der Maßnahme „Einspeisung von Kühlmittel aus der Kühlmittellagerung über das Chemikalien-Einspeisesystem und das Volumenregelsystem“ (vgl. Abschnitt 4.3.1 und 4.3.2) zeigt, dass sich der Problemlöseprozess hier deutlich komplexer und damit schwieriger darstellt als im Beispiel mit der Reparatur der Sumpfschaltung. So sind folgende Aktionen zu einem neuen Vorgehen zusammenzufügen:

- Regeleinrichtungen sind abzuschalten und die Regelventile sind von Hand zu fahren,
- Reaktorschutzsignale sind zu überbrücken,
- Teilsteuerungen sind abzuschalten,
- Das Fördermengengleichgewicht über die Systeme KBA/KBC/KAA ist einzustellen und zu halten unter der Randbedingung, dass die Pumpen des KBC Systems und des KAA Systems unterschiedliche Förderkennlinien haben,
- Eine Reihe von Armaturen ist entsprechend zu positionieren.

Nach der Identifizierung der benötigten Komponenten, der Bewertung der sie steuernden automatischen Einrichtungen und Umsetzung der erforderlichen Eingriffe in die Leittechnik sind die Einspeisewege von den Behältern der Kühlmittellagerung über das Chemikalien-Einspeisesystem und das Volumenregelsystem in den Reaktorkühlkreislauf zu öffnen. Hierzu sind eine Reihe von Armaturen zu kontrollieren und in die erforderliche Stellung zu fahren. Die Einspeisung beginnt mit dem Start der beiden Rückspeisepumpen des Chemikalien-Einspeisesystems und dem Start von zwei der drei Pumpen des Volumenregelsystems. Während des Einspeisevorgangs ist das Niveau im Volumenausgleichsbehälter zu beachten. Fällt es zu stark ab, so kommt es zur Schutzabschaltung der Pumpen des Volumenregelsystems. Das für einen stabilen Einspeisevorgang erforderliche Fördermengengleichgewicht über die Systeme KBA/KBC/KAA kann durch eine entsprechende Positionierung der Regelventile des Chemikalien-Einspeisesystems und der Druckschieber der Pumpen des Volumenregelsystems erreicht werden. Als Regelgröße kann die Niveauanzeige des Volumenausgleichsbehälters herangezogen werden.

Ist einer der 5 verfügbaren Behälter der Kühlmittellagerung entleert, so muss auf den nächsten Behälter umgeschaltet werden. Entsprechend den in /GRS 15/ durchgeführten Untersuchungen kann durch diese Maßnahme ein Kernschmelzen oder ein Versagen des Reaktordruckbehälters um etwa 6 Stunden hinausgezögert werden.

Einige der für die Problemlösung erforderlichen Informationen werden in den Unterlagen nicht oder nur schwer zugänglich bereitgestellt. Diese Defizite müssen über das Fachwissen kompensiert werden. Zur Einschätzung des Fachwissens und des Vorgehens der Fachleute bei der Problemlösung sind Gespräche mit dem Personal in der Anlage erforderlich, die im Rahmen des Vorhabens nicht durchgeführt werden konnten. Für die weitere Bewertung wird angenommen, dass die Recherchen vor Ort zu einem überwiegenden, wenn auch nicht vollständigen, positiven Ergebnis führten, d. h.

- Das Fachwissen ist ausreichend,
- die erforderlichen Informationen (auf Benutzungsoberflächen und in Unterlagen) sind teilweise nicht verfügbar,
- die Anlagenbegehung zeigte, dass trotz der Informationsdefizite das erforderliche Wissen prinzipiell erarbeitet werden kann, der Vorgang aber auch fehleranfälliger ist.
- Der Problemlösungsprozess ist systematisch durchführbar.

Mit diesen Randbedingungen sind die Erfolgsaussichten des Problemlöseprozesses als insgesamt mäßig einzuschätzen (vgl. Tab. 3.4 in /PRE 18/).

4.4.3.2 Quantitative Bewertung des Problemlösens, der Handlungsausführung und der gesamten Maßnahme

In der Kategorie „mäßige Erfolgsaussichten“ empfiehlt ein in Abschnitt 3.2.3 des GRS Berichts „Ergänzende Untersuchungen zu mitigativen menschlichen Handlungen im Bereich schwerer Unfallabläufe“ /PRE 18/ dargestellter Quantifizierungsansatz eine Fehlerwahrscheinlichkeit von $P = 0,5$. Diese Einschätzung ist unabhängig von dem für die Problemlösung zur Verfügung stehende Zeitbudgets, sofern dafür wie hier mindestens 20 Minuten ab dem Erkennen der Erfordernis der Maßnahme zur Verfügung stehen.

Die Eingriffe zur Umsetzung der gefundenen Problemlösung setzen sich nur teilweise aus hochgeübten Handlungen zusammen. Einige Teilhandlungen („Regelventile von Hand fahren“, „Fördermengengleichgewicht einstellen“) haben eine dynamische Eigenschaft, die schwieriger auszuführen ist und prozessgrößenabhängige Stellvorgänge und Korrekturen verlangen. Wie bereits bei Beispiel 1 wird die Fehlerwahrscheinlichkeit für die Ausführung der Handlungen mit der Methode ASEP zu $P = 6,5 \times 10^{-2}$ ermittelt. Für das Beispiel 2 „Einspeisung von Kühlmittel aus der Kühlmittellagerung über das Chemikalien-Einspeisesystem und das Volumenregelsystem“ ergibt sich eine Fehlerhandlungswahrscheinlichkeit von $P = 0,5325$. Hierzu trägt die Einschätzung zur Verfügbarkeit der für den Problemlösungsprozess erforderlichen Informationen dominierend bei.

4.4.4 Einfügen des Anwendungsbeispiels in den Ereignisbaum

Das Anwendungsbeispiel wurde direkt nach dem in Kapitel 4.3 beschriebenen Anwendungsbeispiel (Reparatur der Sumpfschaltung) in die Struktur des Ereignisbaumes eingefügt.

Zu Beginn wird die grundsätzliche Verfügbarkeit des Volumenregelsystem (KBA) abgefragt. Diese ist gegeben, solange das Wechselstromnetz verfügbar ist. Weitere Fälle für die grundsätzliche Nicht-Verfügbarkeit des KBA wurden nicht betrachtet. Prinzipiell kämen neben unabhängigen Ausfällen einzelner Komponenten z. B. auch abhängige Ausfälle bei einer übergreifenden Einwirkung von außen in Betracht.

Im nächsten Schritt werden die generellen Randbedingungen für die Notfallmaßnahme Einspeisung mittels KBA abgefragt. Diese sind wie im vorherigen Beispiel: Kernschaden liegt vor, Verfügbarkeit der elektrischen Leistung und Sumpfschaltung als Ursache für das Bespeisungsversagen. Des Weiteren wird angenommen, dass die Maßnahme „Wiederherstellung Sumpfansaugung“ über Nachkühlpumpen (Beispiel 1) nicht erfolgreich durchgeführt werden konnte.

In der dritten Verzweigung wird die Notfallmaßnahme Inbetriebnahme der KBA behandelt. Gemäß der in Kapitel 4.4.1 eingeführten speziellen Randbedingungen bei der Bewertung der Erfolgswahrscheinlichkeit wird hier zunächst der Fall mit dem auslösenden Ereignis „KMV25K Kühlmittelverlust 2-25cm²“ ohne SB-Bypass sowie mit Nicht-Verfügbarkeit der sekundärseitigen Wärmeabfuhr über DE (Ausfall der Dampferzeugerbespeisung) betrachtet. Die Wahrscheinlichkeiten der erfolgreichen Inbetriebnahme

wurden unter diesen Randbedingungen mit 0,53 (d. h. 53 %) für Fehlhandlung bzw. 0,47 (d. h. 47 %) für erfolgreiche Handlung beziffert (s. Kapitel 4.4.3.2). Für alle anderen Fälle ist die quantitative Abschätzung im vorigen Kapitel 4.4.3.2 genau genommen nicht anwendbar. Deshalb wurde ergänzend für alle anderen Fälle als erste Abschätzung eine Gleichverteilung von 0,4 bis 0,6 um den Mittelwert 0,53 für eine Fehlhandlung angenommen - die jeweilige Differenz zu 100 % ergibt entsprechend die Wahrscheinlichkeit für den Zweig der erfolgreichen Handlungsausführung.

Die Ergebnisse der Ereignisbaumanalyse für dieses Anwendungsbeispiel zeigen, dass in 99,5 % der im Ereignisbaum betrachteten Fälle die generellen und speziellen Randbedingungen nicht erfüllt sind. Im Fall, dass die NFM KBA durchgeführt werden soll, ergibt sich $2,7 \times 10^{-1} \%$ für das Fehlschlagen der Maßnahme und $2,3 \times 10^{-1} \%$ für die erfolgreiche Inbetriebnahme. Zudem stellt sich heraus, dass es neben den speziellen Bedingungen, für die im vorigen Kapitel 4.4.3.2 Zahlenwerte ermittelt wurden, keine weiteren Fälle gibt, in denen die NFM KBA notwendig wird.

4.5 Anwendungsbeispiel verspätete sekundärseitige Druckentlastung

Dieses Beispiel dient der Veranschaulichung des Vorgehens zur Analyse und Bewertung wissensbasierter mitigativer Handlungen der Art „Durchführen einer Maßnahme mit schädlicher Wirkung im Zuge des auslegungsüberschreitenden Ereignisablaufs“. Die Bestimmung des sicherheitstechnisch vorteilhaften wissensbasierten mitigativen Handelns erfolgt in der Beschreibung eines Handlungsmodells. Anschließend folgen die Schritte der Analyse und Bewertung des Problemlösevorgangs und der Lösungsumsetzung. Zunächst werden die Randbedingungen des gewählten Ereignisses näher beschrieben.

4.5.1 Randbedingungen des Ereignisses

Es gelten die in Kapitel 4.3.1 beschriebenen Randbedingungen.

4.5.2 Handlungsmodell

Ausgehend von diesen Randbedingungen wurde das in Tab. 4.1 dargestellte Handlungsmodell erstellt, das alle Anwendungsbeispiele gemeinsam umfasst.

4.5.3 Analyse und Bewertung

Bei Erreichen des Kriteriums „alle 4 Dampferzeuger-Füllstände sinken unter 4 Meter ab“ hat das Personal die Notfallmaßnahme „Sekundärseitige Druckentlastung und Bespeisung (SDE)“ vorzubereiten (etwa 105 Minuten nach Störfalleintritt, Dauer bei planmäßigem Verlauf etwa 50 Minuten).

Die Möglichkeit eines schädlichen Eingriffs im Zusammenhang mit der Einleitung der Maßnahme SDE folgt aus der Analyse des mitigativen Notfallhandbuchs (HMN). Dort wird im Pfad A/B1 „Wärmeabfuhr über verfügbare Dampferzeuger wiederherstellen“ darauf hingewiesen, dass die Speisewasser-Einspeisemenge begrenzt werden muss, wenn der Füllstand eines zu bespeisenden Dampferzeugers bereits länger als 20 Minuten unterhalb des Anzeigebereichs der Messung abgefallen ist. Andernfalls könnte es zu einem Thermoschock mit dadurch verursachten Dampferzeuger-Heizrohrlecks kommen (Eingriff mit schädlicher Wirkung).

Pfad A/B1 ist erst zu beschreiten, wenn die Brennelement-Austrittstemperatur über 650 °C ansteigt (etwa 410 Minuten nach Störfalleintritt). Ein entsprechender Hinweis im Notfallhandbuch ist nicht vorhanden.

Es wird hier davon ausgegangen, dass bis zum Abfall des Niveaus im Reaktordruckbehälter auf das Niveau MIN 3 (etwa 280 Minuten nach Störfalleintritt) noch keines der drei im Notfallhandbuch genannten Kriterien für die Einleitung der Dampferzeugerdruckentlastung („mehrfaches Ansprechen des Druckhalter-Abblaseventils“ oder „Kühlmitteleintrittstemperatur > 350 °C“ oder „Druckhalter-Füllstand > 9,5 Meter“) ansteht. Zu diesem Zeitpunkt sind die Dampferzeuger schon deutlich länger als 20 Minuten leer. Es wird weiter davon ausgegangen, dass es zu Heizrohrfolgebrüchen kommt, wenn zu diesem Zeitpunkt eine Dampferzeuger-Druckentlastung ohne Drosselung der Einspeisemenge durchgeführt wird.

Im Folgenden wird untersucht, mit welcher Wahrscheinlichkeit die Maßnahme SDE zu einem späten Zeitpunkt (Referenzzeitpunkt des Beispiels 3: 280 Minuten nach Störfalleintritt, d. h. nach Absinken des RDB Niveaus unter MIN 3) eingeleitet wird, obwohl die NHB Einleitungskriterien nicht vorliegen und auch noch nicht nach dem Handbuch mitigativer Notfallmaßnahmen vorzugehen ist. Dies setzt voraus, dass eine SDE nicht zu einem früheren Zeitpunkt bereits eingeleitet werden kann. Dies könnte nach dem Ende der HD-Sicherheitseinspeisung und dem Erkennen, dass eine primärseitige Nachwärmeabfuhr nicht durchgeführt werden kann, versucht werden, um die Nachwärmeabfuhr über die Sekundärseite abzuführen. Es wird angenommen, dass zu diesem Zeitpunkt

(inkl. einer Phase der Konfusion etwa 200 Minuten nach Störfalleintritt) für die DE-Heizrohre noch keine Thermoschockgefahr besteht.

Die Wahrscheinlichkeit, dass die Maßnahme SDE nicht zur Verfügung steht, wurde in einem Forschungsvorhaben der GRS /GRS 98/ mit $P = 7 \times 10^{-2}$ ermittelt. Dieser Wert wird hier als Schätzwert für die Wahrscheinlichkeit angesetzt, dass die SDE-Vorbereitungsmaßnahmen erst mit erheblicher Verzögerung abgeschlossen werden konnten.

Entsprechend dem in Abschnitt 3.1.2 /PRE 18/ beschriebenen Vorgehen ist festzuhalten, dass die Maßnahme im Kontext des Szenarios unter bestimmten Randbedingungen vorgesehen und nach Abschluss der Vorbereitung auch jederzeit durchführbar ist. Tab. 4.1 gibt die wesentlichen Eckpunkte des Prozess- und Handlungsablaufes wieder. Die Randbedingungen, unter denen die Druckentlastung ausgeführt wird, sind oben dargestellt (Kriterien und Gefahrenhinweis in NHB und HMN).

Zum Zeitpunkt der Auslösung des Grenzwertes „Füllstand im RDB < MIN 3“ steht das Personal vor der Situation, dass die primärseitige Kühlmittelergänzung und Nachwärmeabfuhr nicht zur Verfügung steht und auch der Erfolg anderer Maßnahmen noch ungewiss ist. Das Auslösen des Grenzwertes ist ein Hinweis darauf, dass mit einem Niveauabfall des Kühlmittelfüllstands unter die Kernoberkante und einem Anstieg der Hüllrohrtemperaturen zu rechnen ist. Die Dynamik dieses Vorgangs ist dem Personal nicht bekannt.

Die Wiederherstellung der sekundärseitigen Wärmeabfuhr ist demzufolge ein hochwertiges Ziel, das zu diesem Zeitpunkt auch realisiert werden kann (Schätzwert der Wahrscheinlichkeit, dass die Vorbereitung von SDE erst verzögert abgeschlossen werden: $P = 7 \times 10^{-2}$). Die Kriterien zur Druckentlastung entsprechend NHB stehen nicht an und auch der Übergang ins HMN ist erst mit Beginn der Kernaufheizung erforderlich. Damit ist anzunehmen, dass die Information über die Thermoschockgefahr noch nicht zur Verfügung steht. Selbst wenn diese Gefahr bekannt wäre (Fachkunde, im Rahmen einer Anlagenbegehung zu verifizieren), so bleibt unklar, wie in diesem Fall eine gedrosselte Dampferzeuger-Bespeisung durchgeführt werden könnte.

Zusammenfassend ist festzuhalten:

- Ein Ansprechen der im NHB genannten SDE Einleitungskriterien ist nicht zu erwarten. Das Informationsangebot ist zum Zeitpunkt der Entscheidung unvollständig (Gefahrenhinweis, Details zur gedrosselten Einspeisung). Erinnerungtes Wissen muss genutzt werden. Einflüsse der Faktoren A1 (Gruppe A: Ausrichtung von Kognition

auf Handeln auf Ziele) sowie B1 und B7 (Gruppe B: Einfluss von Lernen und Erfahrung) aus /FAS 03/ bzw. /GRS 03a/ sind zu berücksichtigen.

- Die subjektive Wahrnehmung der Prozessdynamik verändert sich unter dem Einfluss von hohem Stress. Die Zeitspanne bis zum Beginn der Kernaufheizung ist durch das Personal kaum einschätzbar. Der Einfluss des Faktors D4 (Gruppe D: Verknüpfung von Informationen zu einem konsistenten Bild der Handlungssituation) aus /FAS 03/ bzw. /GRS 03a/ ist zu berücksichtigen.
- Es ist zu erwarten, dass der Nutzen der Maßnahme unter den Randbedingungen des Szenarios hoch bewertet wird. Demgegenüber können mögliche Kosten falsch eingeschätzt werden (Wahrscheinlichkeit von Heizrohrbrüchen). Einflüsse der Faktoren A2 und B7 aus /FAS 03/ bzw. /GRS 03a/ sind zu berücksichtigen.
- Nach dem Einleiten der Druckentlastung sind keine Korrekturmöglichkeiten vorhanden.

Entsprechend den Stufen der Beanspruchung bei Entscheidungsprozessen in Abhängigkeit von den situativen Belastungsfaktoren (vgl. Tab. 3.2 /PRE 18/) ist Stufe 5 zu wählen. Die für den Entscheidungsprozess wesentlichen Randbedingungen stellen sich überwiegend ungünstig dar. Es sind keine Korrekturmöglichkeiten vorhanden. Damit ergibt sich im Rahmen einer Grobbewertung der Wahrscheinlichkeit für die Ausführung des schädlichen Eingriffs ein Wert von $P = 1$. Die Wahrscheinlichkeit, dass es zur angenommenen Anforderungssituation kommt (verzögerter Abschluss der SDE Vorbereitungsmaßnahmen) wurde mit $P = 7 \times 10^{-2}$ geschätzt. Die Wahrscheinlichkeit, dass es im Referenzszenario zu diesem schädlichen Eingriff kommt, ergibt sich aus der Kombination „Wahrscheinlichkeit der Anforderungssituation“ und „Wahrscheinlichkeit der Fehlentscheidung“ zu $P = 7 \times 10^{-2}$.

4.5.4 Einfügen des Anwendungsbeispiels in den Ereignisbaum

Das Anwendungsbeispiel wurde direkt nach den in Kapitel 4.3 und 4.4 beschriebenen Anwendungsbeispielen „Reparatur der Sumpfungschaltung und Einspeisung mittels Volumenregelsystem“ in die Struktur des Ereignisbaumes eingefügt.

Zu Beginn steht die Frage nach der generellen Verfügbarkeit der mitigativen NFM SDE. Bei vollem Personalbestand wurde eine Wahrscheinlichkeit von 90 % angenommen, dass die mitigative NFM SDE nach KSZ irgendwann verfügbar ist – ohne vollen

Personalbestand wurden 50 % angenommen. Ohne Verfügbarkeit der sekundärseitigen Wärmeabfuhr und der mobilen Pumpe wird eine Wahrscheinlichkeit von 10 % für die Verfügbarkeit gesetzt – für den Fall, dass eine erfolgreiche Wiederherstellung einer der beiden erfolgt.

Die nächste Verzweigung fragt nach der Verspätung der NFM – verspätet bedeutet hier in erster Linie, dass die NFM erst nach KSZ durchgeführt werden kann. Für diese Verzweigung wurden die Kernschadenzustände „Kühlmittelverlust 2-25cm² ohne SB-Bypass“, „Transiente Ausfall Hauptspeisewasser“, „Transiente Ausfall Hauptspeisewasser + HWA“ sowie „Transiente Ausfall Hauptwärmesenke“ in Kombination mit der Nicht-Verfügbarkeit der sekundärseitigen Wärmeabfuhr herangezogen. Unter diesen Randbedingungen wurde die Wahrscheinlichkeit für eine Verspätung auf 7 % gesetzt (siehe Kapitel 4.5.3). In allen anderen Fällen, in denen die speziellen Randbedingungen nicht gegeben sind, erfolgt eine Variation der Zahlenwerte mit einer Gleichverteilung um den Mittelwert 7 %.

Die darauffolgende Verzweigung behandelt die verspätete Durchführung der NFM SDE (ohne Bespeisung). Hier gibt es zwei verschiedenen Zweige: „SDE nicht nach KSZ durchgeführt“ (hier werden auch die Fälle berücksichtigt, in denen die NFM SDE entweder nie oder schon vor dem KSZ durchgeführt worden ist) und „SDE zwischen KSZ und Kernumlagerung“ durchgeführt.

Nun folgt die Abfrage, ob nach der SDE die sekundärseitige Bespeisung in Betrieb genommen werden kann. Hier gibt es drei Zweige: „nicht vor KU (Kernumlagerung) in Betrieb genommen“, „vor KU in Betrieb ohne Schadensfolge“ und „vor KU in Betrieb genommen“ unter Randbedingungen, die potentiell zu einem DEHEIRO-Leck durch Thermoschock führen können. Zu letzterem Zweig wurde hier die unter den Randbedingungen des Beispielszenarios durchgeführte, verspätete SDE nach Fehlschlagen der Reparatur der Sumpfschaltung gezählt.

Schließlich folgt die Verzweigung „Versagen DEHEIRO durch Thermoschock bei Durchführung NFM SDE“ mit positivem und negativem Zweig. Wurde die Maßnahme nicht unter Randbedingungen durchgeführt, bei denen potentiell Gefahr durch Thermoschock besteht, wird dies dem Zweig „kein DEHEIRO-Schaden durch Thermoschock“ zugeordnet. Umgekehrt wird die Wahrscheinlichkeit, dass ein DEHEIRO-Leck entsteht, von der Vorschädigung des DEHEIROs und der Zeitdauer zwischen KSZ und Durchführung der mitigativen Maßnahme abhängig gemacht. Je größer die Vorschädi-

gung und je länger die Zeitdifferenz, desto höher die Wahrscheinlichkeit für einen Thermoschock. Hierbei ist zu beachten, dass entgegen der Beschreibung in Kapitel 4.5.3 zu diesem Zeitpunkt die Mannschaft sehr wahrscheinlich gemäß HMN vorgeht. Dort gibt es den Hinweis, dass die Bespeisung der druckentlasteten DE gedrosselt durchgeführt werden muss, wenn der Füllstand < Anzeigestand für länger als 20 min ist. Hier wird die Annahme getroffen, dass entweder vergessen wird gedrosselt einzuspeisen oder der Hinweis nicht gelesen wird. Beispielsweise wurde für eine Vorschädigung von 20 % (entspricht noch vorhandene 80 % Wanddicke) und einem Zeitpunkt der Durchführung < 10000 s eine Wahrscheinlichkeit von 0,1 % für das Entstehen eines DEHEIRO-Lecks durch Thermoschock als grobe Schätzung gesetzt.

In die schon im Baum vorhandene Frage „Sicherheitsbehälter-Bypass durch Dampferzeugerheizrohrleck bei Kernumlagerung inklusive induziertes Leck“ wurde unter den Bedingungen „niedriger Druck“ und „verspätete Durchführung SDE“ unter Randbedingungen, die zu Schaden an DEHEIRO führen können, die potentiell schädliche mitigative NFM SDE eingefügt. Hierdurch wurde die negative Konsequenz der eingeführten NFM und damit das Einfügen dieses Szenarios abgeschlossen, da die Wahrscheinlichkeit für die Leckentstehung in die Gesamtwahrscheinlichkeit eines SB-Bypasses durch DEHEIRO-Lecks eingeht und damit bis ans Ende des vorhandenen Baums in die Freisetzungskategorien fortgeführt wird.

Weitere mögliche positive Effekte der Wiederherstellung der sekundärseitigen Bespeisung nach Druckentlastung der DE für den weiteren Unfallablauf kommen im Ereignisbaum bisher nicht vor und konnten in diesem Vorhaben nicht ermittelt werden (vermutlich gibt es eine starke Abhängigkeit von den Bedingungen im Primärkreis, wie z. B. Vorhandensein von Hauptkühlmittel, Dampfgehalt etc.).

4.6 Anwendungsbeispiel verspätete primärseitige Druckentlastung

Bei Unfallabläufen mit hohem Primärkreisdruck ist eine primärseitige Druckentlastung (PDE) vorgesehen, um die Gefährdungen durch eine Hochdruck-Kernschmelze zu vermeiden. Die PDE sollte vor Beginn des Kernschmelzens wirken, aber weil der Zeitbedarf für ihre Durchführung erheblich ist, gelingt dies nicht mit Sicherheit. Deshalb gibt es auch Ereignisabläufe, bei denen die PDE erst nach dem Beginn des Kernschmelzens wirkt. Die bedingte Wahrscheinlichkeit dafür wird mit dem nachfolgend beschriebenen Ansatz ermittelt.

Der Ansatz ist eine plausible Vorgehensweise, die sich grundsätzlich von dem Schrittprogramm unterscheidet, das in den vorhergehenden Abschnitten für die anderen Notfallmaßnahmen beschrieben ist. Er beruht ausschließlich auf der Zusammenstellung der erforderlichen Zeiten für die einzelnen aufeinander folgenden Handlungen der PDE. Folgende einzelne Handlungen sind für die PDE mitsamt den dafür erforderlichen Zeiten im Ereignisbaum berücksichtigt:

- Aushändigen Entnahmeexemplar für Spannungsversorgung an Elektriker
- Anweisung, Hilfsmittel zusammenzusuchen
- Gang von der Warte bis zum Notspeisegebäude
- Erforderliche Stromversorgungsscheibe einschalten
- Umschaltung zweier Versorgungsvorwahlschalter
- Umschaltung Vorrangschalter
- Umschaltung Schlüsselstellung Warte
- Öffnen zweier PDE Steuerventile
- technische Zeitdauer (Schaltdauer) des Öffnungsvorganges

Schwierigkeiten bei der Entscheidungsfindung oder bei der Durchführung werden bei diesem Ansatz einfach durch eine längere Zeit für den jeweiligen Schritt berücksichtigt. Unsicherheiten werden dadurch abgebildet, dass die erforderlichen Zeiten im Rahmen der Unsicherheitsanalyse variiert werden.

Am Ende der Modellierung wird die Summe der benötigten Zeiten mit der für eine erfolgreiche PDE verfügbaren Zeit verglichen. Die verfügbare Zeit kann von der Art des Ereignisablaufes abhängig gemacht werden und mit auch Unsicherheiten versehen werden.

5 Vertiefte Untersuchungen zu induzierten Dampferzeuger-Heizrohrlecks

Im Vorhaben RS1529 /GRS 18/ wird mittels ATHLET-CD und MCDET ermittelt, ob und welche Komponenten (heiße Leitung oder Dampferzeuger-Heizrohr) bei HD-Kernschmelzfällen als erstes vor dem RDB-Durchschmelzen versagen. Es bestehen sehr komplexe Abhängigkeiten, und die Konsequenzen unterschiedlichen Versagens können sehr unterschiedlich sein. Die Berücksichtigung der dort aktuell gewonnenen Ergebnisse ermöglicht eine zusätzliche Erweiterung sowie einen höheren Absicherungsgrad der im vorliegenden Vorhaben erzielten Forschungsergebnisse. Dies betrifft insbesondere die bessere Modellierung potenzieller Dampferzeuger-Heizrohrlecks, die bei DWR erheblich zum Risiko der Anlagen beitragen.

5.1 Stand von Wissenschaft und Technik

PSA – Methodenband

Im Abschnitt 7.2.3.2 des PSA-Methodenband /FAK 16/ wird ein Beispiel für die Versagenswahrscheinlichkeit eines DEHEIRO beschrieben. Für DEHEIROs aus dem Stahl 20MnMoNi55 werden Versagenszeiten in Abhängigkeit von Druck und Temperatur angegeben. In Kombination mit anlagenspezifisch berechneten MELCOR-Temperaturverläufen ergeben sich nennenswerte Versagenswahrscheinlichkeiten ($> 10^{-5}$) nur dann, wenn Vorschädigungen der Rohre unterstellt werden.

GRS-Analyse für einen ausländischen DWR

Im Vorhaben RS1529 /GRS 18/ wurden ca. 20 Hochdruck-Kernschmelzfälle mit MELCOR analysiert, bei denen Kriechmodelle für Dampferzeuger-Heizrohre und für die heißen Leitungen verwendet wurden. Anhand dieser MELCOR-Analysen wurden Zeiten mit Bandbreiten ermittelt, zu denen die heiße Leitung, die Volumenausgleichsleitung oder das Dampferzeugerheizrohr-Leck durch Kriechen versagen würden. Ferner gibt es eine von der Zahl der Druckhalter-Ventilzyklen abhängige Wahrscheinlichkeit für das Offenbleiben des Druckhaltersicherheitsventils.

Im hier entwickelten Ereignisbaum wurden die im Vorhaben RS1529 ermittelten Unsicherheiten berücksichtigt und in Monte-Carlo-Simulationen variiert. Aus dem Vergleich der Versagenszeiten ergibt sich für jede einzelne Monte-Carlo-Simulation, welche

Komponente zuerst versagt. Im Falle des Dampferzeuger-Heizrohres, wird geprüft, ob durch ein unmittelbar anschließendes Versagen einer anderen Komponente noch eine Druckentlastung des Primärkreislaufes stattfindet, durch die die Freisetzung durch das Heizrohr-Leck frühzeitig beendet würde.

Um die verschiedenen möglichen Kombinationen an Versagensreihenfolgen abzudecken, waren folgende Verzweigungen im Ereignisbaum erforderlich:

- Versagt die heiße Kühlmittleitung oder die Volumenausgleichsleitung zuerst (vor einem Offenbleiben des Druckhalter-Ventils und vor induziertem DEHEIRO-Leck)?
- Versagt zuerst das Druckhalter-Ventil in Offenstellung zuerst (vor einem Versagen der heißen Kühlmittleitung oder der Volumenausgleichsleitung und vor induziertem DEHEIRO-Leck)?
- Erfolgt ein induziertes DEHEIRO-Leck zwischen Erreichen Kernschadenzustand und Kernumlagerung in die RDB-Kalotte?
- Versagt das Druckhalter-Sicherheitsventil in Offenstellung, bevor ein DEHEIRO-Bypass entsteht?
- Falls ein DEHEIRO-Bypass entsteht: Folgt danach eine weitere Druckentlastung des Primärkreises durch das Kriechversagen ein anderen Komponente, die die Freisetzungen über den Bypass begrenzt?

Es ergab sich, dass im Mittel bei ca. 6 % aller Hochdruck-Kernschmelzfälle ein induziertes DEHEIRO-Leck entsteht. Hier ist noch eine erhebliche Unsicherheit enthalten, die sich vor allem aus Unsicherheiten bei der Temperaturentwicklung und bei den möglichen Vorschädigungen des DEHEIRO ergibt.

IRSN – Kompendium zu Kernschmelzunfällen

IRSN hat in 2015 ein Kompendium zu Kernschmelzunfällen veröffentlicht /IRS 15/. In diesem Werk wird im Abschnitt 5.1.4.4 zusammenfassend wie folgt bewertet:

- Es ist auch beim bestehenden fortgeschrittenen Kenntnisstand schwierig vorherzusagen, an welcher Stelle der Primärkreis bei Hochdruck-Kernschmelzfällen zuerst versagen wird.

- Falls die Dampferzeuger sekundärseitig druckentlastet sind, wird der erste Versagensort wahrscheinlich ein Dampferzeuger-Heizrohr sein.
- Falls die Dampferzeuger sekundärseitig nicht druckentlastet sind, wird der erste Versagensort wahrscheinlich die heiße Leitung des Primärkreises sein.

Diese Bewertungen zeigen, dass die Notfallmaßnahme „sekundärseitige Druckentlastung“ risikoe erhöhend sein kann. Unter anderem deshalb wurde diese Maßnahme auch im vorliegenden Bericht vertieft behandelt (siehe Abschnitt 4.5) und im Ereignisbaum modelliert.

ASAMPSA2 – Band II – Überblick über Stand der Technik

Das Dokument /ASA 13/ enthält Beispiele zum Stand der Technik für alle Aspekte einer PSA der Stufe 2. Der Abschnitt 4.3.2 befasst sich mit Hochdruckversagen des Primärkreises und insbesondere mit induziertem DEHEIRO-Leck.

Eine Analyse soll zunächst eine Berechnung der Versagenszeitpunkte von intakten und vorgeschädigten DEHEIROs mittels des Larson-Miller-Ansatzes vornehmen. Dabei sind vor allem der Temperaturverlauf und die Druckbelastung zu variieren. Ausgehend von dieser Basis sind dann Monte-Carlo-Simulationen vorzunehmen. Die aleatorischen Unsicherheiten (z. B. Variationen des Unfallverlaufs einschl. der Temperaturverläufe) sind in einer ersten Schleife zu variieren, an die eine zweite Schleife mit Variation der epistemischen Unsicherheiten (z. B. Larson-Miller-Parameter, Materialeigenschaften) anschließt. Insgesamt ergibt sich daraus eine Verteilung der Versagenszeiten der DEHEIROs, die mit der Verteilung der Versagenszeiten der anderen Primärkreiskomponenten verglichen werden. Daraus lässt sich letztlich die Wahrscheinlichkeit ableiten, mit der ein DEHEIRO-Leck vor einer Druckentlastung stattfindet.

Die Temperatur der Rohre geht mit einem Potenzgesetz in die Versagenszeiten ein. Deshalb sind Unsicherheiten über den Temperaturverlauf auch die dominante Unsicherheit für das Eintreten eines DEHEIRO-Lecks.

USA / NRC 1998

Im Jahr 1998 wurde von der NRC ein Bericht zur Risikoabschätzung infolge induzierter DEHEIRO-Lecks veröffentlicht /NUR 98/. Er wurde von Mitarbeitern der NRC verfasst. Die Analyse baut auf früheren Fragestellungen zu möglichen DEHEIRO-Lecks infolge

der Druckdifferenzen bei einem sekundärseitigen Frischdampf-Leitungsbruches (ohne Kernschaden) auf.

Auf Basis einer früheren PSA werden zunächst die Unfallabläufe identifiziert, bei denen ein DEHEIRO-Leck möglicherweise mit der höchsten Wahrscheinlichkeit entstehen könnte. Dies sind vor allem Abläufe mit vollständigem Ausfall der Stromversorgung.

Es werden umfangreiche und detaillierte deterministische Rechnungen mit dem Programm SCDAP/RELAP5 zur Ermittlung der Temperatur- und Druckverläufe durchgeführt. Mittels Experimenten werden die Versagensbedingungen für Rohre mit eingebrachten mechanischen Fehlstellen bestimmt. Aus der Summe aller Informationen wird dann ein spezieller Ereignisbaum-Teil erzeugt.

Das wesentliche Ergebnis dieser Arbeiten ist eine überschlägige, aber dennoch möglichst genaue Abschätzung der Wahrscheinlichkeit für induzierte DEHEIRO-Lecks. Es wird geschlossen, dass einige der (damals in Betrieb befindlichen) Anlagen nennenswertes Potenzial für einen derartigen Ablauf haben.

In methodischer Hinsicht waren diese Analysen konventionell. In Bezug auf ihren Umfang und die Genauigkeit können sie als beispielgebend bezeichnet werden.

USA / EPRI 2002

Der Bericht /EPR 02/ beschreibt eine Methode, um die Häufigkeit großer früher Freisetzungen infolge von DEHEIRO-Versagen zu ermitteln. Mit dieser Methode sollen die Betreiber in die Lage versetzt werden, risikoorientierte Entscheidungen über Dampferzeuger-Reparaturen oder über den Betrieb mit teilgeschädigten Rohren zu treffen.

Das EPRI-Team hat die einschlägigen NRC-Dokumente gesichtet und auf dieser Basis eine Methode für die Betreiber entwickelt, die mit den NRC-Anforderungen konsistent sein soll. Eine weitere Basis für diese Methode sind probabilistische Analysen für verschiedene US-Anlagen. Zusätzlich wurden eigens thermohydraulische und strukturmechanische Analysen durchgeführt. Personalhandlungen zur Beherrschung eines DEHEIRO-Bruches werden berücksichtigt.

Die vorgeschlagene Methode besteht aus den folgenden Schritten /EPR 02/:

1. Bewertung von aktuellen PSA-Ergebnissen
 - Identifikation von Sequenzen, die zu einem DEHEIRO-Leck führen oder durch eines initiiert werden
2. Präzisierung von aktuellen PSA-Ergebnissen
 - Überprüfung der Annahmen, Modelle und der zugrundeliegenden Daten der PSA
 - Bewertung der relevanten Anlagenmodernisierungen und der dominanten Unfallsequenzen
 - Durchführung ergänzender Human Factor Analysen
3. Berechnung von Unfallabläufen
 - Aufstellen von aktualisierten Ereignisbäumen
4. Durchführung von thermohydraulischen Analysen
5. Durchführung von Wahrscheinlichkeitsberechnungen für DEHEIRO-Lecks
6. Quantifizierung von Large Early Release Frequencies (LERF)

Anhand dieser Methode kann sowohl die Wahrscheinlichkeit für ein DEHEIRO-Leck als auch eine damit eventuell verbundene LERF quantifiziert werden.

USA / NRC 2017

Ein Beratungsergebnis der NRC-Komitees zur Reaktorsicherheit vom 19. Mai 2017 /NRC 17/ befasst sich mit Methoden zur Analyse von induzierten DEHEIRO-Lecks (im US-Sprachgebrauch „Consequential Steam Generator Tube Rupture“).

Es wird die Veröffentlichung des Berichtes NUREG-2195 empfohlen, der sich mit entsprechenden Methoden befasst. Insbesondere wird das Programm C-SGTR empfohlen, das in vereinfachter (und deshalb praktisch leicht anwendbarer) Weise eine komplette Analyse ermöglicht. C-SGTR wurde anhand von aufwändigeren thermohydraulischen und strukturmechanischen Analysen kalibriert und berücksichtigt auch Vorschädigungen von DEHEIROs. Es liefert folgende Resultate:

- Häufigkeit von Unfallabläufen mit dem Potenzial für induziertes DEHEIRO-Leck.
- Bedingte Wahrscheinlichkeit für das Entstehen einer relevanten Zahl von DEHEIRO-Lecks.
- Bedingte Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein nachfolgendes (zur Druckentlastung führendes) Leck an anderen Stellen des Primärkreises nicht auftritt.

- Bedingte Wahrscheinlichkeit dafür, dass mitigative Notfallmaßnahmen nicht gelingen.
- Bedingte Wahrscheinlichkeit dafür, dass eine Evakuierung der betroffenen Bevölkerung nicht erfolgreich ist.

Letztlich wird die Häufigkeit von großen frühen Freisetzungen (LERF) infolge DEHEIRO-Lecks berechnet. Dabei ist zu beachten, dass LERF neben der anlageninternen Analyse für die Radionuklidfreisetzungen auch die anlagenexterne Evakuierung mitberücksichtigt. Eine Anlage mit ungünstigen Evakuierungsbedingungen hat also bei sonst gleichen Merkmalen eine höhere LERF als eine Anlage mit günstigeren Evakuierungsbedingungen.

Die bedingte Wahrscheinlichkeit für induzierte DEHEIRO-Lecks hängt besonders stark von folgenden Faktoren ab:

- Art des Dampferzeuger-Designs (Das CE-Design ist wesentlich anfälliger als das Westinghouse-Design. Deutsche Anlagen haben größere Ähnlichkeit zum Westinghouse-Design).
- Temperaturdifferenz zwischen dem heißen Strang und dem DEHEIRO.
- Leckgröße, die erforderlich ist, um den Primärkreis (über andere Komponenten als DEHEIROs) zu druckentlasten.
- Lecks an den Dichtungen der Hauptkühlmittelpumpen, die zu einer gerichteten Strömung durch die Dampferzeuger führen können („cleared loop seals“ – ein in deutschen Anlagen nicht zu unterstellender Ablauf).

Als Ergebnis zeigt sich, dass das induzierte DEHEIRO-Leck einen sehr relevanten Beitrag zu großen frühen Freisetzungen ergibt.

Insgesamt stellt das US-Vorgehen eine praktikable und dennoch anspruchsvolle Methode dar. Methodisch besonders bemerkenswert ist die Berücksichtigung von primärseitigen Druckentlastungen nach Eintritt des induzierten DEHEIRO-Lecks. Dies scheint ein wesentlicher Beitrag zur Minderung der Auswirkungen zu sein.

5.1.1 Zusammenfassung des Vergleichs

Die Relevanz induzierter DEHEIRO-Lecks ist allgemein anerkannt. Dementsprechend wird dieses Phänomen in PSA der Stufe 2 behandelt, und es liegen Methodenvorschläge für die derzeit übliche Behandlung in einer PSA vor.

Den ausgewerteten Quellen ist gemeinsam, dass strukturmechanische Analysen der DEHEIROs vorgenommen werden, wobei als variable Parameter vor allem der Temperaturverlauf, aber z.B. auch die Vorschädigung der Rohre berücksichtigt werden. Diese Analysen ergeben Versagenszeitpunkte für die DEHEIROs unter den jeweiligen Bedingungen.

Diese Versagenszeitpunkte werden verglichen mit anderen relevanten Zeitpunkten. Es geht vor allem darum, ob und wann eine primärseitige Druckentlastung stattfindet, die entweder ein DEHEIRO-Versagen ganz verhindert, oder – wenn es bereits stattgefunden hat – die Freisetzungen über dieses DEHEIRO-Leck beendet.

Alle in diese Analysen eingehenden Daten sind unsicher. Es ist üblich, die Unsicherheiten in Monte-Carlo-Simulationen zu variieren und so die Wahrscheinlichkeit für ein DEHEIRO-Leck und seine unterschiedlichen Folgen zu ermitteln. Diese probabilistischen Berechnungen werden z. T. separat vom Ereignisbaum vorgenommen und die Ergebnisse in diesen integriert, oder sie sind integraler Bestandteil des Baumes.

Eine Schwäche der meisten genannten Ansätze besteht darin, dass einige grundlegende strukturmechanische und thermohydraulische Analysen für typische Szenarien durchgeführt werden, deren Ergebnisse (z. B. Versagenszeiten) dann aber pauschalisiert für ganze Klassen von Abläufen genutzt werden. Insbesondere die starke Abhängigkeit der Resultate von Details der Temperaturverläufe lässt diesen Ansatz kritikwürdig erscheinen.

Der US-Ansatz (siehe Abschnitt NRC 2017, /NRC 17/, d. h. Kapitel 1.1) weicht hiervon offenbar ab. Infolge einer vereinfachten Modellierung ist es möglich, sehr viele verschiedene Unfallabläufe effizient zu berechnen, so dass die o.g. Problematik entfällt. Inwiefern die vereinfachte Modellierung Schwächen aufweist, kann hier nicht bewertet werden.

5.2 Auswertung und Interpretation vorhandener Arbeiten aus RS 1529

5.2.1 Beschreibung des untersuchten Szenarios

Eine ausführliche Beschreibung des Aufbaus des Ereignisbaums sowie Erläuterungen zur Programmierung eines Ereignisbaums mit EVNTRE finden sich im GRS-Bericht zur Integration der MCDET-Analysen /JOS 18/.

Betrachtet wird in den folgenden Untersuchungen das Szenario des vollständigen Ausfalls der Stromversorgung (Station Black Out, SBO). Ferner wird angenommen, dass die Notfallmaßnahme „primärseitige Druckentlastung“ nicht erfolgt. Die Nicht-Verfügbarkeit der Eigenbedarfsversorgung und der Notstrom- sowie Notspeisenotstromdieselnetze ist eines der Einleitungskriterien zur Vorbereitung der NFM SDE. Es wird angenommen, dass diese nicht vor Eintreten des KSZ durchgeführt werden kann. In der MCDET-Simulation mit ATHLET-CD (als deterministischer Rechencode für die thermohydraulischen Analysen) liegt ferner die Annahme zu Grunde, dass nach der SDE keine Dampferzeugerbespeisung (durch die mobile Pumpe) erfolgt. Mit diesen Annahmen wird das hochdruck-/temperaturbedingte Kriechversagen von Primärkreisleitungen mit möglichem Induzieren eines Lecks in einem Dampferzeugerheizrohr (DEHEIRO) bei Durchführung der Notfallmaßnahme „sekundärseitige Druckentlastung“ unter Berücksichtigung relevanter Unsicherheiten untersucht. Die folgenden drei aleatorisch unsicheren Parameter werden variiert:

- Der Zeitpunkt der Durchführung der mitigativen Notfallmaßnahme „sekundärseitige Druckentlastung“ (nach KSZ),
- der Grad der Vorschädigung des betrachteten DEHEIRO (0 % bis 70 %, wobei eine Vorschädigung von 70 % bedeutet, dass nur 30 % der normalen Rohrwanddicke vorhanden ist) sowie
- der Zeitpunkt des möglichen Versagens von Druckhalter(DH)-Abblaseventil und der DH-Sicherheitsventile in geschlossenem / offenem Zustand.

Von diesen Startparametern hängt es insbesondere ab, ob es in der heißen Leitung, der Volumenausgleichsleitung und/oder dem DEHEIRO zu einem Leck kommt und an welcher Stelle zuerst ein Leck auftritt. Die hierzu von MCDET initiierten ATHLET-CD-Rechnungen werden entweder bei Erreichen des Endzeitpunkts bei $t = 20.000$ s vorzeitig beendet oder abgebrochen, wenn eine Druckentlastung durch ein Leck im Pri-

märkreis entsteht. Es wird angenommen, dass nur ein einzelnes DEHEIRO-Leck entsteht, von dem aufgrund des kleinen Durchmessers keine Druckentlastung des Primärkreises erfolgt. In diesem Fall wird die Simulation fortgesetzt, um zu ermitteln ob nach Eintritt eines DEHEIRO-Lecks ein weiteres Leck im Primärkreis entstehen kann. Das zweite Leck würde aufgrund der damit einhergehenden Druckentlastung die Freisetzung über das DEHEIRO-Leck näherungsweise beenden. Die Zeitdifferenz zwischen beiden möglichen Lecks beeinflusst daher die Größe des Quellterms bezüglich Freisetzung von Radionukliden über das DEHEIRO-Leck.

Der entscheidende Parameter für die Entstehung eines Lecks ist die Druckdifferenz Δp zwischen Primärkreis und SB-Atmosphäre (für Primärkreisleitungen) und zwischen Primärkreis und Sekundärkreis (für DE-Heizrohre). Im Primärkreis ist die Druckdifferenz gleich dem Überdruck in der Leitung. Kriechversagen ist nur bei einer großen Druckdifferenz um 160 bar wahrscheinlich. Wenn keine sekundärseitige Druckentlastung erfolgt, ist nicht mit einem DE-Heizrohrversagen zu rechnen /KKG 10/. Eine Vorschädigung der Dampferzeugerheizrohre kann zu einer höheren Versagenswahrscheinlichkeit führen. Zusätzlich hängt diese von der Zeitdauer ab, während der eine hohe Temperatur ansteht /FAK 16/.

Erhält der Druckhalter über den Unfallverlauf seine normale Funktion, wird durch regelmäßiges Öffnen des Druckhalterabblaseventils bzw. eines/beider Druckhaltersicherheitsventile ein Druck von ca. 165 bar im Primärkreis gehalten, es ist also mit Kriechversagen in einer primärseitigen Leitung zu rechnen.

Liegt ein Ausfall eines Druckhalterventils in Offen-Stellung vor (beispielsweise eines Druckhaltersicherheitsventils oder des Druckhalterabblaseventils, ohne dass das Abblaseabsperrventil geschlossen werden kann), kann trotz des dadurch initiierten Absenken des Primärkreisdrucks weiterhin ein Leck im Dampferzeugerheizrohr entstehen. Zusätzlich könnte auch die Volumenausgleichsleitung in der Nähe der „heißen Leitung“ aufgrund des Wärmeeintrags wegen Durchströmung versagen.

Ein (unwahrscheinlicher) Ausfall aller Druckhalterventile in Geschlossen-Stellung würde zu einer sehr schnellen Zunahme des Primärkreisdruckes und damit einhergehend der Temperatur führen. Ein Kriechversagen der Primärkreisleitungen würde daher wesentlich früher auftreten.

Weitere epistemisch unsichere physikalische Parameter und Anlagenparameter werden in den ATHLET-CD Simulationen ebenfalls variiert. Diese werden nicht im Ereignisbaum berücksichtigt, sondern äußern sich in den Genauigkeit der berechneten Ergebnisse.

5.2.2 Struktur der Daten der Simulation

Auch wenn die einzelnen Analyseergebnisse der thermohydraulischen Rechnungen mit MCDET zum Zeitpunkt dieser Untersuchungen noch nicht vorliegen, lässt sich die Struktur der Daten bereits abschätzen. Im Folgenden sind die Variablen und Wahrscheinlichkeiten gelistet, die entweder als unsichere Inputparameter in die Simulation eingehen oder sich als Ergebnis aus diesen ergeben.

Zeitparameter

- Zeitdauer von Kernschadenzustand bis Kernumlagerung
- Versagenszeitpunkt Sicherheitsventile offen / geschlossen:
 - Zeitpunkt Versagen aller Ventile (mind. 1/3 in offenem Zustand)
 - oder
 - Zeitpunkt Versagen aller Ventile (3/3 in geschlossenem Zustand)
- Zeitpunkt verspätete Verfügbarmachung/Durchführung Notfallmaßnahme sekundärseitige Druckentlastung
- Zeitpunkt Leck an heißer Leitung oder Volumenausgleichsleitung
- Zeitpunkt DEHEIRO-Leck

Wahrscheinlichkeiten

- Wahrscheinlichkeit, dass die Vorschädigung des DEHEIRO-Rohres
 - 0 % beträgt
 - ≤ 20 % beträgt
 - > 20 % und ≤ 40 % beträgt
 - > 40 % und ≤ 70 % beträgt
- Verzweigungswahrscheinlichkeit für Ausfall der Ventile:
 - entweder min. 1/3 offen
 - oder 3/3 geschlossen
- Wahrscheinlichkeit für DEHEIRO-Leck (abhängig von Zeitpunkt Durchführung SDE und Vorschädigungsgrad DEHEIRO)
- Wahrscheinlichkeit für Leck an Volumenausgleichsleitung oder heißer Leitung (3/3 Ventile geschlossen ausgefallen als Bedingung)

Im Rahmen der Arbeiten war es möglich, die Struktur des Ereignisbaums aus den Ergebnissen der MCDET-Analyse abzuleiten und diese im Baum umzusetzen (siehe Kap. 5.3). Allerdings war es im vorliegenden Vorhaben nicht möglich, die Auswertung der im MCDET-Verfahren generierten Datensätze, u.a. aufgrund ihrer Dateigröße und Komplexität, im Hinblick auf die Verzweigungswahrscheinlichkeiten des Ereignisbaums komplett auszuwerten. Es hat sich als notwendig herausgestellt, für die vollständige Auswertung der Datensätze spezielle Post-Processing Programme zu erstellen.

5.3 Modellierung im Ereignisbaum

Im Folgenden sind die Ergänzungen dargelegt, die im bestehenden Ereignisbaum vorgenommen wurden, um das Einfügen der ATHLET-CD/MCDET-Simulationsergebnisse vorzubereiten. Hierbei wird zunächst mit Punktwerten gearbeitet, die im Code entsprechend gekennzeichnet werden, um im nächsten Schritt mit einer Variation für Monte-Carlo-Simulationen versehen zu werden. Die endgültigen MCDET-Simulationsergebnisse können nachträglich an die Stelle der eingefügten Verteilungen eingesetzt werden.

Generell ist beim Einfügen neuer Verzweigungen in einen vorhandenen Ereignisbaum zu beachten, dass gültige Verknüpfungen in beide Richtungen gesetzt werden:

- Von welchen schon im Baum vorhanden Randbedingungen sind neue Verzweigungen abhängig?
- Welche Freisetzungskategorie / welcher Quellterm wird davon beeinflusst?

Für letzteres muss die Wirkung der neu eingepflegten Verzweigung durch alle Phasen, die der Baum behandelt, hindurch verfolgt werden oder der Wahrscheinlichkeit eines schon vorhandenen Zweigs hinzugefügt werden (beispielsweise, wenn im Verlauf des Baumes alle Lecks mit SB-Bypass in einem Zweig durch Binning zusammengefasst werden).

Mit dem Einfügen des beschriebenen Szenarios in die Struktur des Ereignisbaumes wurde in der Phase „Vorgänge während der Kernzerstörung und vor Kernumlagerung“ direkt nach der Modellierung der NFM „primärseitige Druckentlastung“ begonnen.

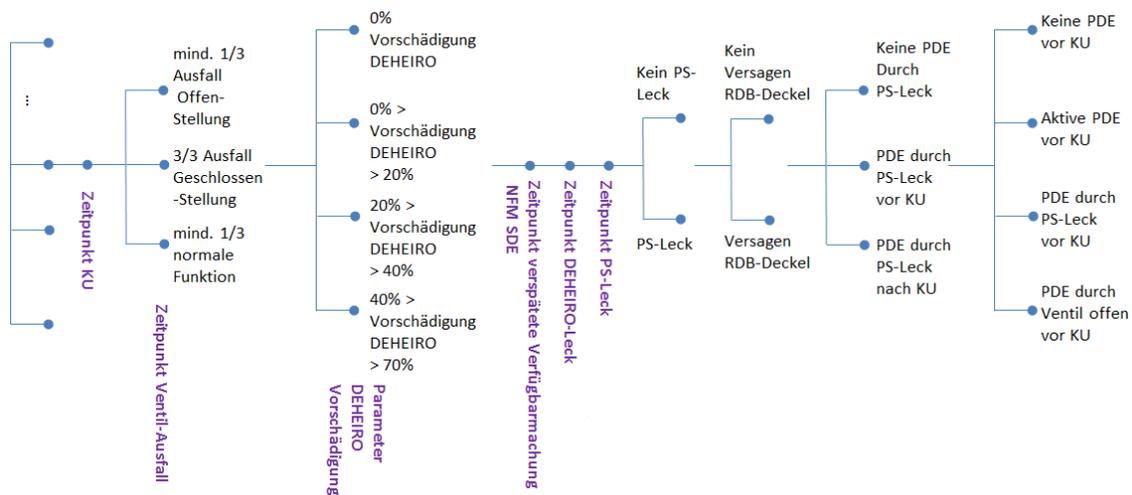


Abb. 5.1 Struktur der eingefügten Ergänzungen in den Ereignisbaum (anders als hier dargestellt wird jede neue Verzweigung an jeden Zweig der vorhergehenden Verzweigung angefügt)

Zu Beginn steht eine Verzweigung mit nur einem Ast, die für die Parameterdefinition der Zeitdauer Kernschadenszustand bis Kernumlagerung genutzt wird (siehe Abb. 5.2). Daran schließt sich die Definition der beiden Zeitpunkte Versagen aller Druckhalter-Ventile (Abblaseventil und Sicherheitsventile) in geschlossener Stellung und Versagen von mindestens einem Ventil in offener Stellung an. Zudem zweigt sich der Baum hier in drei Möglichkeiten auf: „Mindestens 1 Sicherheitsventil fällt in offener Stellung aus“, „3/3 Sicherheitsventile fallen in geschlossener Stellung aus“ Und „Ventile versagen nicht (normale Funktionalität von mindestens 1/3 Ventilen)“. Nur wenn die Randbedingungen des hier untersuchten Szenarios erfüllt sind (Eigenbedarfsversorgung nicht verfügbar, beide Notstromnetze nicht verfügbar, hoher Druck im Primärkreis und eine aktive primärseitige Druckentlastung durch die Mannschaft) erfüllt sind, sind alle Zweige möglich. In allen anderen Fällen wird eine normale Funktionalität angenommen.

Bei einem offenen Ausfall des Druckhalter-Abblaseventils (AV) und einem Absinken des Kühlmitteldrucks auf 135 bar, schließt normalerweise das DH-Abblaseabsperrentil (AAV) automatisch über Ansteuerung aus der Reaktor-Begrenzungseinrichtung. Im Falle eines SBO ist das motorbetriebene DH-AAV allerdings ohne Strom und kann seine Schließ-Funktion nicht erfüllen – es sei denn es wird über die batteriegepufferte „Bleed“-Schiene in Vorbereitung der Notfallmaßnahme PDE stromversorgt. Da in diesem Szenario davon ausgegangen wird, dass die NFM PDE nicht durchgeführt werden kann, wird an dieser Stelle davon ausgegangen, dass das DH-AAV seine Schließ-Funktion nicht erfüllen kann.

```

$Es endet:
$   Beispielhafte Modellierung einer regelbasierten NFM
$   hier: Primaerseitige Druckentlastung (PDE) nach Beginn des KSZ
$+++++
$+++++

$*****
$*****
$+JOS: Zeitdauer bis Kernumlagerung
IQU Zeitdauer KSZ bis Kernumlagerung

#KSZKUZ: Dauer KSZ bis Kernumlagerung
SUPP KSZKUZ

BRA KSZZKU

IF COM
1.0

PA
KSZKUZ   10800   $QS
$+JOS ~ hier Variation einfügen

$ungefähr 3h von Kernschmelze bis Kernumlagerung (GRS-175)
$Leck im Primärkreis und Ausfall ND-Notkühlung

$*****
$*****

```

Abb. 5.2 Screenshot der ersten eingefügten Verzweigung mit nur einem Zweig KSZKUZ zur Parameterdefinition (Auszug aus Baum.txt)

Eine Verzweigung mit vier Zweigen wird genutzt, um den Grad der Vorschädigung des DEHEIRO in vier Kategorien zu bestimmen (siehe Abb. 5.2):

- Grad der Vorschädigung DEHEIRO 0 %
- 0 % < Grad der Vorschädigung DEHEIRO ≤ 20 %
- 20 % < Grad der Vorschädigung DEHEIRO ≤ 40 %
- 40 % < Grad der Vorschädigung DEHEIRO ≤ 70 %

Die Wahrscheinlichkeit, welche Vorschädigung das DEHEIRO besitzt, wird später als Simulationsergebnis eingefügt. Als Platzhalter werden hier Verzweigungswahrscheinlichkeiten von 90 % (für keine Vorschädigung), 8 % (für eine Vorschädigung ≤ 20 %), 1,5 % (für eine Vorschädigung zwischen 20 % und ≤ 40 %) und 0,5 % (für eine Vorschädigung zwischen 40 % und ≤ 70 %) angenommen. Der Grad der Vorschädigung wird zusätzlich als Variable definiert, die in den 3 Zweigen jeweils den Wert 0,0 / 0,2 / 0,4 / und 0,7 annimmt.

Das zusätzliche Definieren einer Variable ist deshalb nötig, um im späteren Verlauf innerhalb einer benutzerdefinierten Funktion die Abhängigkeit der Verfügbarmachung der mitigativen NFM SDE und der DEHEIRO-Vorschädigung auf die Wahrscheinlichkeit für das Entstehen eines DEHEIRO-Lecks abbilden zu können.

Drei weitere Verzweigungen mit jeweils einem Ast definieren die Parameter für den Zeitpunkt der Verfügbarmachung der mitigativen NFM SDE, den Zeitpunkt des DEHEIRO-Lecks und den Zeitpunkt des Primärkreislecks.

Die nächste Verzweigung dient der Abfrage, ob im Falle des beschriebenen Szenarios ein Leck im Primärkreislauf entsteht. Folglich müssen die Bedingungen

- Eigenbedarfsversorgung nicht verfügbar
- Beide Notstromnetze nicht verfügbar
- Hoher Druck im Primärkreis
- Keine aktive primärseitige Druckentlastung durch die Mannschaft

vorliegen. Es gibt zwei Äste: Leckentstehung oder keine Leckentstehung. Als erste Einschätzung wurden die Wahrscheinlichkeiten von 10 % für Leckentstehung und 90 % für keine Leckentstehung gesetzt für den Fall von einem Ausfall mindestens eines DH-Ventils in Offen-Stellung. Grundsätzlich führt ein solcher DH-Ventilausfall zu einem Druckabbau, was die Entstehung eines PS-Lecks unwahrscheinlicher macht. Durch zu langsamen Druckabbau im Primärkreis oder durch einen besseren Wärmeintrag aufgrund der Durchströmung der heißen Leitung / Volumenausgleichsleitung könnte es dennoch zu einem PS-Leck kommen. In dem sehr unwahrscheinlichen Fall, dass alle 3 DH-Ventile in Geschlossen-Stellung ausfallen, entsteht ein sehr hoher Druck in kurzer Zeitspanne, sodass hier ein Kriechversagen einer PS-Leitung mit 100 % angenommen wurde. Für den dritten Fall, in dem mindestens eins der DH-Ventile seine Funktionalität über den Unfallverlauf erhält, wurde eine Wahrscheinlichkeit von 95 % für Kriechversagen und 5 % für kein Kriechversagen einer PS-Leitung angesetzt /KKG 10/.

Die eingefügten Wahrscheinlichkeiten werden später durch die Ergebnisse aus der MCDET-Simulation aktualisiert. In allen anderen Fällen, die nicht obige Bedingungen erfüllen, wurde keine PS-Leckentstehung angenommen. PS-Lecks, die unter anderen Randbedingungen in dieser Phase entstehen könnten, sind in diesem Baum bisher nicht berücksichtigt.

Für den Fall eines Versagens aller drei DH-Ventile in Geschlossen-Stellung und des damit einhergehenden sehr hohen Primärkreisdrucks wurde eine weitere Verzweigung eingeführt, die das Versagen des RDB-Deckels (zusätzlich zur Entstehung eines PS-Lecks) untersucht. Hier gibt es zwei Zweige: kein Versagen des RDB-Deckels oder Versagen des RDB-Deckels vor KU (es wird angenommen, dass dies aufgrund des sehr hohen Druck relativ schnell, also vor KU, geschieht). Es wurde eine Wahrscheinlichkeit von 50 % als grobe Abschätzung gesetzt. Ohne derartigen DH-Ventilausfall wurde kein Versagen des RDB-Deckels angenommen.

Die nächste Verzweigung entscheidet anhand der Parameterwerte „Zeitdauer zwischen KSZ und KU“ und „Zeitpunkt Primärkreisleck“, ob eine primärseitige Druckentlastung durch das Leck zwischen Kernschadenzustand und Kernumlagerung oder nach Kernumlagerung stattfindet. Hierfür wird eine benutzerdefinierte Funktion genutzt, die den Quotienten der beiden Zeitwerte ausgibt. Mit dem Operator GETHRESH und dem Schwellwert 1,0 wird bestimmt, welcher der beiden Äste eine Wahrscheinlichkeit von 100 % erhält.

Die schon im Baum vorhandene Verzweigung „Entsteht primärseitige Druckentlastung zwischen KSZ und KU“ sortiert nun in vier mögliche Äste – jeweils zwischen KSZ und KU:

- aktive Druckentlastung,
- Druckentlastung durch primärseitiges (PS) Rohrleck,
- Druckentlastung durch Ventiloffenbleiben oder
- keine Druckentlastung.

Hauptsächlich bestimmt durch Abfragen des Druckes wird hier je nach vorliegendem Fall einem der vier Zweige eine Wahrscheinlichkeit von 100 % zugeordnet. Obiger Zweig mit offenem Ventilausfall leitet folgerichtig in den Zweig Druckentlastung durch Ventiloffenbleiben weiter. Der Zweig mit Entstehung eines primärseitigen Lecks in den

Fall Druckentlastung durch PS-Rohrleck. Das Versagen des RDB-Deckels wurde ebenfalls hierzu gezählt. Der Fall primärseitiges Leck nach KU trägt zum Zweig keine Druckentlastung zwischen KSZ und KU bei.

Um den Fall, dass ein Leck in einer Primärkreisleitung erst nach Kernumlagerung entsteht, mit seinen Konsequenzen im Baum zu verknüpfen, wurde der schon vorhandene Verzweigung „Entsteht primärseitige Druckentlastung zwischen Kernumlagerung und RDB-Versagen“ ein zusätzlicher Fall hinzugefügt. So wird die Wahrscheinlichkeit für ein Leck unter den Randbedingungen des hier betrachteten Szenarios zur Wahrscheinlichkeit „Primärseitige Druckentlastung zwischen KU und RDB-Versagen durch PS-Rohrleck“ addiert. Dieser Zweig befindet sich in der Phase bei und nach Kernumlagerung, inkl. RDB-Durchschmelzen bis zum Beginn der Schmelze-Beton-Wechselwirkung.

Durch Münden in diese im Baum schon vorhandenen Verzweigungen sind alle hier neu eingeführten Verzweigungen (mit mehr als einer Verzweigung) mit ihren jeweiligen Konsequenzen automatisch im weiteren Verlauf des Baumes berücksichtigt.

Das Einfügen des Szenarios setzt sich nach den mitigativen Notfallmaßnahmen „Wiederherstellung Sumpfschaltung und Einspeisen über das Volumenregelsystem“ im Baum fort, da hier die mitigative Notfallmaßnahme „sekundärseitige Druckentlastung und Bespeisung“ beginnend mit der Frage nach ihrer grundsätzlichen Verfügbarkeit behandelt wird. Hier wurde die Verzweigung „Mobile Pumpe für NFM SDE verfügbar“ eingefügt, da diese bei SBO für die Einspeisung aus den vier Notspeisebecken benötigt wird (siehe Abb. 5.3). Eine mögliche passive Einspeisung des Inventars der Speisewasserleitungen oder des -behälters bei Druckentlastung der DE, wird hier nicht berücksichtigt.

Die beiden darauf folgenden Verzweigungen fragen zunächst nach der grundsätzlichen Verfügbarkeit der SDE (nach KSZ) und dann, ob die NFM SDE verspätet ist. Verspätet bedeutet hier, dass eine SDE erst nach Kernschadenzustand verfügbar gemacht und durchgeführt werden kann. Es gibt drei Zweige:

- SDE planmäßig bei Anliegen der Einleitungs- / Durchführungskriterien verfügbar gemacht und durchgeführt
- SDE kann nie verfügbar gemacht werden
- SDE verspätet: kann erst nach KSZ verfügbar gemacht werden

Die Wahrscheinlichkeit für eine verspätete Verfügbarmachung der NFM SDE bei Vorliegen eines Kernschadens wird als grobe Schätzung auf 7 % gesetzt – wie im Arbeitsschritt „Ergänzende Untersuchungen zu mitigativen menschlichen Handlungen im Bereich schwerer Unfallabläufe“ dieses GRS-Vorhabens beschrieben.

Im nächsten Schritt wird die Entscheidung der Mannschaft abgefragt, die mitigative NFM SDE verspätet verfügbar zu machen und durchzuführen. Es gibt einen Zweig für die Entscheidung und einen zweiten dagegen, die NFM SDE noch verspätet vorzubereiten und durchzuführen. Neben 4 von 4 DE-Niveaus < 4 m ist ein SBO das Einleitungskriterium der NFM SDE. Es wird davon ausgegangen, dass die Mannschaft aus irgendeinem Grund daran gehindert wurde die Notfallmaßnahme SDE zum vorgegebenen Zeitpunkt durchzuführen. Da keine bewusste Entscheidung gegen das Durchführen der NFM getroffen worden ist, wird davon ausgegangen, dass auch zu einem späteren Zeitpunkt nach KSZ eine Entscheidung für das Durchführen sehr wahrscheinlich ist. Insbesondere unter den Randbedingungen des hier vorliegenden Szenarios im dem Falle, dass schon ein PS-Leck entstanden ist und daher eine Angleichung der Druckdifferenz zwischen Primärkreis und Sekundärkreis zur Verhinderung eines möglichen DEHEIRO-Lecks als notwendig erachtet wird. Daher wird hier die Entscheidung für die Durchführung der Maßnahme auf 99 % geschätzt.

Falls hingegen noch kein PS-Leck besteht, ist umgekehrt eine Entscheidung gegen die Maßnahme sehr wahrscheinlich, um keine erhöhte Druckdifferenz zwischen Primär- und Sekundärkreis zu erzeugen. Die Wahrscheinlichkeit sich gegen die NFM SDE zu entscheiden wird auf 99 % geschätzt.

Falls ein genereller Ausfall der sekundärseitigen Wärmeabfuhr vorliegt und die mobile Pumpe nicht einsetzbar ist, wird zu 100 % davon ausgegangen, dass eine Entscheidung gegen die Maßnahme getroffen wird, da laut Handbuch mitigativer Notfallmaßnahmen (HMN) nicht-bespeisbare DE nicht druckentlastet werden sollen.

Im allgemeinen Fall, dass weder SDE noch PDE bisher durchgeführt werden konnten, wird eine Wahrscheinlichkeit von 90 % gegen die NFM SDE angenommen, da sich die Mannschaft laut HMN in diesem Fall auf die Druckentlastung und Bespeisen des Primärkreises konzentrieren soll.

In allen anderen Fällen wird der Zweig Entscheidung gegen NFM SDE gewählt, da davon ausgegangen wird, dass entweder die Randbedingungen nicht vorliegen oder die Maßnahme schon vor KSZ durchgeführt wurde.

Im nächsten Schritt mussten bei der Abfrage zur Durchführung der NFM SDE die Teilarbeitsschritte Druckentlastung und Bespeisung voneinander getrennt werden, da in dem hier behandelten Szenario das DEHEIRO-Leck durch sekundärseitige Druckentlastung induziert wird, ohne dass eine Bespeisung erfolgt. Daher wurde für den Teil sekundärseitige Druckentlastung eine neue Verzweigung erzeugt (mit den beiden Zweigen Druckentlastung (nicht) vor KU durchgeführt).

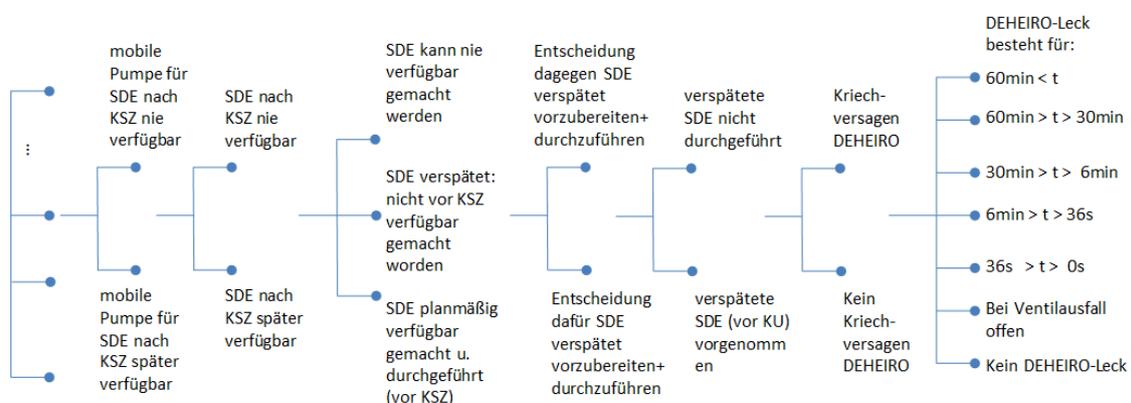


Abb. 5.3 Mitigative NFM SDE und Versagen DEHEIRO: Struktur eingefügter Ergänzungen (anders als hier gezeigt wird jede neue Verzweigung an jeden Zweig der vorhergehenden Verzweigung angefügt)

In der darauf folgenden Verzweigung wird abgefragt, ob ein Dampferzeugerheizrohr unter den Randbedingungen dieses Szenarios versagt oder nicht. Die Wahrscheinlichkeit hierfür ist abhängig vom oben eingeführten Parameter Vorschädigung DEHEIRO und dem Zeitpunkt der Durchführung der NFM SDE. Eine benutzerdefinierte Funktion entscheidet mit dem Operator EQUAL, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Leck entsteht. Bis hier die Wahrscheinlichkeiten der Simulation eingefügt werden können, gibt die Funktion umso höhere Wahrscheinlichkeiten für Entstehung eines Lecks aus je später die NFM SDE durchgeführt wird und je größer die Vorschädigung des DEHEIRO ist.

Dabei werden zusätzlich zwei Fälle unterschieden: Entstehung des DEHEIRO-Lecks bei normaler Funktionalität der DH-Ventile oder unter Ausfall aller DH-Ventile in geschlossenem Zustand und als zweiter Fall, der Ausfall von mindestens einem DH-Ventil in offenem Zustand. In letzterem Fall wurden die Wahrscheinlichkeiten - als erste Einschätzung - auf den halben Wert des ersten Falles gesetzt. Eine mögliche Abhängigkeit vom Zeitpunkt des Ausfalls der Ventile wurde nicht berücksichtigt und wird hinzugefügt, falls die Simulationsergebnisse dies ergeben sollten.

In dem Fall, dass ein Leck entsteht, wird in der folgenden Verzweigung der Einfluss auf die Quellterme vorbereitet. Hier besteht die Annahme, dass das DEHEIRO-Leck keine Druckentlastung des Primärkreises verursacht, sodass weiterhin ein hochdruckbedingtes Versagen einer Primärkreisleitung möglich ist. Im Gegenzug wird angenommen, dass ein zusätzliches Leck im Primärkreis die Freisetzung über das DEHEIRO-Leck nahezu beendet. Hier werden fünf Fälle mit unterschiedlichen Zeitdauern definiert, für die ein DEHEIRO-Leck alleine besteht, bevor ein weiteres Leck im Primärkreis druckentlastet. Für eine Dauer ≥ 60 Minuten wird für das induzierte DEHEIRO-Leck der gleiche Quellterm angenommen wie für ein bei KSZ schon bestehendes DEHEIRO-Leck. Die komplementären Zweige erfassen jeweils 50 % / 10 % / 1 % dieser Zeitspanne bzw. dieses Quellterms. Die Definition des Quellterms in Abhängigkeit des vorliegenden Zeitintervalls erfolgt später im Ereignisbaum. Des Weiteren gibt es die beiden Fälle, in denen kein DEHEIRO-Leck entsteht oder dieses bei Ausfall eines DH-Ventils in Offen-Stellung entsteht (siehe Abb. 5.3).

Der erste Zweig deckt gleichzeitig auch den Fall ab, dass außer dem DEHEIRO-Leck kein weiteres Leck entsteht. In diese Kategorie fällt daher auch, was an maximaler Freisetzung über diesen Pfad möglich ist. Eine Funktion gibt als Output die Differenz zwischen den Zeitpunkten DEHEIRO-Leck und Primärkreisleck in Sekunden aus. Mit diesem Output und den Grenzwerten 0 s / 36 s / 6 min / 30 min / 60 min weist der Operator GETHRESH dem entsprechenden Zweig eine Wahrscheinlichkeit von 100 % zu (siehe Abb. 5.4).

```

§*****
§*****
IQU Wie lange besteht DEHEIRO-Leck (HD-Fall)
$Hier besteht die Annahme, dass DEHEIRO-Leck keine Druckentlastung des PK verursacht
$daher druckbedingtes Versagen PK-Komponente möglich. Versagen würde Freisetzung
$über DEHEIRO-Leck quasi beenden (vernachlässigbar im Vergleich zur freigesetzten Menge
$während DEHEIRO "alleiniges" Leck )

$Dauer des Lecks für FK und Quellterme

#DEHL60: DEHL besteht für 60min < t
#DEHL30: DEHL besteht für 60min > t > 30min
#DEHL06: DEHL besteht für 30min > t > 6min
#DEHL01: DEHL besteht für 6min > t > 36s
#DEHL00: DEHL besteht für 36s > t > 0s
#DEHLxx: DEHL entsteht bei Ventilausfall offen (Druck sinkt nicht schnell genug)
#DEHkL : kein DEHL

BRA DEHL60 DEHL30 DEHL06 DEHL01 DEHL00 DEHLxx DEHkL

$Diese Betrachtung gilt nur bei Lecks mit Ventilausfall "geschlossen"
IF DEHVji * PSIVvg
USE
FUN-DEHLD0
GETHRESH 6 3600 1800 360 36 0 -1.0E9
$abhängig von Differenz DEHLZ und PSDEVZ

$Diese Betrachtung gilt nur bei Lecks mit Ventilausfall "offen"
IF DEHVji * PSIVvo
USE
FUN-DEHLD1
GETHRESH 6 3600 1800 360 36 0 -1.0E9
$-1 als Output

$kein DEHL-Leck
IF COM
USE
FUN-DEHLD2
GETHRESH 6 3600 1800 360 36 0 -1.0E9
$-2.0E9 als Output

```

Abb. 5.4 Screenshot Verzweigung Dauer der Freisetzung über hochdruckinduziertes DEHEIRO-Leck (Auszug aus *Baum.txt*)

Wenn das DEHEIRO-LECK bei offenem Ventilausfall entsteht, gibt eine zweite benutzerdefinierte Funktion „-1,0“ als Output und wird daher dem Zweig „DEHEIRO-LECK entsteht bei Ventilausfall offen“ zugeordnet. Analog wird von einer weiteren Funktion -2.0E9 ausgegeben, um den Fall, dass kein DEHEIRO-Leck entsteht eindeutig abzugrenzen (kleiner als der Grenzwert -1.0E9 und daher durch den GETRHESH-Operator in den letzten Zweig einsortiert; siehe Abb. 5.5 zeigt einen Auszug der entsprechenden Funktionendefinition).

Da in diesem Szenario angenommen wird, dass ein Primärkreisleck die Freisetzung durch ein DEHEIRO-Leck näherungsweise beendet, wird später bei der Zuweisung der Quellterme für den Zweig „DEHEIRO-LECK entsteht bei Ventilausfall offen“ nur ein Hundertstel des Quellterms für den Fall „DEHEIRO-LECK besteht für $36s > t > 0s$ “ gesetzt, sodass diese Freisetzung vernachlässigbar gegenüber allen Fällen mit alleinigem Bestehen des DEHEIRO-Lecks ist.

```

C*****
C*****
C +JOS: 2017-11-28 Zeitdauer DEHEIRO-Leck vor PSDE
C wie lange besteht das DEHEIRO-Leck bevor eine Primärk.komp versagt?

ELSE IF (NAME(1:6).EQ.'DEHLD0') THEN
  CALL START (NAME)
  UFUN= PSDEVZ - DEHLZ
  RETURN
ELSE IF (NAME(1:6).EQ.'DEHLD1') THEN
  CALL START (NAME)
  UFUN= -1.0
  RETURN
ELSE IF (NAME(1:6).EQ.'DEHLD2') THEN
  CALL START (NAME)
  UFUN= -2.0E9
  RETURN
C*****

```

Abb. 5.5 Screenshot der Funktionendefinition, zugehörig zur Verzweigung „Wie lange besteht DEHEIRO-Leck“

Wie im Falle des primärseitigen Lecks wird zwischen Entstehen des Lecks vor und nach KU unterschieden. Daher wurde hier die analoge Abfrage programmiert: Eine benutzerdefinierte Funktion gibt den Quotienten aus „Zeitpunkt Kernumlagerung“ und „Zeitpunkt Entstehen DEHEIRO-Leck“ aus. Mit dem Operator GETHRESH und dem Schwellwert „1,0“ wird bestimmt, welcher der beiden Äste (vor oder nach KU) eine Wahrscheinlichkeit von 100 % erhält (siehe Abb. 5.6).

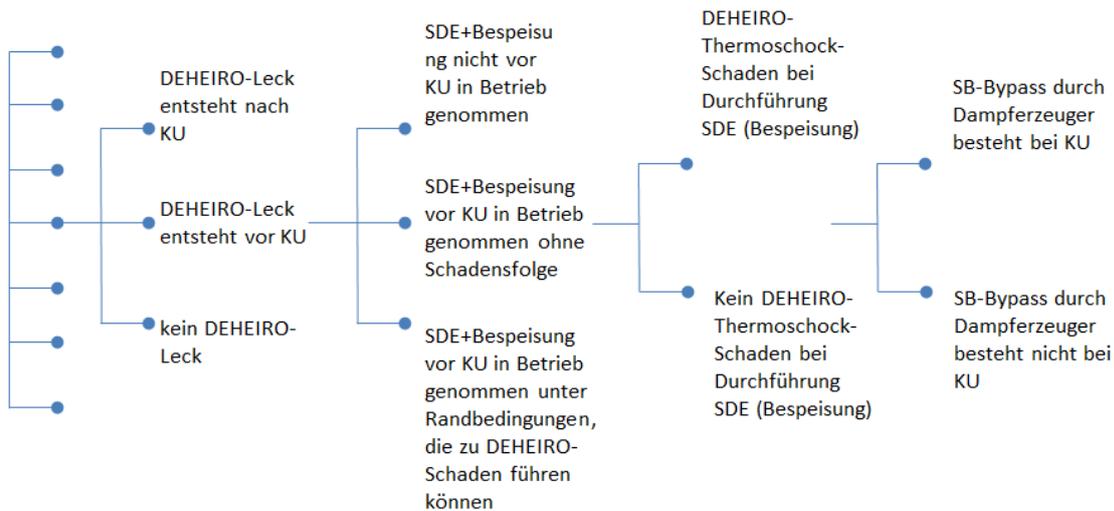


Abb. 5.6 Mitigative NFM SDE und DEHEIRO-Versagen: Struktur der eingefügten Ergänzungen (Fortsetzung von Abb. 5.3)

In die schon im Ereignisbaum vorhandene Frage „Besteht SB-Bypass durch DEHEIRO-Leck bei KU inklusive induziertes Leck“ wird nun das hochdruckbedingte DEHEIRO-Leck eingefügt (mit der Nebenbedingung, dass dieses vor der KU entsteht). Um den Fall zu berücksichtigen, dass das DEHEIRO-Leck nach KU entsteht, wurde in der Phase „bei und nach Kernumlagerung, inkl. RDB-Durchschmelzen bis zum Beginn von Schmelze-Beton-Wechselwirkung“ nach dem Pfad „Primärseitige Druckentlastung zwischen KU und RDB-Versagen durch PS-Rohrleck“ eine Verzweigung eingefügt. Diese fragt nach der Entstehung eines SB-Bypasses nach KU und hat zwei Zweige mit positiver und negativer Antwort.

Die erfolgreiche Wiederherstellung der sekundärseitigen Bespeisung nach Druckentlastung der DE wird der Verzweigung „maximaler Druck auf SB-Schale vor Kernumlagerung inklusive H₂-Verbrennung“ hinzugefügt, die die Gefährdung durch Wasserstoffbrände untersucht. Hier steigt die Gefährdung, da sich bei funktionierender sekundärseitiger Wärmeabfuhr weniger Dampf im SB befindet. Mögliche positive Effekte der Wiederherstellung der sekundärseitigen Bespeisung nach Druckentlastung der DE für den weiteren Unfallablauf, kommen im Ereignisbaum bisher nicht vor und konnten in diesem Vorhaben nicht ermittelt werden (vermutlich stark abhängig von den Bedingungen im Primärkreis wie z. B. Vorhandensein von Hauptkühlmittel, Dampfgehalt etc.).

In der schon vorhandenen Frage „Findet Hauptfreisetzung vor bzw. nach anlagenexternen NFM zum Schutz der Bevölkerung statt?“ im Teil „Ergebnisdarstellung“ des Ereignisbaumes werden die Zweige DEHEIRO-Leck vor oder nach KU im zusammenfassenden Fall „SB-Bypass durch DEHEIRO“ wieder vereint.

Prinzipiell wäre damit das Einfügen dieses Szenarios abgeschlossen, da die Wahrscheinlichkeit für die Leckentstehung in die Gesamtwahrscheinlichkeit eines SB-Bypasses durch DEHEIRO-Lecks eingeht und damit bis ans Ende des vorhandenen Baums in die Freisetzungskategorien fortgeführt wird. Allerdings soll hier noch die oben definierte Zeitdauer, in der ein alleiniges DEHEIRO-Leck eine Freisetzung verursacht, bei der Festlegung der Quellterme berücksichtigt werden. Daher wird im Bereich „Ergebnisdarstellung“ der Ereignisbaumeingabedatei in der Verzweigung „Quellterme in Anteilen des Inventars“ der Fall „Quellterm bei DEHEIRO-Leck, Frischdampfventil mind. zeitweise offen“ (dieser vereinigt alle im Baum berücksichtigten Fälle mit DEHEIRO-Leck) in sechs verschiedene Fälle aufgeteilt: alle fünf Fälle mit oben berechneter Freisetzungsdauer (Dauer alleiniges DEHEIRO-Leck > 0 s, geschlossener DH-Ventilausfall) und ein Fall, der alle noch übrigen (schon vorher im Ereignisbaum vorhandenen) Fälle mit DEHEIRO-Leck bündelt.

Dabei wurde angenommen, dass die Freisetzung zeitlich linear erfolgt. Bei einem alleinigen Bestehen des DEHEIRO-Lecks > 60 min wird angenommen, dass derselbe Anteil (100 %) an freigesetztem Kerninventar wie bei einem DEHEIRO, das schon bei KSZ vorlag, freigesetzt wird. Dieser Quellterm ist schon im Ereignisbaum vorhanden. Beim Zeitintervall $60 \text{ min} > t \geq 30 \text{ min}$ wurde entsprechend ein Anteil von 75 % gewählt, da das DEHEIRO-Leck hier zwischen 50 % und 100 % von 60 min (Zeitdauer, in der 100 % des Quellterms freigesetzt werden) besteht. Diese Werte sollen dann im Rahmen einer im nächsten Arbeitsschritt erfolgenden Unsicherheitsanalyse variiert werden (z. B. Gleichverteilung mit 75 % freigesetzter Menge als Mittelwert).

Hierdurch sind alle eingefügten Verzweigungen mit ihren Konsequenzen einschließlich der Quellterme berücksichtigt.

5.4 Zusammenfassung der Integration von MCDET-Analysen in den Ereignisbaum

Der im Vorhaben RS1529 von der GRS verfolgte Ansatz, mit einem probabilistisch gesteuerten Satz von deterministischen Rechenläufen (MCDET-Technik) viele der beitragenden Unsicherheiten korrekt zu erfassen, ist den herkömmlichen Ansätzen grundsätzlich überlegen. Methodisch ähnlich scheint der US-Ansatz zu sein (Kapitel 5.1 - USA/NRC 1998), bei dem mit einem vereinfachten deterministischen Simulationsmodell viele Variationen durchgerechnet werden können.

Der Fortschritt gegenüber herkömmlichen Ansätzen hängt u. a. davon ab, inwieweit zur Erzielung vieler Rechenläufe Vereinfachungen erforderlich sind, die die Ergebnisse ggf. ungenau werden lassen. Dies lässt sich durch Verifikation der Rechenmodelle abschätzen bzw. minimieren.

Sofern der Zweck der Analysen ausschließlich darin besteht (wie im Vorhaben RS1529), die Wahrscheinlichkeit für induzierte DEHEIRO-Lecks zu ermitteln, ist die MCDET-Methode eindeutig vorteilhaft gegenüber einer Ereignisbaumanalyse. Falls jedoch (wie im hier vorliegenden Vorhaben) ein umfassender Ereignisbaum gebildet werden soll, müssen die mit der MCDET-Technik erzielten Wahrscheinlichkeiten in den Ereignisbaum übertragen werden. Dabei müssen Ablaufgruppen mit ähnlichen Eigenschaften bezüglich der DEHEIRO-Problematik gebildet werden. Die mit MCDET mögliche Identifizierung sensitiver Parameter ist dabei eine gute Hilfe. Sofern auch Unsicherheiten der Wahrscheinlichkeiten übertragen werden sollen, erfordert dies eine möglichst genaue ablaufgruppenweise Ermittlung der Unsicherheiten in MCDET und die entsprechende Übergabe in den Ereignisbaum. Dies war im vorliegenden Vorhaben allerdings noch nicht möglich, weil die Ergebnisse der MCDET/ATHLET-CD Analyse zum thermisch induzierten DEHEIRO-Versagen in einem Hochdruck Szenario noch nicht vorlagen.

6 Ergebnisauswertung

Der vorliegende Abschnitt dient dazu, einen Eindruck von den Auswertemöglichkeiten der Ereignisbaumanalyse zu vermitteln. Der hier entwickelte Ereignisbaum enthält Eingabewerte, die als typisch bezeichnet werden können, für die jedoch keine weiterführenden Betrachtungen und kaum anlagenspezifische Analysen vorliegen.

Alle nachfolgenden Angaben zu Zahlenwerten beruhen auf einer Ereignisbaumanalyse, bei der der Anfangswert (d.h. die Summe aller Schadenszustände im RDB und im BE-Lagerbecken) auf $10^{-6}/a$ gesetzt wurde. Deshalb ist es auch nicht zulässig, die hier dargestellten Ergebnisse für Schlussfolgerungen zur Anlagensicherheit zu verwenden.

Die Ereignisbaumanalyse mit EVNTRE und SUSA bietet sehr flexible Auswertungsmöglichkeiten. Im Rahmen der hier vorgenommenen methodischen Entwicklung werden beispielhaft folgende Fragen zur Ergebnisauswertung formuliert:

- SB-Versagen:
 - Wie wahrscheinlich ist frühes / spätes Versagen?
(Punktwerte und Unsicherheiten)
 - Wie wahrscheinlich ist ein SB-Bypass?
(Punktwerte und Unsicherheiten)
- Radionuklidfreisetzungen:
 - Wie wahrscheinlich ist eine Cs-Freisetzung von mehr als 10^{16} Bq?
 - Wie hoch ist das gesamte Quelltermrisiko?
 - Wie tragen BE-Lagerbecken und RDB zum Quelltermrisiko bei?

6.1 SB-Versagen und Freisetzungskategorien

6.1.1 Ergebnisauswertung: SB-Versagen

Die Punktwerte für Gruppen von SB-Endzuständen können aus der Sortieroutine für die EVNTRE-Ergebnisse (siehe Abb. 6.1) entnommen werden.

```

Merkmal-Nr. 1 Name: SIOVE   mittl. Wahrsch.: 0.51726E-07
Merkmal-Nr. 2 Name: SIVE   mittl. Wahrsch.: 0.64340E-06
Merkmal-Nr. 3 Name: SVPs   mittl. Wahrsch.: 0.61904E-07
Merkmal-Nr. 4 Name: SVSs   mittl. Wahrsch.: 0.16419E-06
Merkmal-Nr. 5 Name: SVPf   mittl. Wahrsch.: 0.56578E-08
Merkmal-Nr. 6 Name: SVOL   mittl. Wahrsch.: 0.70006E-07
Summe aller Wahrsch. dieser Kategorie: 9.96880317E-07

```

Abb. 6.1 Auflistung der Ergebnisse für die SB-Endzustände (Ausschnitt aus der SORTPRI.OUT-Datei)

Darin steht der SB-Endzustand „SIVE“ für einen intakten SB mit Druckentlastung, „SVPs“ für ein Überdruckversagen des SB > 10 h nach dem auslösenden Ereignis, „SVSs“ für ein Durchschmelzen > 10 h nach dem auslösendem Ereignis, „SVPf“ für ein Überdruckversagen oder Leck des SB < 10 h nach dem auslösenden Ereignis und „SVOL“ für einen offenen SB wegen eines Versagens des SB-Lüftungsabschlusses.

Die einzelnen Zahlenwerte zur Charakterisierung des SB-Versagens sind in Tab. 6.1 enthalten.

Tab. 6.1 Versagenswahrscheinlichkeiten des SB

	SB-Bypass	frühes SB-Versagen	spätes SB-Versagen	SB intakt
Name	SVOL	SVPf	SVSs	SIVE
Mittelwert	0.70006E-07	0.56578E-08	0.16419E-06	0.64340E-06
5%-Fraktile	0.59852E-07	0.49279E-08	0.13081E-06	0.60589E-06
50%-Fraktile (Median)	0.69637E-07	0.56263E-08	0.16299E-06	0.64321E-06
95%-Fraktile	0.80886E-07	0.64688E-08	0.19760E-06	0.68322E-06

Exemplarisch für den SB-Bypass wurde der SB-Endzustand „SVOL“ gewählt. Das frühe SB-Versagen wird durch den SB-Endzustand „SVPf“ beschrieben bzw. das späte SB-Versagen durch den SB-Endzustand „SVSs“. Der SB-Endzustand „SIVE“ beschreibt einen intakten SB bzw. ein Szenario mit Druckentlastung.

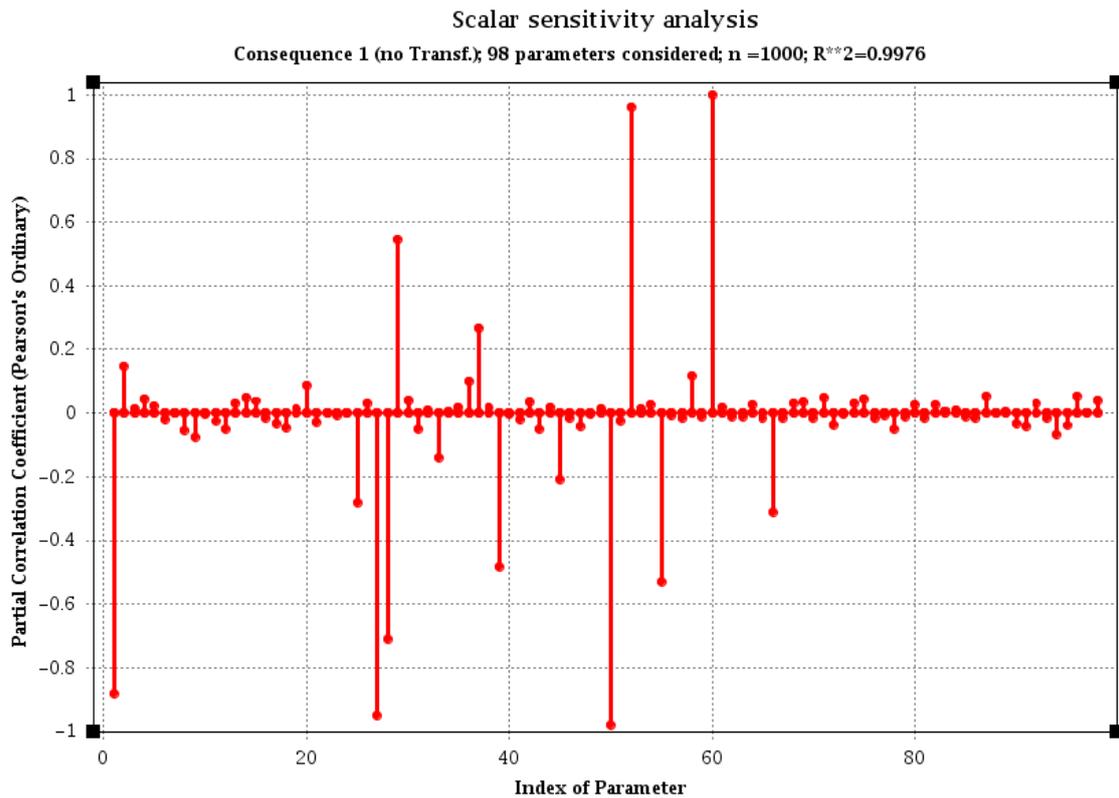


Abb. 6.2 Sensitivitätsanalyse des SB-Endzustands SVPf (Überdruckversagen oder Leck des SB < 10 h nach auslösendem Ereignis)

Abb. 6.2 zeigt eine Sensitivitätsanalyse des SB-Endzustands „SVPf“, welcher ein Überdruckversagen oder ein Leck des SB<10h nach einem auslösendem Ereignis beschreibt.

In der Sensitivitätsanalyse wurde der Parameter 60 („SBLPR“, der SB versagt wegen Überdruck bis vor MCCI) von 0.0 bis 0.2 um den Mittelwert 0.105 variiert, d. h. es wurde eine Wahrscheinlichkeit von 0 bis 20 % für die Wahrscheinlichkeit eines SB-Überdruckversagens mit einem von Mittelwert 10,5 % (Mittelwert aus /GRS 01/) angenommen. Der Parameter zeigt eine sehr stark positive Korrelation (+1,0), da er eine zentrale Verzweigung zum SB-Endzustand „SVPf“ darstellt.

Der Parameter 52 („p(RDBVGR)“, RDB-Boden versagt mit großem Leck (> 3.6 m²)), der von 0.02 bis 0.08 (Eintrittswahrscheinlichkeit von 2 bis 8 %) um den Mittelwert 0.05 (5 %, s. /GRS 01/) variiert wurde, zeigt eine stark positive Korrelation. Kommt es also zu einem RDB-Versagen, ist es wahrscheinlich, dass der SB durch den folgenden Druckaufbau frühzeitig versagen wird.

Der Parameter 50 („Primärseitige aktive Druckentlast.“) der von 0.0 bis 0.1 (Eintrittswahrscheinlichkeit von 0 bis 10 %) um den Mittelwert 0.05 (5 %, siehe /GRS 01/) variiert wurde, korreliert stark negativ (-1.0). Dies zeigt, dass eine primärseitige aktive Druckentlastung zwischen der Kernumlagerung und dem RDB-Versagen zu keinem frühzeitigen SB-Versagen führt, da der Druck im Primärsystem frühzeitig abgebaut wird und so eine Zerstörung des SB durch den RDB verhindert werden kann.

Der Parameter 27 („PSDnl“ , Niederdruck im Primärsystem, so dass jede Art von Einspeisung möglich ist) wurde von 0.6 bis 1.0 (Eintrittswahrscheinlichkeit von 60 bis 100 %) mit dem Mittelwert 0.8 (80 %, s. /GRS 01/) variiert. Die starke negative Korrelation zeigt, dass wenn im Primärsystem ein Niederdruck vorliegt, ein frühzeitiges SB-Versagen fast ausgeschlossen werden kann, da verschiedene Arten von Einspeisungen in das Primärsystem möglich sind, die den weiteren Unfallablauf abmildern bzw. verhindern können.

6.1.2 Ergebnisauswertung: Freisetzungskategorien

Die Eintrittswahrscheinlichkeiten für Freisetzungskategorien (siehe auch Tab. 2.4 und Tab. 2.5) können dem EVNTRE-Ergebnisfile BAUM.STO direkt entnommen werden (siehe Abb. 6.3):

```

A Freisetzungskategorien
DEP. INPUT PROB.
                                432276415
  FByRR   FByDE   FSBof   FSBRbf   FSBos   FSBRbs   FSBbRi   FFVv   FFVi   FSBi
    1       2       3       4       5       6       7       8       9      10
5.595E-04 6.209E-02 4.875E-04 6.081E-03 8.112E-02 1.828E-01 4.562E-02 8.364E-03 6.462E-01 5.845E-02

```

Abb. 6.3 Eintrittswahrscheinlichkeiten für verschiedene Freisetzungskategorien (Ausschnitt aus der BAUM.STO-Datei)

Dabei stehen

- „FByRR“ für ein PS-Leck zum Ringraum ohne sonstige wesentliche Rückhaltung,
- „FByDE“ für ein DEHEIRO-Leck mit mindestens zeitweise offenen Frischdampfventilen,
- „FSBof“ für einen offenen SB mit einer frühen Freisetzung vor anlagenexternen NFM,
- „FSBRbf“ für einen beschädigten SB und beschädigten Ringraum mit einer frühen Freisetzung zeitlich vor den anlagenexternen NFM,

- „FSBos“ für einen offenen SB mit später Freisetzung nach anlagenexternen NFM,
- „FSBRbs“ für einen beschädigten SB und beschädigten Ringraum mit einer späten Freisetzung nach anlagenexternen NFM,
- „FSBbRi“ für einen beschädigten SB und einen dauerhaft auslegungsgemäßen dichten Ringraum,
- „FFVv“ für einen intakten SB mit Venting, wobei die Ventingfilterung nicht auslegungsgemäß funktioniert,
- „FFVi“ für einen intakten SB mit Venting, wobei die Ventingfilterung auslegungsgemäß funktioniert und
- „FSBi“ für eine Freisetzungskategorie in der der SB und RR auslegungsgemäß dicht sind.

In Abb. 6.3 sind für die einzelnen Freisetzungskategorien die jeweiligen Verzweigungswahrscheinlichkeiten angegeben. So enden beispielsweise 64,62 % aller Szenarien in einem Ventingszenario mit intakter Filterung („FFVi“).

Die Unsicherheitsbandbreite und Verteilung der Freisetzungskategorien ergibt sich durch eine Auswertung der Ausgabedatei EVNRES.SORTIERT.txt oder durch eine entsprechende Ausgabe der GRS-Software SUSAS. Für jedes einzelne der 1000 Monte-Carlo-Simulationen gibt es eine Wahrscheinlichkeit für die verschiedenen Freisetzungskategorien. Diese können grafisch z. B. durch eine Verteilungsfunktion der Wahrscheinlichkeit über alle MC-Simulationen dargestellt werden (siehe z. B. Abb. 6.4).

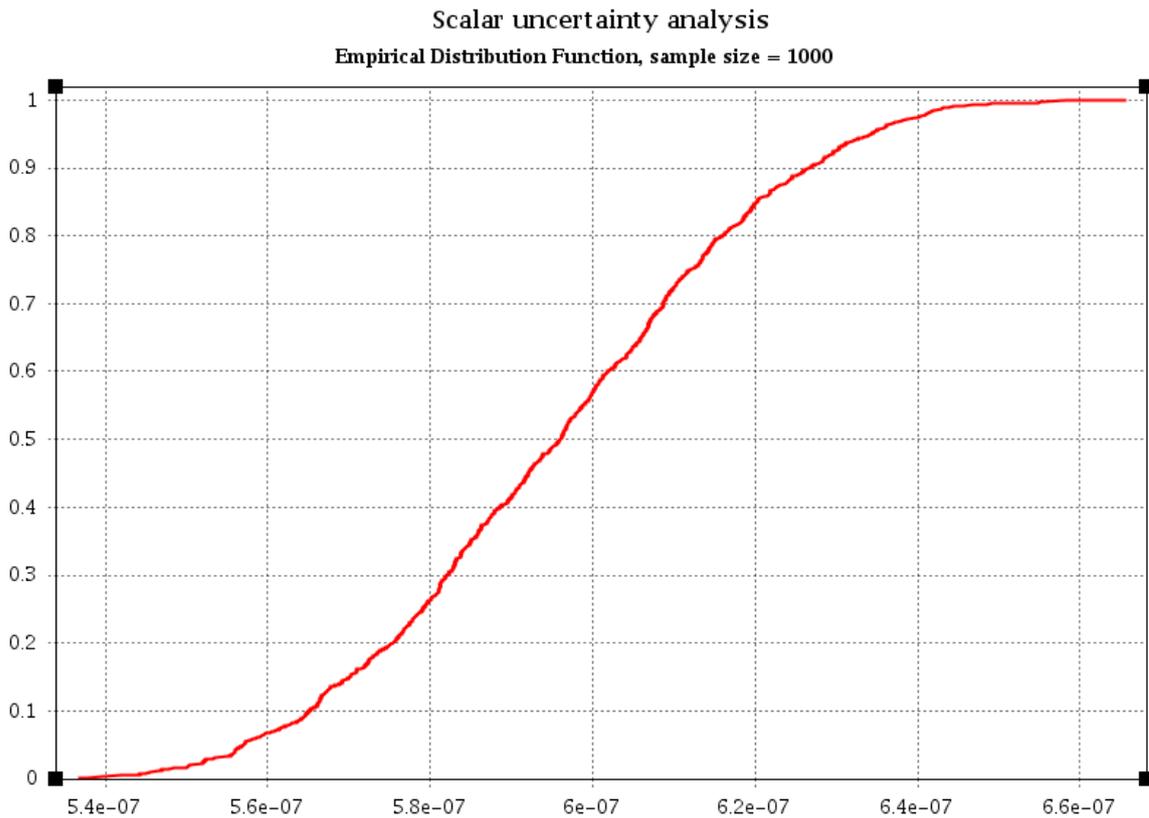


Abb. 6.4 Verteilungsfunktion der Wahrscheinlichkeit für die Freisetzungskategorie „FFVi“ (SB intakt mit Venting, Ventingfilterung funktioniert auslegungsgemäß)

In der Abb. 6.4 ist die Verteilungsfunktion der Eintrittswahrscheinlichkeit für die Freisetzungskategorie FFVi dargestellt. Diese Freisetzungskategorie beschreibt ein Ventingsszenario bei einem intakten Sicherheitsbehälter, wobei die Filterung auslegungsgemäß funktioniert. Ablesbar sind die Breite der Verteilung von $5.4E-07$ bis $6.6E-07$ und ein Medianwert (50 % aller Werte liegen unterhalb dieses Wertes) von $5.96E-07$ für eine Wahrscheinlichkeit eines Eintritts dieses Szenarios.

Die hauptsächlichen Ursachen für die Unsicherheiten werden von SUSA ermittelt und in Form einer Grafik ausgegeben – siehe hierzu z. B. die Abb. 6.5.

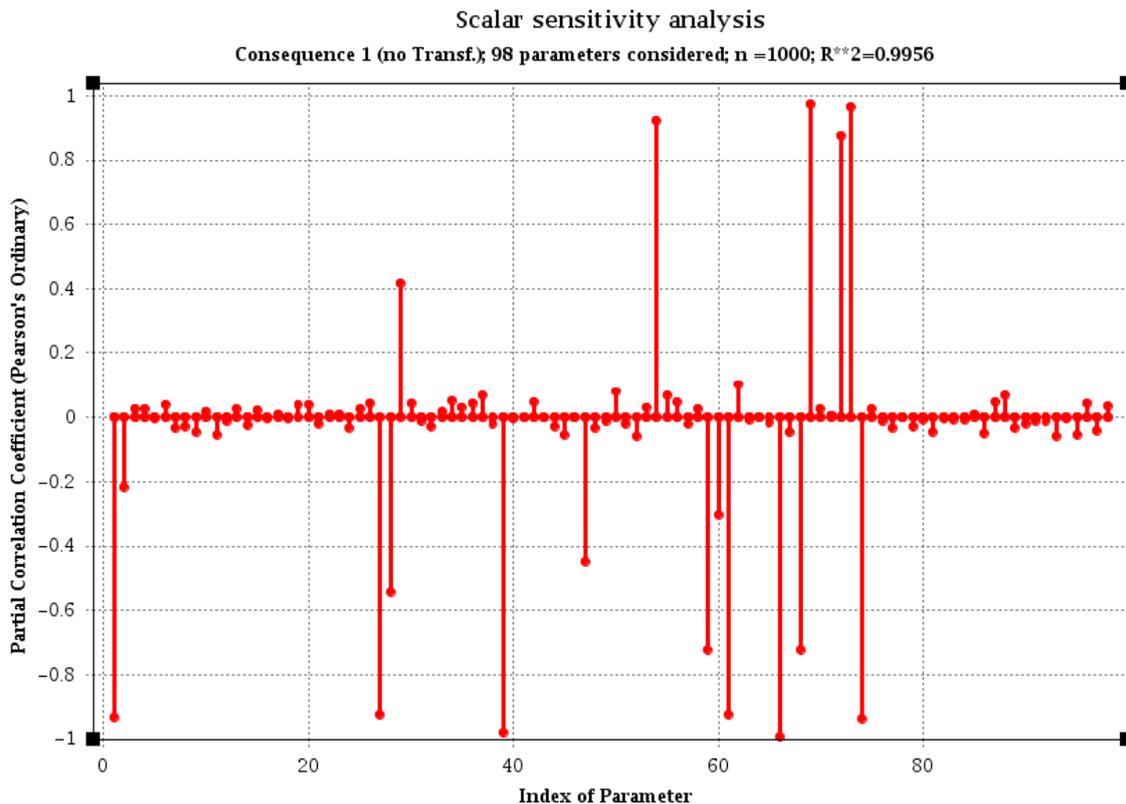


Abb. 6.5 Sensitivitätsanalyse der Parameter für die Freisetzungskategorie FFViA (SB intakt mit Venting, Ventingfilterung funktioniert auslegungsgemäß)

Abb. 6.5 zeigt die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse der Parameter bei der Bestimmung von Unsicherheiten für die Freisetzungskategorie FFViA. Aus dieser Abbildung wird die Sensitivität einzelner Parameter sichtbar.

Beispielsweise ist der Parameter 66 („SVSM“, Frage nach dem Durchschmelzen des SB) dominant, d. h. er besitzt einen Korrelationskoeffizienten, der sich signifikant vom Grundrauschen abhebt, in diesem Fall ca. -1.0. Dieser Parameter SVSM ("Durchschmelzen des SB (Sumpfansaugrohr, rad BELB-Versagen") wurde von 0.0 bis 0.1 (Eintrittswahrscheinlichkeit von 0 bis 10 %) um den Mittelwert 0.05 (5 %, siehe /GRS 01/) variiert. Die Antikorrelation (negatives Vorzeichen) drückt sich dabei so aus, dass ein Durchschmelzen des SBs zu keiner Freisetzung mehr über das Ventingsystem führt.

Der Parameter 69 („Venting wird durchgeführt“) wurde um den Mittelwert 0.98 (98 %, siehe /GRS 01/) von 0.96 bis 1.0 (Eintrittswahrscheinlichkeit von 96 bis 100 %) variiert. Er führt erwartungsgemäß zu einer stark positiven Korrelation von nahezu 1.0 in Bezug

auf eine auslegungsgemäße Freisetzung über das Ventingsystem und zeigt u. a. auf, dass die Ereignisbaumstruktur logisch korrekt verzweigt wurde.

Der Parameter 39 („BS-Umlag. Kern findet nicht statt“) führt zu einer dominanten, negativen Korrelation von nahezu 1.0. Eine Brennstoffumlagerung (BS-Umlag.) im Kern führt über ein wahrscheinliches Versagen des RDBs zu einem Druckaufbau im SB. Dieses Szenario mit einem Druckaufbau endet dann mit einer hohen Wahrscheinlichkeit in der Freisetzungskategorie FFViA (Venting mit auslegungsgemäßer Filterung).

Die Korrelationswerte und damit die Sensitivitäten der 98 Parameter verhalten sich erwartungsgemäß in Bezug auf die analysierte Freisetzungskategorie. Zu beachten ist, dass sich die Wahl der Unsicherheitsverteilung (homogen, Dreieck oder andere) und die genaue Bandbreite der angenommenen Unsicherheiten auf den exakten Korrelationswert auswirken kann. Eine Analyse von Simulationsergebnissen mit einer Variation der Verteilungsformen wurde im Rahmen der Arbeiten nicht durchgeführt.

6.2 Radionuklidfreisetzungen

Die Wahrscheinlichkeit für eine Cs-Freisetzung von mehr als 10^{17} Bq kann dem Ergebnis der folgenden Sortieroutine entnommen werden (siehe Abb. 6.6):

```
Merkm-Nr.  1 Name: CGT18  mittl. Wahrsch.: 0.00000E+00
Merkm-Nr.  2 Name: CGT17  mittl. Wahrsch.: 0.59956E-08
Merkm-Nr.  3 Name: CGT16  mittl. Wahrsch.: 0.91291E-07
Merkm-Nr.  4 Name: CGT15  mittl. Wahrsch.: 0.16707E-06
Merkm-Nr.  5 Name: CGT14  mittl. Wahrsch.: 0.50728E-07
Merkm-Nr.  6 Name: CGT13  mittl. Wahrsch.: 0.57794E-07
Merkm-Nr.  7 Name: CGT12  mittl. Wahrsch.: 0.47269E-06
Merkm-Nr.  8 Name: CLT12  mittl. Wahrsch.: 0.15134E-06
Summe aller Wahrsch. dieser Kategorie: 9.96915787E-07
```

Abb. 6.6 Auflistung der Cäsium-Aktivitätsfreisetzungen aus der Datei SORTPRI.OUT

Es zeigt sich, dass beispielsweise die mittlere Wahrscheinlichkeit für Freisetzungen zwischen 10^{17} und 10^{18} Bq („CGT17“) den Wert $0.6 \cdot 10^{-8}$ annimmt.

Das Quelltermrisiko (Produkt aus Freisetzungswahrscheinlichkeit $[1/a]$ und freigesetzter Gesamtaktivität der Radionuklide $[Bq]$) wird im nutzerdefinierten Unterprogramm für jede einzelne Monte-Carlo-Simulation sowohl für Freisetzungen aus dem RDB als auch aus dem Brennelementlager bestimmt und von dort an den Nutzer ausgegeben (siehe Abb. 6.6). Aus dieser Ausgabe kann die Verteilung des Quelltermrisikos in grafischer Form oder als Angabe von Fraktile hergeleitet werden (siehe Abb. 6.7 und Abb. 6.8).

WRITE BINNING INFORMATION

Ende eines MC-Laufes:

Quelltermrisiko aus BE-Lager Bq/a: $1.81905879E+10$

Quelltermrisiko aus RDB Bq/a: $1.44941318E+11$

gesamtes Quelltermrisiko Bq/a: $1.63131900E+11$

Abb. 6.7 Beispiel der Ergebnisse der Quelltermrisikoberechnung aus der PROTOKOL.TXT-Datei

Die einzelnen Zahlenwerte zur Charakterisierung der Quelltermrisiken aus den Abb. 6.8 und Abb. 6.9 sind in Tab. 6.2 enthalten.

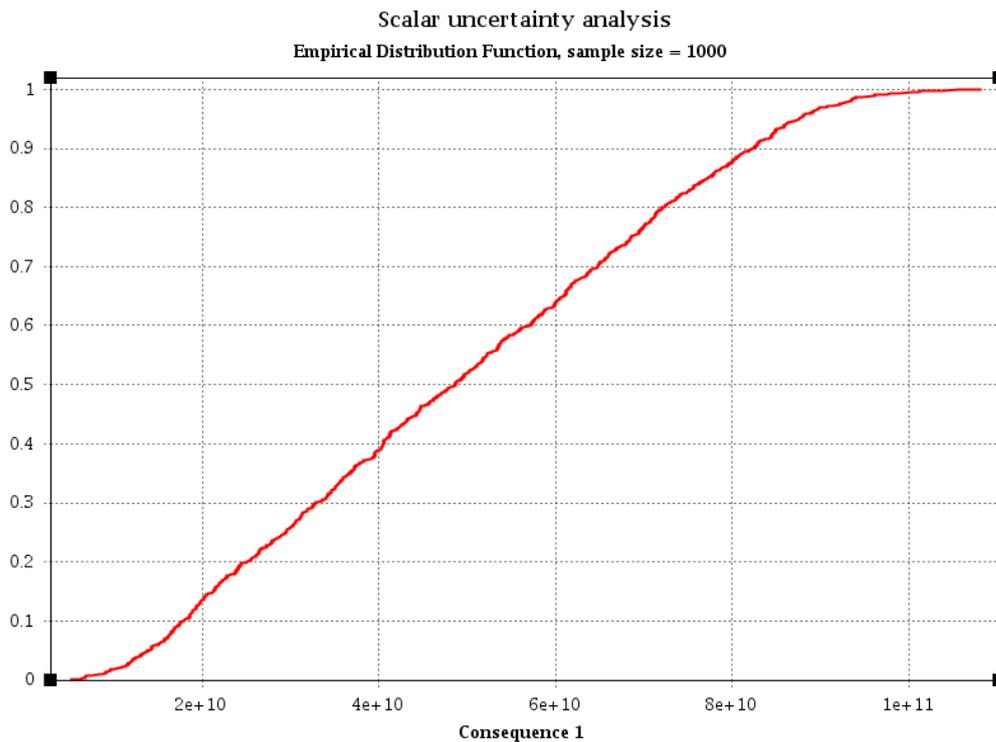


Abb. 6.8 Verteilungsfunktion des Quelltermrisikos aus dem BE-Lager $[Bq/a]$

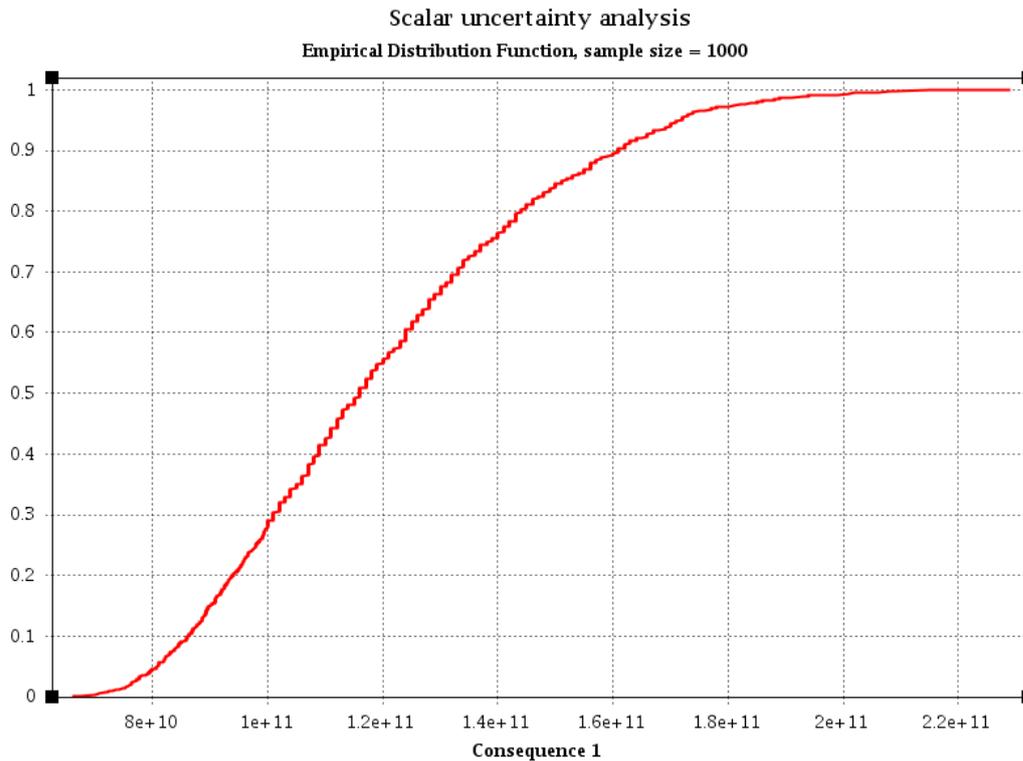


Abb. 6.9 Kumulierte Verteilungsfunktion des Quelltermrisikos aus dem RDB [Bq/a]

Tab. 6.2 Zahlenwerte der Quelltermrisiken für den RDB und das BELB

	Quelltermrisiko RDB (Bq/a)	Quelltermrisiko BE-Lager (Bq/a)	Quelltermrisiko gesamt (Bq/a)	Wahrsch. für Freisetzung >10 ¹⁷ Bq Cs
Mittelwert	1,2E+11	4,9E+10	1,7E+11	0,6E-8
5%-Fraktile	8,0E+11	1,3E+10	8,1E+11	0,5E-8
50%-Fraktile (Median)	1,2E+11	4,9E+10	1,7E+11	0,6E-8
95%-Fraktile	1,7E+11	8,8E+10	2,6E+11	0,7E-8

Es zeigt sich, dass das über die Monte-Carlo-Simulationen gemittelte Quelltermrisiko des BELB etwa um eine Größenordnung geringer ist als das des RDB. Die Freisetzungswahrscheinlichkeiten für Cs-Aktivitäten, die größer als 10¹⁷ Bq sind, liegt in der Größenordnung von 10⁻⁸.

6.3 Ermittlung der absoluten Wahrscheinlichkeit für ein DEHEIRO-Leck

Im Folgenden wird in Fortführung zu Abschnitt 5 auf die Ermittlung der absoluten Wahrscheinlichkeiten für ein DEHEIRO-Leck eingegangen. Ausführlichere Ergebnisse und weiterführende Dokumentationen finden sich in Kapitel 3 von /JOS 18/.

Die Wahrscheinlichkeit für die Entstehung eines DEHEIRO-Lecks liegt in den Analysen bei $< 1,0E-20$ im Falle eines Ausfalls des DH-AV und beider DH-SIV in geschlossenem Zustand. Bei normaler Funktionalität der Ventile erhält man einen Wert von $8,6E-11$. Bleibt mindestens eines der DH-Ventile nach Anforderung in Offen-Stellung stehen ergibt sich eine Wahrscheinlichkeit von $3,7E-10$ (siehe Markierungen in Abb. 6.10, unterschieden sind die Fälle „Ausfall der Ventile geschlossen“ (grün markiert) / „kein Ausfall“ (blau markiert) / „Ausfall offen“ (rot markiert)). Die Wahrscheinlichkeit für das Entstehen eines DEHEIRO-Lecks ergibt sich aus acht verschiedenen Randbedingungen, die gleichzeitig erfüllt sein müssen. In Abb. 6.10 wird für die Verzweigung „Kriechversagen DEHEIRO zwischen KSZ und KU“ zwischen vier Fällen unterschieden. Es gibt die beiden Zweige „DEHVjI (Kriechversagen) DEHEIRO“ und „DEHVnI (kein Kriechversagen DEHEIRO)“ (die detaillierten Randbedingungen finden sich im Fachbericht /JOS 18/).

```

***** QUESTION: 81 Kriechversagen DEHEIRO zw KSZ und KU
Q-TYPE/TIMES ASKED: DEP. CALC. PROB. 73244
BRANCHES: DEHVjI DEHVnI
            1 2
REALIZED SPLIT: 4.510E-10 1.000E+00

SUMMARY BY CASE

CASE NUMBER/SPLIT: 1 0.000E+00
DEPENDENCIES: 80 78 17 10 48 55 50 76
REQ. BRANCHES: ( 2 + 1) * 3 * 4 * /2 * /1 *( 2) * 1
DESCRIPTION: SDEjI SDEvnI PSDhK EBunvK /PDEjI /PSLLj PSIVVg SDEPn
CASE/BRANCH SPLIT: 0.000E+00 0.000E+00

CASE NUMBER/SPLIT: 2 6.458E-08
DEPENDENCIES: 80 78 17 10 48 55 50 76
REQ. BRANCHES: ( 2 + 1) * 3 * 4 * /2 * /1 *( 3) * 1
DESCRIPTION: SDEjI SDEvnI PSDhK EBunvK /PDEjI /PSLLj PSIVVn SDEPn
CASE/BRANCH SPLIT: 8.560E-11 6.449E-08

CASE NUMBER/SPLIT: 3 5.725E-07
DEPENDENCIES: 80 78 17 10 48 55 50 76
REQ. BRANCHES: ( 2 + 1) * 3 * 4 * /2 * /1 * 1 * 1
DESCRIPTION: SDEjI SDEvnI PSDhK EBunvK /PDEjI /PSLLj PSIVVo SDEPn
CASE/BRANCH SPLIT: 3.654E-10 5.722E-07

CASE NUMBER/SPLIT: 4 1.000E+00
DESCRIPTION: $IF COM
CASE/BRANCH SPLIT: 0.000E+00 1.000E+00

```

Abb. 6.10 Auszug aus der Ergebnisdatei *BAUM.STO*: absolute Wahrscheinlichkeit, dass ein DEHEIRO-Leck unter den Randbedingungen des hier beschriebenen Szenarios entsteht

Der vierte Fall („IF COM“, siehe Abb. 6.10) fasst alle übrigen Fälle zusammen, in denen die Randbedingungen für ein DEHEIRO-Leck nicht vorliegen. Hier wird zu 100 % angenommen, dass es kein Kriechversagen eines DEHEIROs gibt.

```

***** QUESTION: 87 A Besteht ein SB-Bypass durch DEHL bei KU inkl. ind. Leck ?
Q-TYPE/TIMES ASKED: DEP. INPUT PROB. 119091
BRANCHES: SBYDjI SBYDnI
           1 2
REALIZED SPLIT: 5.523E-02 9.448E-01

```

Abb. 6.11 Auszug aus der Ergebnisdatei *BAUM.STO*: absolute Wahrscheinlichkeit, dass ein SB-Bypass durch DEHEIRO-Leck entsteht/nicht entsteht (SBYDjI/SBYnI).

Das Kriechversagen eines „DEHEIRO vor KU“ (siehe Zweig „DEHVjI“ oben in Abb. 6.10) trägt nur mit 4,51E-8 % zu den 5,523 % der Gesamtwahrscheinlichkeit eines SB-Bypasses bei KU bei (siehe Zweig „SBYDjI“ in Abb. 6.11).

6.4 Schlussfolgerungen zur Ergebnisauswertung

Die hier vorgestellte Ergebnisauswertung erlaubt folgende Schlüsse in Bezug auf die betrachtete Anwendung:

Aus den Analysen des SB-Verhaltens zeigt sich, dass ein spätes SB-Versagen bzw. ein intakter SB unter den möglichen SB-Endzuständen im Verlauf eines schweren Unfalls am wahrscheinlichsten sind. Dies zeigt, dass der SB eine wirkungsvolle Barriere für die Freisetzung von Radionukliden in die Anlagenumgebung während und nach einem schweren Unfall ist.

Die unsicheren Parameter bezüglich des Druckes im Primärsystem, eines Eintritts eines RDB-Versagens oder der Erfolgsaussichten von Venting schlagen besonders auf die Unsicherheiten der Endergebnisse durch.

In Bezug auf die Ereignisbaumtechnik und die Auswertemöglichkeiten ist festzuhalten, dass der Nutzer völlige Flexibilität hat, und alle innerhalb des Ereignisbaumes vorhandenen Daten in beliebiger Weise, auch in Kombinationen, auswerten kann. Eine methodische Begrenzung existiert praktisch nicht. Dies liegt insbesondere daran, dass EVNTRE eine Schnittstelle zu einem nutzerdefinierten Unterprogramm hat, in dem mit relativ geringem Aufwand die interessierende Aspekte separiert und analysiert werden können. In Bezug auf eine anschließende Sensitivitätsanalyse bietet das GRS-Rechenprogramm SUSA alle erforderlichen Möglichkeiten.

Aus den Ergebnissen der Untersuchungen hat sich gezeigt, dass neben der automatisierten Schnittstelle zwischen SUSA und EVNTRE auch eine graphische Darstellung der Analyseergebnisse bzw. der Ereignisbaumstruktur notwendig ist. Durch eine „Online“-Ergebnisdarstellung der wichtigsten Werte und eine übersichtliche Darstellung der Baumstruktur (und insbesondere seiner Verzweigungen) können die Auswirkungen von Änderungen, beispielsweise an Parametern und ihrer Unsicherheiten, schneller quantifiziert werden.

Ein zusätzlicher Weiterentwicklungsbedarf hinsichtlich der Ergebnisse besteht in einer tiefergreifenden Analyse der statistischen Ergebnisse. So werden sich andere Unsicherheitsverteilungsformen und Auswerteverfahren im Hinblick auf statistische Kennzahlen wie die Korrelation auf die Ergebnisse auswirken.

7 Zusammenfassung

Der generische Ereignisbaum wurde um Kombinationen aus Einwirkungen von außen und innen, BELB und NLB erweitert, indem die Kernschadenzustände erweitert, weitere Verzweigungen bzw. Parameter (u. a. relevante Zeitwerte) in die Ereignisbaumstruktur eingefügt und die Freisetzungskategorien überarbeitet wurden.

Die bisherige Rechentechnik der EVNTRE-Software wurde genutzt und entsprechend um neue, notwendige Funktionen erweitert. Die deutliche Erhöhung der Komplexität des erweiterten Ereignisbaums hat sich dabei nicht auf die Rechenzeiten einer Auswertung ausgewirkt. Eine Berechnung mittels des umfassenden Ereignisbaum liegt weiterhin im Sekundenbereich.

Die Auswertung der Monte-Carlo-Simulationen in den EVNTRE-Ergebnissen in Bezug auf Unsicherheiten und Sensitivitäten der einzelnen Parameter wurde mittels der GRS-eigenen Software SUSA durchgeführt.

Aus dem Ereignisbaum können Eintrittswahrscheinlichkeiten für Sicherheitsbehälterzustände und Freisetzungskategorien nach einem schweren Unfall gewonnen werden. Zusätzlich können Quelltermrisiken sowohl für den RDB als auch für das BELB sowie das gesamte Quelltermrisiko aus dem Ereignisbaum bestimmt werden.

In Bezug auf die Auswertemöglichkeiten ist festzuhalten, dass der Nutzer völlige Flexibilität hat, und alle innerhalb des Ereignisbaumes vorhandenen Daten in beliebiger Weise, auch in Kombinationen, auswerten kann. Eine methodische Begrenzung existiert praktisch nicht. Dies liegt insbesondere daran, dass EVNTRE eine Schnittstelle zu einem nutzerdefinierten Unterprogramm hat, in dem mit vertretbarem Aufwand die interessierenden Aspekte separiert und analysiert werden können. In Bezug auf eine anschließende Sensitivitätsanalyse bietet das GRS-Rechenprogramm SUSA alle erforderlichen Möglichkeiten.

Dies steht im Gegensatz zu kommerzieller Software wie z.B. RiskSpectrum, die weniger flexibel an die Aufgabenstellungen einer Analyse eines erweiterten Ereignisbaums anpassbar ist. Im Gegensatz zu RiskSpectrum liegt der GRS der Quellcode von EVNTRE vor.

Eine sinnvolle Weiterentwicklung ist es, eine automatische Kopplung von EVNTRE mit SUSANA anhand eines Moduls zu entwickeln, so dass die Datensätze ohne vorherige Formatierungsänderungen direkt in SUSANA importiert werden können. Dies würde die Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen vereinfachen und verschnellern.

Das Problem einer umfassenden PSA liegt nicht in der probabilistischen Methode des Ereignisbaumes, sondern in der Analyse der Ereignisabläufe. Hierfür ist die Kenntnis zum Teil noch unsicher. Die Sensitivitätsanalyse ist ein wertvolles Hilfsmittel, um die relevanten Kenntnislücken beispielsweise bei der Radionuklidfreisetzung der Schmelze-Jod-Wechselwirkung und beim Jodverhalten zu identifizieren.

Literaturverzeichnis

- /ASA 13/ ASAMPSA2 “*Best-practice guidelines for level 2 PSA development and applications*”, Vol II, http://www.asampsa2.eu/images/stories/asampsa2/ASAMPSA2_guidelines_vol2_genII&III.pdf. (Webseite vom 16.03.2018)
- /BEL 83/ Bell, B. J., A. D, Swain: “*A Procedure for Conducting a Human Reliability Analysis for Nuclear Power Plants*”, U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC), USA, Washington, 1983.
- /BMU 05/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), „*Sicherheitsüberprüfung für Kernkraftwerke gemäß §19a des Atomgesetzes - Leitfaden Probabilistische Sicherheitsanalyse*“, 31. Januar 2005, Bekanntmachung vom 30. August 2005, Bundesanzeiger, Jahrgang 57, Nummer 207a, ISSN 0720-6100, Deutschland, Bonn, November 2005.
- /EPR 02/ EPRO, “*Steam Generator Tube Integrity Assessment: Volume 1: General Methodology, Revision 1*“, USA, Palo Alto, 2002.
- /FAK 05/ Facharbeitskreis (FAK) Probabilistische Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke, „*Methoden zur probabilistischen Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke*“, BfS-SCHR-37/05, Deutschland, Bonn, Oktober 2005.
- /FAK 16/ Facharbeitskreis (FAK) Probabilistische Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke: „*Methoden zur probabilistischen Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke*“, BfS-SCHR-61/16, Salzgitter, Deutschland, September 2016.
- /FAS 03/ Faßmann, W., W. Preischl: „*Bewertung von Personalhandlungen unter Unfallbedingungen – Methode zur Untersuchung und Bewertung schädlicher Eingriffe des Operateurs*“, Technischer Fachbericht, GRS-A-3157, Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Deutschland, Garching, Oktober 2003.

- /FAS 10/ Faßmann, W., W. Preischl: „*Quantitative Bewertung wissensbasierter Handlungen in einer probabilistischen Sicherheitsanalyse*“, Technischer Fachbericht, Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-3561, Deutschland, Köln, 2010.
- /FAS 14/ Faßmann, W.: „*Methode für die Analyse und Bewertung der Wechselwirkung zwischen Stress und der Zuverlässigkeit wissensbasierten Handelns in der probabilistischen Sicherheitsanalyse*“, Technischer Fachbericht, Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-332, Deutschland, Garching, Juni 2014.
- /GÄN 15/ Gänßmantel, G.; et al.: „*Erfassung, Aufbereitung und Auswertung von im Rahmen der SÜ erstellten deterministischen Sicherheitsstatusanalysen und probabilistischen Sicherheitsanalysen von Kernkraftwerken in Deutschland – Generische Erkenntnisse aus den anlagenbezogenen Auswertungen von im Rahmen der SÜ erstellten PSA*“, GRS-A-3001, Deutschland, Garching, April 2015.
- /GRI 89/ Griesmeyer, J; Smith, L., “*A reference manual for the event progression analysis code (EVNTRE)*”, NUREG/CR-5174, September 1989.
- /GRS 98/ Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: „*Untersuchungen zu Handlungen des Betriebspersonals bei Notfallmaßnahmen*“, GRS-A-2617, Deutschland, Garching, Oktober 1998.
- /GRS 01/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: „*Bewertung des Unfallrisikos fortschrittlicher Druckwasserreaktoren in Deutschland*“, GRS-175, Deutschland, Köln, Oktober 2001.
- /GRS 03/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: „*Fortschrittliche Methoden für eine Brand-PSA*“, Deutschland, Köln, GRS-190, Juli 2003.

- /GRS 03a/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: „*Entwicklung fortschrittlicher Methoden für eine probabilistische Sicherheitsanalyse, insbesondere der Stufe 2, Arbeitspunkt 4: Methode zur Untersuchung und Bewertung schädlicher Eingriffe des Operateurs*“, GRS-A-3157, Deutschland, Köln, Oktober 2003.
- /GRS 10/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: „*Weiterentwicklung von Methoden und Werkzeugen für probabilistische Sicherheitsanalysen*“, GRS-A-3553, Deutschland, Köln, August 2010.
- /GRS 15/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: „*Untersuchungen zum anlageninternen Notfallschutz deutscher Kernkraftwerke und Darstellung der Wirksamkeit von Optimierungsmaßnahmen*“, GRS-A-3839, Deutschland, Köln, November 2015.
- /GRS 15a/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: „*Fortschrittliche Methoden und Werkzeuge für probabilistische Sicherheitsanalysen*“, RS1198, Deutschland, Garching, 2015
- /GRS 18/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: „*Methodische Weiterentwicklungen und Anwendungen zur probabilistischen Dynamikanalyse*“, Deutschland, Garching, GRS Bericht im Entwurf
- /HAG 17/ Hage, M. et al., „*Ergänzung der Quelltermdatenbank des Entscheidungshilfesystems RODOS für Freisetzungen aus Brennelement-Lagerbecken in Kernkraftwerken*“, Deutschland, Köln, GRS-A-3881, Februar 2017
- /IRS 15/ IRSN, „*Nuclear power reactor core melt accidents – current state of knowledge*“, Frankreich, Paris, 2015
http://www.irsn.fr/EN/Research/publications-documentation/Scientific-books/Documents/1_LAGEN_page%20I_XII.pdf
 (Webseite vom 16.03.2017)

- /INE 08/ INES User's Manual;
<http://www-pub.iaea.org/books/iaeabooks/10508/INES-The-International-Nuclear-and-Radiological-Event-Scale-User-s-Manual-2008-Edition>, (Webseite vom 16.03.2017)
- /JOS 18/ Johst, S.: „Ergänzung des klassischen Ereignisbaums um Ergebnisse einer probabilistischen Dynamikanalyse“, Fachband zum Vorhaben 1315R01345, Deutschland, Köln, 2018 (im Entwurf)
- /KKG 10/ Kernkraftwerk Grafenrheinfeld, „Probabilistische Sicherheitsanalyse der Stufe 2“; Abschnitt 8-14, Deutschland, Oktober 2010.
- /LÖF 16/ Löffler, H. et al. , „Unfallanalysen in Kernkraftwerken nach anlagenexternen auslösenden Ereignissen und im Nichtleistungsbetrieb“, GRS-393, Deutschland, Köln, Juni 2016.
- /NUR 98/ SGTR Severe Accident Working Group der NRC, „Risk Assessment of Severe Accident-Induced Steam Generator Tube Rupture“, USA, Washington, NUREG-CR-1570, März 1998
- /NRC 17/ NRC Advisory Committee on Reactor Safeguards, „Schreiben an den Executive Director for Operations“, Mai 2017, USA, Washington, <https://www.nrc.gov/docs/ML1713/ML17138A017.pdf>; (Webseite vom 16.03. 2018)
- /PRE 18/ Preischl, W., „Ergänzende Untersuchungen zu mitigativen menschlichen Handlungen im Bereich schwerer Unfallabläufe“, Deutschland, Garching, März 2018 (im Entwurf)
- /STE 14/ Steinrötter, T. et al. „Fortschrittliche methodische Ansätze für die PSA der Stufe 2“, GRS-A-3743, Deutschland, Köln, Oktober 2014.
- /STE 15/ Steinrötter, T., et al. „Untersuchungen zum anlageninternen Notfallschutz deutscher Kernkraftwerke und Darstellung der Wirksamkeit von Optimierungsmaßnahmen“, GRS-A-3839, Deutschland, Köln, November 2015.

/SWA 83/ Swain, A. D., Guttman, H. E.: "*Handbook on Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications*", Final Report, USA, Washington, NUREG/CR-1278, August 1983.

/SWA 87/ Swain, A. D.: *Accident sequence evaluation procedure (ASEP)*, USA, Washington, NUREG/CR-4277, 1987.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Ausgehend von den Kernschadenzuständen werden über Verzweigungen unterschiedliche Ereignisabläufe in einem Ereignisbaum zusammengefasst /GRS 01/.....	15
Abb. 3.1	Ausschnitt aus dem EVNTRE output-Datensatz bezüglich der Frage, ob der Ventingdruck erreicht wird	34
Abb. 4.1	Methodischer Ansatz zur Bewertung schädlicher Eingriffe (aus /PRE 18/).....	42
Abb. 5.1	Struktur der eingefügten Ergänzungen in den Ereignisbaum (anders als hier dargestellt wird jede neue Verzweigung an jeden Zweig der vorhergehenden Verzweigung angefügt)	86
Abb. 5.2	Screenshot der ersten eingefügten Verzweigung mit nur einem Zweig KSZKUZ zur Parameterdefinition (Auszug aus Baum.txt).....	87
Abb. 5.3	Mitigative NFM SDE und Versagen DEHEIRO: Struktur eingefügter Ergänzungen (anders als hier gezeigt wird jede neue Verzweigung an jeden Zweig der vorhergehenden Verzweigung angefügt)	92
Abb. 5.4	Screenshot Verzweigung Dauer der Freisetzung über hochdruckinduziertes DEHEIRO-Leck (Auszug aus <i>Baum.txt</i>).....	94
Abb. 5.5	Screenshot der Funktionendefinition, zugehörig zur Verzweigung „Wie lange besteht DEHEIRO-Leck“	95
Abb. 5.6	Mitigative NFM SDE und DEHEIRO-Versagen: Struktur der eingefügten Ergänzungen (Fortsetzung von Abb. 5.3).....	96
Abb. 6.1	Auflistung der Ergebnisse für die SB-Endzustände (Ausschnitt aus der SORTPRI.OUT-Datei)	100
Abb. 6.2	Sensitivitätsanalyse des SB-Endzustands SVPf (Überdruckversagen oder Leck des SB < 10 h nach auslösendem Ereignis).....	101
Abb. 6.3	Eintrittswahrscheinlichkeiten für verschiedene Freisetzungskategorien (Ausschnitt aus der BAUM.STO-Datei)	102
Abb. 6.4	Verteilungsfunktion der Wahrscheinlichkeit für die Freisetzungskategorie „FFVi“ (SB intakt mit Venting, Ventingfilterung funktioniert auslegungsgemäß).....	104
Abb. 6.5	Sensitivitätsanalyse der Parameter für die Freisetzungskategorie FFViA (SB intakt mit Venting, Ventingfilterung funktioniert auslegungsgemäß)	105

Abb. 6.6	Auflistung der Cäsium-Aktivitätsfreisetzungen aus der Datei SORTPRI.OUT	106
Abb. 6.7	Beispiel der Ergebnisse der Quelltermrisikoberechnung aus der PROTOKOL.TXT-Datei.....	107
Abb. 6.8	Verteilungsfunktion des Quelltermrisikos aus dem BE-Lager [Bq/a].....	107
Abb. 6.9	Kumulierte Verteilungsfunktion des Quelltermrisikos aus dem RDB [Bq/a].....	108
Abb. 6.10	Auszug aus der Ergebnisdatei <i>BAUM.STO</i> : absolute Wahrscheinlichkeit, dass ein DEHEIRO-Leck unter den Randbedingungen des hier beschriebenen Szenarios entsteht.....	109
Abb. 6.11	Auszug aus der Ergebnisdatei <i>BAUM.STO</i> : absolute Wahrscheinlichkeit, dass ein SB-Bypass durch DEHEIRO-Leck entsteht/nicht entsteht (SBYDjl/SBYnl).....	110

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	FK und Quellterme in DWR für interne auslösende Ereignisse /GRS 01/.....	6
Tab. 2.2	Freisetzungskategorien (FK) in DWR für NLB und EVA /IRS 15/, /INE 08/, /IRS 15/, /LÖF 16/ /HAG 17/.....	7
Tab. 2.3	Freisetzungskategorien (FK) in DWR für Unfallabläufe im BELB /HAG 17/.....	8
Tab. 2.4	Freisetzungskategorien (FK) in DWR für den allgemeinen Ereignisbaum.....	9
Tab. 2.5	Quellterme in DWR für den allgemeinen Ereignisbaum	12
Tab. 2.6	Beispielhafter Auszug aus der KSZ-Matrix, die in die EVNTRE-Datei „Baum.txt“ einprogrammiert wurde.....	20
Tab. 2.7	Merkmale der Kernschadenzustände (KSZ).....	21
Tab. 4.1	Beschreibung des Ereignisablaufs für Beispiel 1 – 3 (aus /PRE 18/).....	52
Tab. 6.1	Versagenswahrscheinlichkeiten des SB	100
Tab. 6.2	Zahlenwerte der Quelltermrisiken für den RDB und das BELB	108

Abkürzungsverzeichnis

ASEP	Accident Sequence Evaluation Programme
ATHLET	Analyse der Thermohydraulik von Lecks und Transienten
ATM	Atmosphäre
BE	Brennelement
BELB	Brennelementlagerbecken
BSZ	Brennstoffschadenzustand
BHB	Betriebshandbuch
DE	Dampferzeuger
DEHEIRO	Dampferzeugerheizrohrleck
DH-AV	Druckhalter-Abblaseventil
DH-AAV	Druckhalter-Abblaseabsperrventil
DWR	Druckwasserreaktor
EVA	Einwirkungen von außen
FK	Freisetzungskategorie(n)
GVA	Gemeinsam verursachter Ausfall
HAG	Hilfsanlagengebäude
HD	Hochdruck
KBA	Volumenregelsystem
KMV	Kühlmittelverlust
KSZ	Kernschadenzustand
KU	Kernumlagerung
LB	Leistungsbetrieb
LERF	Large Early Release Frequency
MCDET	Monte Carlo Dynamic Event Tree
MELCOR	Computer code for the US NRC
ND	Niederdruck
NFM	Notfallmaßnahmen
NHB	Notfallhandbuch
HMN	Handbuch für mitigative Notfallmaßnahmen
NLB	Nichtleistungsbetrieb
NWA	Nachwärmeabfuhr
PDE	Primärseitige Druckentlastung
PS	Primärseite
PSA	Probabilistische Sicherheitsanalyse
RDB	Reaktordruckbehälter
RR	Ringraum

SB	Sicherheitsbehälter
SDE	Sekundärseitige Druckentlastung
SpW	Speisewasser
SUSA	Software for Uncertainty and Sensitivity Analyses
SWR	Siedewasserreaktor
THERP	Technique for human error-rate prediction

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

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

Forschungszentrum
Boltzmannstraße 14
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

ISBN 978-3-946607-74-8