

**Vergleichende Bewertung
unterschiedlicher
Methoden und Codes
für eine PSA der Stufe 1
für anlageninterne
Überflutungsereignisse**

Vergleichende Bewertung unterschiedlicher Methoden und Codes für eine PSA der Stufe 1 für anlageninterne Überflutungsereignisse

Florian Berchtold
Tanja Eraerds
Gerhard Mayer
Marina Röwekamp

Dezember 2024

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde liegende Eigenforschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) unter dem Förderkennzeichen 4721R01530 durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der GRS.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung der GRS wieder und muss nicht mit der Meinung des BMUV übereinstimmen.

Deskriptoren

anlageninterne Überflutung, dynamische PSA, Einwirkungskombination, menschliche Handlungen, Methodenvergleich, Probabilistische Sicherheitsanalyse (PSA)

Kurzfassung

Insbesondere bei Betriebsstörungen und Störfällen in Kernkraftwerke aufgrund übergreifender Einwirkungen, beispielsweise anlageninterner Überflutungen, spielen Personalhandlungen eine zentrale Rolle. Der zeitliche Ablauf eines solchen Ereignisses und die Begrenzung der Folgen auf die Anlage sind durch zahlreiche Wechselwirkungen zwischen dem Anlagenpersonal, physikalischen Prozessen sowie stochastischen Einflüssen bzw. Unsicherheiten gekennzeichnet. Solche komplexen, zeitlich veränderlichen Wechselwirkungen lassen sich in den Methoden der klassischen probabilistischen Sicherheitsanalyse (PSA) nur indirekt berücksichtigen, wohingegen Methoden der dynamischen PSA speziell für Analysen solcher komplexer, zeitabhängiger Ereignisabläufe vorgesehen sind.

Die GRS hat zur Durchführung dynamischer PSA das Werkzeug MCDET (*Monte Carlo Dynamic Event Tree*) entwickelt, welches zur Modellierung menschlichen Handelns durch das Crew-Modul ergänzt wird. Um die Vor- und Nachteile klassischer wie dynamischer PSA-Methoden zu untersuchen, wurde im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens 4721R01530 ein methodischer Vergleich dieser beiden Methoden durchgeführt. Dazu wurde das Szenario einer anlageninternen Überflutung unter erschwerenden Randbedingungen einer probabilistischen Analyse unterzogen. Das Szenario resultiert aus einer Leckage im Feuerlöschsystem im Reaktorgebäude-Ringraum bei gleichzeitigem Auftreten erschwerender Randbedingungen für Handmaßnahmen außerhalb von Gebäuden infolge naturbedingter meteorologischer Einwirkungen von außen, wie Starkwind, Regen oder Glatteis.

Die Analysen erfolgten zum einen mit zwei Programmen der klassischen PSA, dem in Europa weit verbreiteten kommerziellen PSA-Code RiskSpectrum[®] und dem international ebenfalls häufig genutzten, einer breiteren Expertengemeinschaft frei zugänglichen PSA-Code SAPHIRE, und zum anderen mittels der von der GRS entwickelten Werkzeuge der dynamischen PSA MCDET und dem Crew-Modul.

Das für das Szenario bereits vorhandene, in RiskSpectrum[®] erstellte klassische PSA-Anlagenmodell wurde mittels des GRS-Werkzeugs pyRiskRobot weitestgehend automatisiert in SAPHIRE übertragen. Beide klassischen PSA-Modelle führten zu gleichen Ergebnissen, woraus geschlossen werden kann, dass die Modellübertragung mittels pyRiskRobot zuverlässig funktioniert.

Das Szenario wurde zudem mit dem Crew-Modul nachmodelliert. Aufgrund der flexibleren Modellierungsmöglichkeiten wurden dabei zwei zusätzliche Handlungsblöcke in den Ereignisablauf integriert. Diese stellen Ersatzmaßnahmen für den Ausfall von Systemfunktionen dar, die im klassischen PSA-Modell direkt zu einer Überflutung des Reaktorgebäude-Ringraums führen. Neben den zusätzlichen Handlungsblöcken lassen sich auch weitere, in klassischen PSA-Methoden unerkannte Ereignisabläufe identifizieren, wie Abläufe mit einer Überflutung bei erfolgreicher, aber zu spät erfolgter Absperrung der Leckage. Unter den angenommenen Randbedingungen sind diese Ereignisabläufe allerdings nicht relevant, was die Annahmen in den klassischen PSA-Modellen bestätigt.

Zudem lassen sich mit den Methoden der dynamischen PSA Kipp-Effekte identifizieren. Ein solcher Kipp-Effekt ist beispielsweise der deutliche Anstieg der spezifischen Überflutungswahrscheinlichkeit durch eine verspätete Absperrung der Leckage bei einem geringeren kritischen Wasservolumen.

Es konnte gezeigt werden, dass Methoden der dynamischen PSA für die nachfolgend genannten Einsatzbereiche probabilistischer Bewertungen zeitlich veränderlicher, komplexer Ereignisabläufe Vorteile gegenüber den Methoden der klassischen PSA aufweisen: Sensitivitätsanalysen bei Ereignisabläufen mit erwartbar hohem Schadenspotenzial und außerhalb von Gebäuden erforderlichen Handmaßnahmen, bei der Planung von Notfallmaßnahmen sowie bei der Analyse der Widerstandsfähigkeit eines Systems.

Da die Anwendung der klassischen PSA-Modelle deutlich mehr verbreitet ist als die dynamischer PSA-Methoden, wäre es für bestimmte Anwendungsbereiche sinnvoll, die mit den Methoden der dynamischen PSA erzielten Ergebnisse in die klassischen PSA-Modelle zu übertragen.

Abstract

Personnel actions play a central role, particularly in the event of operational disturbances and incidents in nuclear power plants induced by hazards, such as plant internal flooding. The sequence of such an event over time and the mitigation of the consequences to the plant are characterized by numerous interactions between the plant personnel, physical processes and stochastic influences or uncertainties. Such complex, interactions varying over time can only be taken into account indirectly in the methods for classic probabilistic safety analysis (PSA), whereas methods of dynamic PSA have been developed specifically for analysing such complex, time-dependent event sequences.

For conducting dynamic PSA, the GRS has developed the analytical tool MCDET (*Monte Carlo Dynamic Event Tree*). For modelling human actions and potential sequences of actions MCDET is supplemented by the Crew Module. For analysing the advantages and disadvantages of classic and dynamic PSA methods, a methodical comparison has been carried out as part of the research and development project 4721R01530 for a scenario of a plant internal flooding under more severe boundary conditions. For this purpose, the scenario of a leakage in the fire extinguishing system inside the reactor building annulus with a simultaneous occurrence of aggravating boundary conditions due to natural meteorological hazards such as strong winds, rain or black ice during manual actions to be taken outside buildings has been subject to a probabilistic analysis.

The analyses have been carried out applying first two classic PSA programs, the commercial PSA code RiskSpectrum[®], which is widely used in Europe, and the PSA code SAPHIRE, which is also frequently used internationally and is freely accessible to a broad expert community. In addition, the scenario has been analysed by a dynamic PSA approach using the analytical tools MCDET and the Crew Module developed by GRS.

The classic PSA plant model already available for the scenario and generated in RiskSpectrum[®] has been automatically transferred to SAPHIRE to the extent possible using the GRS tool pyRiskRobot. Both classic PSA models provided the same results. It can therefore be concluded that the model transfer using pyRiskRobot works reliably.

The scenario has also been modelled by the Crew Module. Due to the more flexible modelling options, two additional blocks of actions have been included in the event sequence. These action blocks represent alternative measures for the failure of system functions that lead directly to flooding of the reactor building annulus in the classic PSA

model. In addition to the alternative action blocks, other event sequences, e.g. sequences with flooding in the event of stopping the leakage successfully but too late, not identified by classic PSA methods can also be identified by dynamic PSA models. Under the assumed boundary conditions these event sequences are not relevant, which confirms the assumptions in the classic PSA models.

Moreover, cliff-edge effects can be identified applying dynamic PSA methods. A typical cliff-edge effect is the significant increase of the specific flooding probability due to a delay in stopping the leakage at a lower critical water volume.

It has been demonstrated that dynamic PSA methods have advantages compared to classic PSA methods for the following areas of application of probabilistic assessments for time-dependent, complex event sequences: sensitivity analyses for event sequences with an expected high damage potential and manual actions required outside buildings, the planning of emergency measures and the analysis of the resilience of a system.

As the application of classic PSA models is much more widespread than that of dynamic PSA methods, it would make sense for certain areas of application to transfer the results obtained by dynamic PSA methods to classic PSA models.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
2	Stand von Wissenschaft und Technik.....	3
2.1	Aktuelle Arbeiten der GRS zur Entwicklung von PSA-Methoden.....	3
2.2	Methoden der PSA und IDPSA sowie Regeln und Richtlinien in Bezug auf anlageninterne Überflutungen.....	9
2.3	Aktuelle internationale Untersuchungen zu Methoden der dynamischen PSA sowie zu PSA für anlageninterne Überflutungen	12
2.4	Zusammenfassung	18
3	Definition des Szenarios einer anlageninternen Überflutung.....	21
3.1	Auswahl des Szenarios.....	22
3.2	Beschreibung des Szenarios	24
3.3	Beschreibung der erschwerenden Randbedingungen.....	31
4	Modellierung des Szenarios und des Handlungsablaufes.....	33
4.1	Beschreibung der Handlungsblöcke und Ereignisbäume	35
4.1.1	I: Initialereignis.....	35
4.1.2	M-1: Sumpfmeldung / Reaktorschutzmeldung steht an.....	36
4.1.3	D-1: Diagnose nach Sumpf- oder Reaktorschutzmeldung.....	37
4.1.4	D-2: Diagnose durch Anlagenwärter im Reaktorgebäude-Ringraum.....	39
4.1.5	M-2: Meldung in der Warte nach überflutungsbedingtem Ausfall von SSC	39
4.1.6	A-1: Absperrung des ersten Streckenschiebers	40
4.1.7	A-2: Kontrolle des ersten Streckenschiebers	41
4.1.8	A-3: Absperrung der Ringleitung	42
4.1.9	E-0: Endzustand ohne Erfolg der Absperrung.....	43
4.1.10	E-1: Endzustand mit Erfolg der Absperrung	43
4.2	Weiterer Ereignisablauf nach der Ringraumüberflutung IF in den klassischen PSA-Modellen	44
4.3	Übertragung des klassischen PSA-Modells aus RiskSpectrum® in SAPHIRE.....	47

4.4	Modellierung in der dynamischen PSA mit dem Crew-Modul.....	51
5	Vergleich der PSA-Modelle	55
5.1	Vergleich der klassischen PSA-Modelle.....	55
5.1.1	Qualitativer Vergleich der klassischen PSA-Programme.....	55
5.1.2	Unterschiede der klassischen PSA-Programme bei der Übertragung von PSA-Modellen	57
5.1.3	Quantitativer Vergleich der Ergebnisse der klassischen PSA- Programme.....	60
5.1.4	Schlussfolgerungen aus dem Vergleich der klassischen PSA-Modelle	69
5.2	Vergleich des dynamischen PSA-Modells mit den klassischen PSA- Modellen.....	70
5.2.1	Qualitative Unterschiede in der Modellierung.....	71
5.2.2	Quantitativer Vergleich der Ergebnisse.....	74
5.2.3	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen des Vergleichs	85
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	89
6.1	Vergleich der klassischen PSA-Programme RiskSpectrum® und SAPHIRE.....	89
6.2	Vergleich zwischen dynamischem PSA-Modell und klassischen PSA- Modellen.....	91
	Literaturverzeichnis.....	95
	Abbildungsverzeichnis.....	101
	Tabellenverzeichnis.....	103
	Abkürzungsverzeichnis.....	105
A	Anhang: Szenario „Leckage des Feuerlöschsystems SGB im Ringraum“	107
A.1	I: Eingangereignis	107
A.2	M-1: Sumpfmeldung / Reaktorschutzmeldung steht an	109
A.3	D-1: Diagnose nach Sumpf- oder Reaktorschutzmeldung.....	111

A.4	D-2: Diagnose durch Anlagenwärter im Ringraum (wird nicht im PSA- Modell berücksichtigt)	115
A.5	M-2: Meldung in der Warte nach überflutungsbedingtem Ausfall von SSC	117
A.6	A-1: Absperrung des ersten Streckenschiebers	119
A.7	A-2: Kontrolle des ersten Streckenschiebers	123
A.8	A-3: Absperrung der Ringleitung	125
A.9	E-0: Endzustand ohne Erfolg der Absperrung.....	127
A.10	E-1: Endzustand mit Erfolg der Absperrung	129

1 Einführung

Die probabilistische Sicherheitsanalyse (PSA) hat sich weltweit zu einem zentralen Instrument entwickelt, mit den Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden wie auch Gutachter und Betreiber die Sicherheit von Kernkraftwerken und eventuell erforderliche weitere Maßnahmen zur Verbesserung der Sicherheit beurteilen können. Die Durchführung einer PSA erfordert, dass Informationen über Stör- bzw. Unfallsimulationen, Systemauslegung, Betriebsweisen, Betriebserfahrung, Komponenten- und Systemzuverlässigkeit sowie über das sicherheitsrelevante menschliche Handeln realistisch zu einer Gesamtbetrachtung des Anlagenverhaltens zusammengeführt werden. Wenn das Anlagenverhalten durch starke Wechselwirkungen zwischen Prozess- und Systemdynamik, Personalhandlungen sowie zufälligen Einflussfaktoren (wie z. B. Ausfälle von Komponenten und Systemen, menschliche Fehler oder die Dauer von Personalhandlungen) bestimmt wird, müssen diese ebenfalls in Betracht gezogen werden.

Eine möglichst realistische Berücksichtigung zufälliger, insbesondere zeitlicher Einflussgrößen ist mit den klassischen Methoden der PSA nicht möglich, weil diese Methoden weitgehend statischer Natur, d. h. ohne explizite Berücksichtigung der Zeitachse sind. Außerdem können Stör- bzw. Unfallsimulationen und probabilistische Modellierung über die Ereignisbäume nur getrennt voneinander eingesetzt werden, wobei die entsprechenden Informationen aus den Simulationen vom Analysten ausgewertet und entsprechend in den zu erstellenden Ereignisbaum-Modellen zu verwenden sind. Dies hat zur Folge, dass Vereinfachungen und grobe Abschätzungen durchgeführt werden müssen, deren Auswirkungen auf die Sicherheitsbewertung bisher nicht beurteilt werden können.

Entwicklungen fortschrittlicher PSA-Methoden zur dynamischen PSA versuchen, eine möglichst realistische Modellierung der komplexen Wechselwirkungen von Störfall- und Unfallabläufen und zufälligen Einflussgrößen zu ermöglichen. Die GRS hat bereits seit längerem im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten begonnen, Methoden für eine dynamische PSA zu entwickeln und arbeitet kontinuierlich daran, diese Methoden weiterzuentwickeln und zu verbessern. Zwei wesentliche methodische Ansätze für eine dynamische PSA sind in diesem Zusammenhang:

- die Methode MCDET, die eine Kombination aus diskreter dynamischer Ereignisbaum-Methode und Monte-Carlo-Simulation darstellt, und
- das Crew-Modul zur dynamischen Modellierung und Simulation von Personalhandlungen.

Der kombinierte Einsatz dieser beiden Methoden der dynamischen PSA erlaubt es, in Verbindung mit einem deterministischen Rechencode (z. B. ATHLET) eine integrale Simulation des Prozessverhaltens durchzuführen, bei dem der physikalische Prozess, technische Systeme, Personalhandlungen und zufällige Ereignisse im zeitlichen Ablauf zusammenwirken. Eine solche Analyse wird auch als integrale deterministisch-probabilistische Sicherheitsanalyse (IDPSA) bezeichnet.

In Analysen mit Methoden der dynamischen PSA können Unsicherheiten in erheblich größerem und detaillierterem Ausmaß als in einer klassischen, statischen PSA berücksichtigt werden. Damit können Abläufe aufgezeigt werden, die bei den klassischen PSA-Methoden aufgrund methodischer Einschränkungen unerkannt bleiben, unter Umständen jedoch risikorelevant sein können. Außerdem haben sie das Potenzial, bisher unbekannte Kipp-Effekte (Englisch: cliff-edge effects) zu identifizieren, bei denen kleine Änderungen in den Anlagenparametern große Auswirkungen auf die Anlagenbedingungen haben können /IAE 24/ (§ 1.2b). Durch die Kenntnis solcher Kipp-Effekte können Maßnahmen eingeleitet werden, die zur Verbesserung des Sicherheitsniveaus führen.

Obwohl die GRS-Methoden zur dynamischen PSA bereits mehrfach für komplexere Analysen (z. B. eine Analyse eines Unfallszenarios in einem Reaktordruckbehälter bei totalem Stromausfall der Anlage /KLO 06/, die Analyse eines Ölbrandes in Verbindung mit Brandbekämpfungsmaßnahmen durch das Anlagenpersonal /PES 14/ oder auch eine IDPSA eines thermisch bedingten Dampferzeuger-Heizrohrversagens in einem Hochdruck-Kernschmelzfall /PES 18/) angewendet und beschrieben wurden, wurde bisher kein systematischer qualitativer und quantitativer Vergleich zwischen den dynamischen PSA-Methoden der GRS und entsprechenden klassischen PSA-Modellen durchgeführt.

Für einen solchen Vergleich war zunächst ein Szenario zu identifizieren, an dem die wesentlichen Schritte der Methoden und deren Ergebnisse möglichst anschaulich und übersichtlich dargestellt und verglichen werden können. Um dies zu gewährleisten, sollte ein Szenario gewählt werden, welches nicht zu umfangreich ist und eine gewisse sicherheitstechnische Relevanz besitzt, so dass es bereits in einer klassischen PSA berücksichtigt wurde. Dieses Szenario wurde mit den beiden klassischen (statischen) PSA-Codes sowie mit MCDET und dem Crew-Modul als Methoden der dynamischen PSA modelliert. Danach wurden die Modelle umfassend qualitativ und quantitativ verglichen. Aus den Vergleichen wurden Schlussfolgerungen für mögliche Einsatzbereiche dynamischer PSA-Methoden abgeleitet.

2 Stand von Wissenschaft und Technik

Das Forschungsvorhaben baut auf einer Vielzahl an Vorarbeiten der GRS, nationalen wie internationalen Regelwerken, Programm-Codes sowie internationalen Untersuchungen auf. Diese werden nachfolgend kurz dargestellt und abschließend zusammengefasst und ein Fazit gezogen.

2.1 Aktuelle Arbeiten der GRS zur Entwicklung von PSA-Methoden

Die hier dargestellten Arbeiten der GRS beziehen sich hauptsächlich auf die Methodentwicklung zur Analyse übergreifender Einwirkungen. Die Entwicklungen der GRS zur dynamischen PSA sind im Vergleich zur klassischen PSA zusammen mit den anderen Programm-Codes dargestellt.

Methoden und Werkzeuge für probabilistische Sicherheitsanalysen

Im Vorhaben RS1539 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) wurde seitens der GRS ein systematischer Ansatz zur Durchführung von PSA der Stufe 1 für übergreifende Einwirkungen entwickelt /ROE 17/. Die dabei genutzten und weiterentwickelten Methoden und Werkzeuge wurden für eine umfassende Analyse anlageninterner und -externer hydrologischer Einwirkungen angewendet.

Bei der Entwicklung standen die Bereitstellung eines detaillierten anlagenspezifischen Screeningverfahrens für alle grundsätzlich zu unterstellenden übergreifenden Einwirkungen und Einwirkungskombinationen sowie Erweiterungen des PSA-Modells einer Referenzanlage für detaillierte probabilistische Analysen im Mittelpunkt. Für die systematische Auswahl von Einwirkungen wurde zwischen Einwirkungen von innen und Einwirkungen von außen unterschieden. Die Einwirkungen von außen wurden wiederum in naturbedingte Einwirkungen (seismotektonische Einwirkungen, Hochwasser und weitere hydrologische Einwirkungen, meteorologische Einwirkungen, extraterrestrische Einwirkungen, biologische Einwirkungen, geologische Einwirkungen und naturbedingte anlagenexterne Brände) sowie zivilisatorisch bedingte Einwirkungen (z. B. Unfallfolgen, wie Brände, Explosionen, Freisetzung gefährlicher Stoffe aufgrund von Unfällen in Industrie- oder Militäranlagen, aber auch von Transportunfällen, wie Flugzeugabsturz, etc.) unterschieden. Die für das Einwirkungsscreening entwickelte Methodik basiert auf einer generischen Einwirkungsliste, die alle denkbaren Einzeleinwirkungen der vorgenannten Kategorien enthält. Nach einer groben Identifikation aller am jeweiligen Anlagenstandort

grundsätzlich möglichen übergreifenden Einwirkungen erfolgt zunächst ein qualitatives Screening der einzelnen Einwirkungen anhand international akzeptierter qualitativer Kriterien. Die danach verbleibenden Einwirkungen werden einerseits einem quantitativen Screening anhand für die jeweilige Untersuchung vorzugebender quantitativer Abschneidekriterien unterzogen. Zum anderen werden aus den einzelnen Einwirkungen am Anlagenstandort für die zu untersuchende Anlage mögliche Einwirkungskombinationen identifiziert und diese Einwirkungskombinationen dann den qualitativen und quantitativen Screeningschritten mit den gleichen Screeningkriterien wie die Einzeleinwirkungen unterzogen. Alle nach dem Einwirkungsscreening als relevant für eine probabilistischen Analyse verbleibenden Einzeleinwirkungen und Einwirkungskombinationen sind in der PSA weiter zu untersuchen. Dabei sind entweder abdeckende probabilistische Grobanalysen (als „bounding analyses“ bezeichnet) oder Detailanalysen durchzuführen. Während bei den ersteren nur eine grobe Abschätzung der Kern- bzw. Brennstabschadenshäufigkeit (CDF bzw. FDF) erfolgt, werden im Rahmen der Detailanalysen die entsprechenden Schadenshäufigkeiten mittels Ereignisses mit den entsprechenden Verteilungen bestimmt. Das PSA-Anlagenmodell der Anlage für die Detailanalysen ist dementsprechend hinsichtlich der einwirkungsbedingten auslösenden Ereignisse und der Beeinträchtigung betrieblich und sicherheitstechnisch relevanter Systemfunktionen zu erweitern.

Der von der GRS entwickelte methodische Ansatz zum Einwirkungsscreening wurde beispielhaft für eine Referenzanlage in Deutschland mit Scherpunkt insbesondere auf hydrologischen Einwirkungen angewendet. Nach dem qualitativen und quantitativen Einwirkungsscreening verblieben nur noch sehr wenige Einzeleinwirkungen und Einwirkungskombinationen infolge hydrologischer Einwirkungen, u. a. Flusshochwasser aufgrund unterschiedlicher Ursachen, eine Überschwemmung des Anlagengeländes aufgrund von Starkregenereignissen, anlageninterne Überflutungen sowie Kombinationen hydrologischer Einwirkungen mit daraus resultierenden anlageninternen Einwirkungen (u. a. Brand, hochenergetisches elektrisches Komponentenversagen, Explosion).

Die detaillierten Analysen anlageninterner Überflutungen führten zu dem Ergebnis, dass nur Überflutungsereignisse im Reaktorgebäude-Ringraum und dem Reaktorsumpf im Detail in der PSA zu analysieren und entsprechende Schadenshäufigkeiten in der PSA der Stufe 1 auszuweisen sind. Das Anlagenmodell der PSA der Stufe 1 wurde dementsprechend erweitert und die Kernschadenshäufigkeit quantifiziert. Als ein wesentliches

Ergebnis zeigte sich, dass die richtige Diagnose der auflaufenden Sumpfmeldungen durch das Wartenpersonal für den Ereignisablauf maßgeblich ist.

Für die detaillierten Analysen hydrologischer Einwirkungen von außen wurden die Einwirkungen hinsichtlich der maximalen Wasserstände, deren Eintrittshäufigkeiten, der betroffenen Gebäude und Komponenten sowie der Vorwarnzeit für das Auftreten von Überflutungen am Anlagenstandort kategorisiert. Das PSA-Anlagenmodell der Stufe 1 wurde entsprechend angepasst und quantifiziert.

Aus den Ergebnissen der Studie lässt sich ableiten, dass für die meisten Anlagenstandorte wetter- und witterungsbedingte Einwirkungen zumindest in einer probabilistischen Grobanalyse zu berücksichtigen sind. Zudem stellte sich heraus, dass der von der GRS entwickelte methodische Ansatz nicht nur für Untersuchungen hydrologischer Einwirkungen geeignet ist, sondern sich grundsätzlich für alle Einzeleinwirkungen der unterschiedlichen Einwirkungskategorien und Einwirkungskombinationen, für unterschiedliche Reaktortypen sowie weitere kerntechnische Einrichtungen, die verschiedenen Anlagenbetriebszustände einschließlich der Nachbetriebsphase anwenden lassen.

Vervollständigung von Methoden für PSA der Stufe 1 für übergreifende Einwirkungen und Einwirkungskombinationen

Im Rahmen des BMWi-Forschungsvorhabens RS1556 wurde von der GRS, basierend auf den Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Vorhaben RS1539, das Werkzeug „Hazard Screening Tool“ (HST) für eine umfassende Identifikation und ein systematisches, weitgehend automatisiertes Screening übergreifender Einwirkungen und Einwirkungskombinationen für eine PSA der Stufe 1 entwickelt /MAY 20/.

Das HST dient dazu, die für die Erstellung einer standort- und anlagenspezifischen PSA der Stufe 1 als Eingangsschritt erforderliche systematische Identifikation übergreifender Einwirkungen von außen und innen und das darauffolgende umfassende Einwirkungsscreening von Einzelwirkungen und Einwirkungskombinationen (siehe /ROE 17/) zu erleichtern, dessen Fehleranfälligkeit zu verringern und den Arbeitsaufwand deutlich zu verringern. Dazu gibt das Werkzeug einen festen Rahmen vor, in dem die einzelnen Schritte abgearbeitet werden müssen. Weiterhin bietet es die Möglichkeit einer umfassenden Dokumentation aller Screeningergebnisse, was auch die Nachvollziehbarkeit deutlich erhöht. Das HST ermöglicht somit eine konsistente und nachvollziehbare Durch-

führung des Screenings von Einzeleinwirkungen und Einwirkungskombinationen einschließlich einer grafischen Aufbereitung.

Mittels des HST wurde ein vollständiges qualitatives und quantitatives Einwirkungsscreening für den gesamten Anlagenstandort der bereits im Vorhaben RS1539 genutzten Referenzanlage durchgeführt. Im Ergebnis müssen in einer Grobanalyse für den Referenzstandort folgende Einzeleinwirkungen untersucht werden: lokale Überflutung des Anlagenstandorts aufgrund verschiedener hydrologischer Ursachen, meteorologische Einwirkungen infolge eines Sturmtiefs, unfallbedingter Absturz eines zivilen Flugzeugs aus einem Flugkorridor, insbesondere hoch-energetisches Komponentenversagen sowie anlageninterne Explosion. Detailanalysen sind für die Einzeleinwirkungen Bodenerschütterungen durch Erdbeben, anlageninterner Brand und anlageninterne Überflutung erforderlich. Das Screening von Einwirkungskombinationen ergab, dass für folgende Kombinationen kausaler Folgeeinwirkungen weitere Analysen durchzuführen sind: Erdbeben und die darauffolgenden Einwirkungen von innen Brand, Überflutung oder Explosion, unfallbedingter Flugzeugabsturz und darauffolgender anlageninterner Brand oder anlageninterne Explosion sowie anlageninterner Brand und darauffolgende anlageninterne Überflutung. Kombinationen von durch eine gemeinsame Ursache korrelierten einzelnen Einwirkungen sowie Kombinationen von zufällig gleichzeitig unabhängig voneinander auftretenden Einwirkungen sind entsprechend den Ergebnissen des Einwirkungsscreenings für den Anlagenstandort der Referenzanlage nicht weiter in der PSA zu berücksichtigen.

Mit dem HST steht somit (siehe /MAY 20/, /STR 20/, /STR 21/ sowie /STR 24/) mittlerweile ein Werkzeug zur Durchführung eines vollumfänglichen Screenings innerhalb der PSA der Stufe 1 für Kernkraftwerksstandorte zur Verfügung.

Einsatz dynamischer Simulationsmethoden für die Analyse von Notfallmaßnahmen

Im Forschungs- und Entwicklungsvorhaben 4718R01500 des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) wurde mit Methoden der dynamischen PSA eine Einwirkungskombination eines anlageninternen Brandes im Reaktorgebäude-Ringraum einer deutschen Referenzanlage mit Druckwasserreaktor (DWR) vom Typ Konvoi mit einer gleichzeitig auftretenden anlageninternen Überflutung analysiert /BER 21/. Ziel des Vorhabens war es, die Wirksamkeit von Notfallmaßnahmen unter den erschwerten Randbedingungen einer solchen Einwirkungskombination zu untersu-

chen. Dabei wurde insbesondere der Einfluss stochastischer Größen sowie zeitabhängiger Wechselwirkungen von Personen und Systemzuständen berücksichtigt. Diese Faktoren sind bei übergreifenden Einwirkungen von zentraler Bedeutung und stehen daher seit den Reaktorunfällen von Fukushima 2011 verstärkt im Fokus bei der Bewertung der Sicherheit kerntechnischer Einrichtungen.

Als Kombination übergreifender Einwirkungen wurden die Einwirkung von innen eines Brandes in einem Kabelschacht im Reaktorgebäude-Ringraum und als eine weitere Einwirkung von innen ein gleichzeitiger Bruch einer Leitung des Feuerlöschsystems mit der sich daraus ergebenden Überflutung des Ringraums angenommen. Bei derartigen Überflutungen besteht die Gefahr einer unzulässigen Beeinträchtigung sicherheitsrelevanter Komponenten. Deshalb muss die Wasserfreisetzung möglichst schnell durch die Feuerwehr gestoppt werden, was sich auf die Dauer der Brandlöschung auswirkt. Die Handlungsabläufe und erforderlichen Wechselwirkungen zwischen dem Wartpersonal und der Feuerwehr wurden mit dem GRS-Werkzeug MCDET in Verbindung mit dem Crew-Modul in insgesamt 2.400 zufälligen Ereignisabläufen modelliert.

Unter den getroffenen Modellannahmen zeigte sich, dass das Schließen eines Streckenschiebers des Feuerlöschsystems zum Stoppen des Wasseraustritts den größten Einfluss auf die Dauer bis zum Beginn der Brandbekämpfung hat. Hierbei ist vor allem die Verfügbarkeit der Werkzeuge zum Schließen der Streckenschieber relevant. Mit den Untersuchungen wurde gezeigt, dass die Modellierung komplexer Abläufe bei übergreifenden Einwirkungen mit Methoden der dynamischen PSA nicht nur möglich ist, sondern auch zur Identifikation kritischer Ereignisabläufe und relevanter Komponenten beitragen kann, welche sich mit Methoden der klassischen PSA nicht identifizieren lassen.

Vervollständigung von Methoden und Werkzeugen für probabilistische Sicherheitsanalysen

Im Rahmen des BMWi-Forschungsvorhabens RS1556 wurden die folgenden Methoden bzw. Werkzeuge für PSA weiterentwickelt /ROE 20/: das HST (*Hazards Screening Tool*) zum Screening von Einzeleinwirkungen und Einwirkungskombinationen, das GRS-Werkzeug pyRiskRobot zur automatisierten Integration übergreifender Einwirkungen in PSA-Modelle der Stufe 1 sowie das Werkzeug FaSTPro (*Fast Source Term Prognosis*) zur Prognose von Quelltermen zur Radionuklidfreisetzung während eines Unfallablaufes in einem Kernkraftwerk.

Das HST wurde insbesondere um einen ersten grundsätzlichen Identifikationsschritt vor dem eigentlichen Einwirkungsscreening ergänzt, basierend auf den Standorteigenschaften (geographisch, topographisch, klimatisch) einer zu untersuchenden kerntechnischen Anlage. Anhand dieser Charakteristika lassen sich direkt bestimmte Einwirkungen von außen bereits vor dem eigentlichen Screening ausschließen (z. B. ein Tsunami an einem Binnenstandort oder extreme Kälte an einem Tropenstandort). Dadurch wird der Aufwand für das qualitative Screening deutlich gesenkt.

Mittels pyRiskRobot können bei der Bearbeitung von Fehlerbäumen in PSA-Modellen wiederholt auftretende Schritte automatisiert ausgeführt werden. Die Automatisierung ist insbesondere bei der Einbindung übergreifender Einwirkungen mit ihren komplexen Ereignisabläufen in PSA-Modelle bzw. für Anlagenstandorte mit mehreren Reaktorblöcken sinnvoll. Dazu stellt pyRiskRobot die topologischen Grundoperationen Erzeugung, Modifikation und Duplizierung von Fehlerbäumen zur Verfügung. Aus diesen Grundoperationen entsteht eine Vielzahl von Fehlerbaummodellierungsoptionen für die Bearbeitung von PSA-Modellen. Die Modellierungsarbeiten können skriptbasiert innerhalb eines Jupyter-Notebooks formuliert und iterativ angewandt werden. Auch erlaubt pyRiskRobot interaktive Operationen über mehrere verknüpfte Fehlerbäume hinweg.

Zur Modellierung übergreifender Einwirkungen wird die zu analysierende Anlage in Raumbereiche unterteilt. Die Raumbereiche werden so gewählt, dass die baulichen Anlagenteile, Systeme und Komponenten (Englisch: structures, systems and components, SSC), die sich in demselben Raumbereich befinden, nahezu gleichzeitig durch die übergreifende Einwirkung beeinträchtigt werden. Die Auswirkungen der Einwirkung auf miteinander verbundene Raumbereiche kann als Schicht eines Netzwerks betrachtet werden. Die Vielzahl möglicher, unterschiedlicher Auswirkungen unterschiedlicher übergreifender Einwirkungen und Einwirkungskombinationen ergibt somit eine komplexe mehrdimensionale Netzwerkstruktur. Durch diese Darstellung können Abhängigkeiten zwischen Auswirkungen mehrerer übergreifender Einwirkungen in einem Raumbereich verdeutlicht werden. In weiteren Entwicklungsschritten sollen für pyRiskRobot unterschiedliche Netzwerkmaße identifiziert werden, die geeignet sind, wichtige Netzwerkelemente anzuzeigen und damit die Analyse und Modellierung von kausalen und korrelierten Einwirkungen zu unterstützen.

In Bezug auf das Quelltermprognosewerkzeug FaSTPro wurden dessen Anwendungsbereiche auf Quellterme bei Unfällen aufgrund übergreifender Einwirkungen für alle Anlagenbetriebszustände des Leistungs- und Nichtleistungsbetriebs erweitert und die Aus-

wirkungen von Notfallmaßnahmen in das Werkzeug integriert. Zudem wurde die Aussagesicherheit von Quelltermpagnosen analysiert und quantifiziert. Dadurch werden realistischere Prognosen von Radionuklidfreisetzungen in die Umwelt ermöglicht.

2.2 Methoden der PSA und IDPSA sowie Regeln und Richtlinien in Bezug auf anlageninterne Überflutungen

In dem im vorliegenden Bericht beschriebenen Forschungs- und Entwicklungsvorhaben 4721R01530 wurden unterschiedliche methodische Ansätze und Programme zur Modellierung einer PSA für anlageninterne Überflutungen genutzt. Die verwendeten Programme sind nachfolgend skizziert. Des Weiteren wird der aktuelle Specific Safety Guide der IAEA, SSG-3, Rev. 1 /IAE 24/, zur Durchführung von PSA der Stufe 1 in Bezug auf die Durchführung von PSA für anlageninterne Überflutungen zusammengefasst.

RiskSpectrum®

Das kommerzielle PSA-Programm RiskSpectrum PSA, kurz RiskSpectrum®, ist ein Programm zur Modellierung und Quantifizierung einer probabilistischen Risikoanalyse von komplexen kerntechnischen Anlagen /RIS 22/, /RIS 24/. Es wurde ursprünglich von Lloyds Register entwickelt und wird aktuell von der Firma RiskSpectrum kommerziell vertrieben. Das Programm wurde und wird in Deutschland für die PSA-Erstellung der meisten Kernkraftwerke eingesetzt. Die Modellierung von Systemen einer zu untersuchenden Anlage sowie stör- bzw. unfallauslösenden Ereignissen basiert auf einer Kombination von Ereignis- und Fehlerbäumen. Die Ereignisbäume werden statisch erstellt und bilden keinen zeitlichen Verlauf eines Ereignisses ab.

SAPHIRE

SAPHIRE (*Systems Analysis Programs for Hands-on Integrated Reliability*) ist ein nicht-kommerzielles, statisches PSA-Programm zur probabilistischen Risiko- und Zuverlässigkeitsanalyse, das vom Idaho National Laboratory (INL) entwickelt wird /INL 22/. Damit können insbesondere große Fehlerbäume mit bis zu 64.000 Basisereignissen und Gates modelliert und ausgewertet werden. Mit SAPHIRE ist es möglich, Rechnungen fernbedient am PC (remote) oder über eine Cloud durchzuführen. SAPHIRE wurde beispielsweise von der NASA für die PSA der *Internationalen Raumstation ISS* sowie für die PSA des Mars Exploration Rovers eingesetzt. Weiterhin wird SAPHIRE von unterschiedlichen

wissenschaftlichen Organisationen, wie beispielsweise der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Zürich angewendet /AYO 22/.

MCDET – Methode zur integralen deterministisch-probabilistischen Sicherheitsanalyse

Die Software MCDET wurde von der GRS als Werkzeug zur dynamischen Ereignisbaumanalyse entwickelt. Diese dynamische Analyse unterscheidet sich von der klassischen, statischen PSA, wie sie z. B. mit RiskSpectrum® oder SAPHIRE durchgeführt wird, in zwei wesentlichen Punkten /PES 18/: zum einen wird der zeitliche Ablauf von Ereignissen unter Berücksichtigung von Unsicherheiten abgebildet, zum anderen können komplexe, zeitlich veränderliche Prozesse mit deterministischen Simulationsprogrammen modelliert werden. Der während einer Analyse entstehende Ereignisbaum wird kontinuierlich erstellt und hängt von probabilistischen Parametern (z. B. der Wahrscheinlichkeit von Systemausfällen zu zufälligen Zeitpunkten), von deterministischen Größen aus dem Simulationsprogramm (z. B. der Überschreitung eines Temperaturgrenzwerts) sowie von modellierten menschlichen Handlungen (z. B. der Wirksamkeit von Brandbekämpfungsmaßnahmen) ab. MCDET kann dazu auf Ergebnisse aus dem Simulationsprogramm reagieren sowie das Simulationsprogramm steuern und auf diese Weise neue Pfade im Ereignisbaum erstellen.

In /PES 18/ wird eine dynamische probabilistische Analyse mittels MCDET für ein Dampferzeuger-Heizrohrversagen beschrieben. Zur Simulation der thermohydraulischen Vorgänge im Reaktor wurde dabei das deterministische Programm ATHLET verwendet. Insgesamt wurden 4.216 unterschiedliche Unfallsequenzen simuliert, die sich aus aleatorischen (d. h. statistischen) und epistemischen (d. h. Kenntnisstand-) Unsicherheiten ergeben. Die aleatorischen Unsicherheiten in der Modellierung des Ausfallverhaltens der Druckhalterventile und der Vorschädigung des Dampferzeuger-Heizrohrs verdeutlichen die Auswirkungen derartiger Parameter auf das Ergebnis der Untersuchung. Eine Schlussfolgerung aus den Ergebnissen in /PES 18/ ist, dass viele Ergebnisse aus der dynamischen PSA in eine klassische PSA eingebunden werden können. Somit stellt die dynamische PSA eine wesentliche Ergänzung zur klassischen PSA dar.

IAEA Specific Safety Guide SSG-3, Rev. 1: Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants

In den Abschnitten 7.69 bis 7.98 des IAEA Safety Guides SSG-3, Rev. 1 /IAE 24/ sind das Vorgehen bei und die Anforderungen an die Durchführung einer PSA der Stufe 1 für anlageninterne Überflutungen (siehe Abb. 2.1) dargestellt.

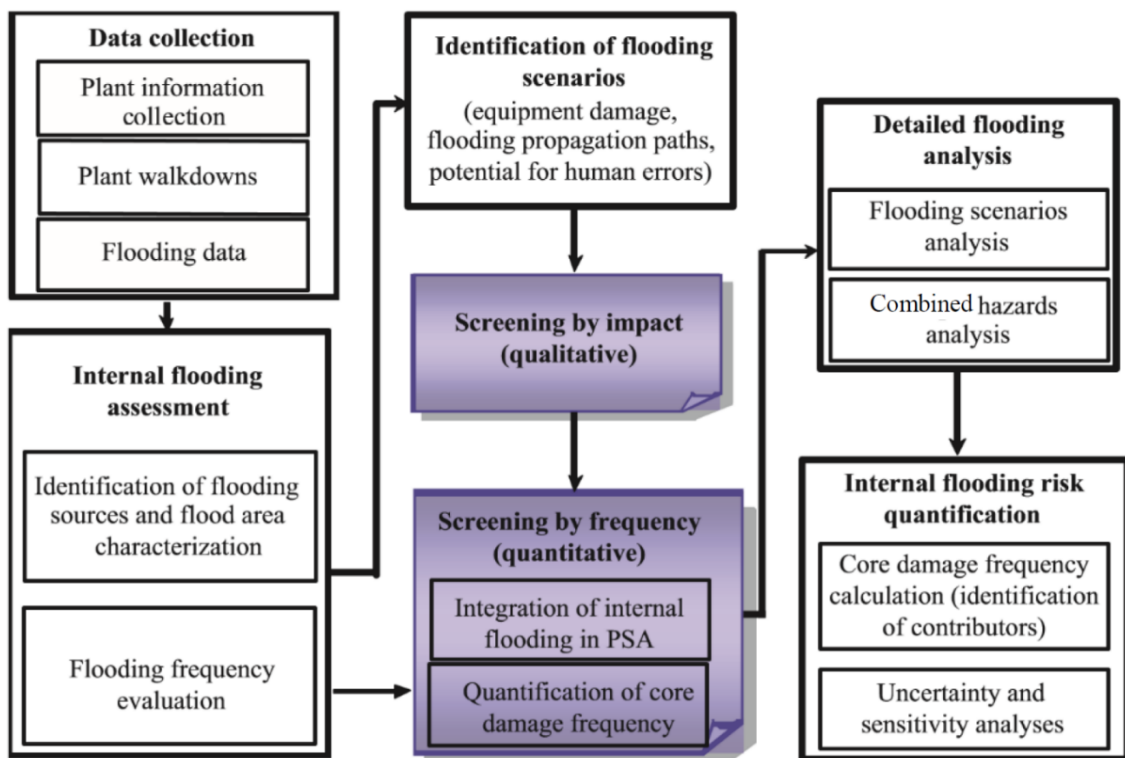


Abb. 2.1 Vorgehen bei der Entwicklung einer PSA der Stufe 1 für anlageninterne Überflutungen, aus /IAE 24/

In einem ersten Schritt sind die Quellen anlageninterner Überflutungen zu identifizieren und zu charakterisieren (z. B. Wasserinventar, Ausflussrate, Temperatur, Eintrittshäufigkeit von Leckagen). Des Weiteren ist die Anlage in räumlich getrennte Überflutungsgebiete aufzuteilen, wobei die Wasserausbreitung von Bereich zu Bereich zu berücksichtigen ist. Für diese Bereiche sind die möglichen Auswirkungen (z. B. durch die Überflutung bedingte auslösende Ereignisse, Komponentenausfälle) zu ermitteln. Zu Ausfällen kann es nicht nur durch die Überflutung selbst, sondern auch durch eine hohe Feuchtigkeit der Umgebungsluft kommen. Anschließend erfolgt ein Screening, bei welchem Überflutungsszenarien, die nicht zu auslösenden Ereignissen oder zum Ausfall von sicherheitstechnisch relevanten Komponenten führen können (qualitativ), von einer weiteren Betrachtung ausgeschlossen werden. Das Screening kann auch quantitativ mittels pro-

probabilistischer Kriterien, z. B. durch Abschätzung des Beitrags eines Szenarios zur Kernschadenshäufigkeit, durchgeführt werden.

Für die nach dem Screening verbliebenen Szenarien ist eine detaillierte probabilistische Analyse durchzuführen. Zu betrachten sind dabei auch Kombinationen von Einwirkungen, wie z. B. anlageninterne Überflutungen als Folge von Erdbebeneinwirkungen oder anlageninternen Bränden. Die detaillierte probabilistische Bewertung der relevanten Überflutungsszenarien erfolgt durch Ereignis- und Fehlerbäume, welche in die Gesamt-PSA der Stufe 1 eingefügt werden. Dabei sollen insbesondere die zeitliche Entwicklung der Überflutung sowie Überflutungsbarrieren, Überflutungsmeldungen und Maßnahmen zur Abschottung in die Analysen einbezogen werden.

2.3 Aktuelle internationale Untersuchungen zu Methoden der dynamischen PSA sowie zu PSA für anlageninterne Überflutungen

Nachfolgend sind einige Veröffentlichungen zur dynamischen PSA sowie zur PSA für anlageninterne Überflutungen zusammengefasst dargestellt. Diese Zusammenstellung basiert insbesondere auf Erkenntnissen zu Beginn des Vorhabens 4721R01530 mit einem speziellen Fokus auf relevante Beiträge zu beiden Themenbereichen bei der internationalen Fachkonferenz ANS PSA 2021. Diese Auswahl gibt zwar keinen vollständigen, aber aktuellen, fachspezifischen Eindruck zu den internationalen Entwicklungen in Bezug auf Methoden der PSA generell und zur Behandlung anlageninterner Überflutungen in der PSA.

Implementation of Methodology for Maintenance-Induced Internal Floods

Die Autoren dieser Veröffentlichung /WOL 21/ haben eine bestehende Methode zur Bestimmung der Eintrittshäufigkeit anlageninterner Überflutungen bei Wartungsarbeiten weiterentwickelt und anhand eines fiktiven Beispiels verdeutlicht. Die vom Electric Power Research Institute (EPRI) entwickelte Methode „EPRI 3002000079“ (siehe /KNF 20/ und /EPR 13/) beinhaltet insbesondere das Bayes'sche Update generischer Daten mit anlagenspezifischen Daten zu Überflutungsereignissen für die Ermittlung der Eintrittshäufigkeit. Die Erweiterung der Methoden bezieht sich auf die Abschätzung von Auswirkungen, möglichen Gegenmaßnahmen und deren Einbindung in eine PSA.

In Bezug auf die Auswirkungen von Überflutungsereignissen empfehlen die Autoren, Überflutungen aus Rohrleitungen zu berücksichtigen, die nicht isoliert werden können.

Bei der Modellierung von Gegenmaßnahmen greifen die Autoren auf vorhandene, nicht näher beschriebene, Maßnahmen zurück. Abschließend wird auf die niedrige Anzahl an beobachteten Überflutungsereignissen bei Wartungsarbeiten verwiesen und die Schlussfolgerung gezogen, dass eine Vernachlässigung solcher Ereignisse mit der vorgeschlagenen Methode genauer begründet werden sollte.

Using Operational Experience to Support Dynamic PRA Activities

Die Autorinnen und Autoren untersuchten insgesamt fünf Ereignisse in Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren in Bezug auf dynamische Elemente und ob dynamische PSA helfen können, solche Ereignisse besser zu verstehen /GON 21/. Bei den fünf Ereignissen handelt es sich um

- ein anlagenexternes Überflutungsereignis aufgrund einer Einwirkungskombination im französischen Kernkraftwerk Le Blayais im Jahr 1999,
- einen Turbinenbrand in der spanischen Anlage Vandellos im Jahr 1989,
- den Ausfall der externen Stromversorgung im US-amerikanischen Kernkraftwerk Duane Arnold 2 im Jahr 2020,
- den Ausfall der Hauptspeisewasserversorgung in der US-amerikanischen Anlage Davis-Besse im Jahr 1985 und
- die Kernschmelze im Natrium-Reaktor am Santa Susana Field Laboratory bei Los Angeles in Kalifornien im Jahr 1959.

Die Auswahl war nicht repräsentativ und erlaubt daher nur qualitative Schlussfolgerungen.

Ein beschriebenes Ereignis ist die externe Überflutung im Kernkraftwerk Le Blayais, einer 4-Block DWR-Anlage, im Jahre 1999. Das Ereignis wurde durch einen schweren Sturm ausgelöst, der sowohl den Verlust der externen Stromversorgung in zwei Blöcken als auch Überflutungen innerhalb von zwei Reaktorblöcken verursachte. Dabei waren mehrere dynamische Interaktionen von Bedeutung, u. a. der zeitliche Beginn des Notstromfalls, die Überflutung der Reaktorblöcke, der Beginn der Maßnahmen zur Reaktorabschaltung sowie der Wiederherstellung der Stromversorgung. Die Interaktionen spielten sich in einem zeitlichen Rahmen von mehreren Stunden bis einigen Tagen ab, was laut den Autoren bei der Modellbildung in einer dynamischen PSA berücksichtigt werden

sollte. Weiterhin wird in der Ausarbeitung betont, dass die Annahme von nicht wiederherstellbaren Komponentenausfällen beim Überschreiten des kritischen Wasserstands sehr konservativ ist. Diese Annahme sollte daher nur in Grobanalysen verwendet werden, nicht jedoch, wenn man die Analysen für die Erarbeitung von Maßnahmen und zur Durchführung von Schulungen verwenden will.

Abschließend werden die dynamischen Elemente zusammengefasst, insbesondere die Interaktionen zwischen dem Personal, Interaktionen der Systeme, Wechselwirkungen aufgrund übergreifender Einwirkungen von innen und außen und deren Kombinationen. Es wird betont, dass durch dynamische Analysen innerhalb einer klassischen PSA einige Vorgänge realistischer wiedergegeben werden können.

Dynamic PSA Studies for Advanced Reactor Using RAVEN

In dieser Veröffentlichung wird eine dynamische Ereignisbaumanalyse eines Klasse IV-Stromausfalles in einem indischen Advanced Heavy Water Reactor (AHWR) von 300 MW_e beschrieben /PRA 21/. Zur Simulation der thermohydraulischen Vorgänge innerhalb des Reaktors wurde die Software Reactor Excursion and Leak Analysis Program (RELAP5) verwendet, die Unsicherheiten wurden mit dem Programm Reactor Analysis and Virtual Control Environment (RAVEN) analysiert. Der untersuchte Reaktor beinhaltet einige passive Sicherheitseinrichtungen, beispielsweise zur Notkühlung des Kerns, zur Vergiftung, den Isolation Condenser zur Nachwärmeabfuhr sowie einen passiven Sicherheitseinschluss. Weiterhin dient ein großer Wasservorrat oberhalb des Reaktors als passive Wärmesenke für zahlreiche passive Systeme.

Bei dem simulierten Stromausfall werden in einem klassischen Ereignisbaum folgende Sequenzen berücksichtigt:

1. Ausfall der Stromversorgung,
2. Reaktorschutz,
3. passive Vergiftung,
4. Isolation Condenser,
5. Klasse 3-Notstromversorgung,
6. Handmaßnahme zum Einbinden der Nachwärmeabfuhr und
7. aktive Nachwärmeabfuhr.

Die dynamische PSA für dieses Ereignis umfasst dabei folgende dynamische Elemente: Zeitpunkt und Menge der Vergiftung, Variation der kritischen Brennstofftemperatur als Erfolgskriterium sowie den Zeitpunkt der Handmaßnahme zum Einbinden der Nachwärmabfuhr mit und ohne Isolation Condenser. Die dynamische Ereignisbaumanalyse ergibt eine deutlich längere Zeitspanne, bis die kritische Brennstofftemperatur im Vergleich zur deterministischen Analyse erreicht wird.

Mutual Integration of Classical and Dynamic PRA

In dieser Veröffentlichung von D. Mandelli /MAN 19/ wird die Verbindung der Methode der dynamischen PSA, RAVEN, mit einem klassischen PSA-Programm, z. B. SAPHIRE, beschrieben. Dazu werden zunächst Ansätze aufgezeigt, wie man klassische PSA-Ansätze in eine dynamische PSA einbinden kann. Zudem werden Vorgehensweisen vorgestellt, wie man dynamische PSA-Ergebnisse in eine klassische PSA integrieren kann.

Die dynamische PSA wurde so erweitert, dass unterschiedliche heterogene Codes (MELCOR, RELAP5, SAPHIRE) eingebunden werden können. Es werden Algorithmen beschrieben, um sowohl Fehler- als auch Ereignisbäume eines klassischen PSA-Modells nutzen zu können. Zudem wird gezeigt, wie Ergebnisse einer dynamischen PSA in ein klassisches PSA-Modell eingebunden werden können. Dazu werden zunächst die Ereignisablauf-Sequenzen identifiziert, die deutliche Unterschiede zwischen dynamischer und klassischer PSA aufweisen. Anschließend wird in die Sequenz des klassischen PSA-Modells ein neues Funktionsereignis eingefügt und mit einem Fehlerbaum verknüpft, der die Ausfallwahrscheinlichkeit des Ereignisses aus dem dynamischen PSA-Modell repräsentiert. In diesem Fehlerbaum wird auch die Zeitabhängigkeit der Ausfallwahrscheinlichkeit eingebunden. Diese methodischen Ansätze wurden mit unterschiedlichen Beispielen, u. a. einem Notstromfall, in der Veröffentlichung illustriert.

Dynamic PSA Framework With Optimization Algorithm Applied to a Large LOCA Scenario

Die koreanischen Autoren schlagen einen Gruppierungs- und Optimierungs-Algorithmus vor, um die Anzahl der notwendigen Simulationen in einer dynamischen PSA zu reduzieren /PRA 21/. Der Algorithmus umfasst insgesamt sechs Schritte:

1. Auswahl des auslösenden Ereignisses,
2. Beschreibung des Ereignisablaufes und der Systemausfälle,

3. Erzeugung der dynamischen Szenarien,
4. leistungsoptimierte Gruppierung der Szenarien,
5. optimierte Simulation der gruppierten Szenarien und
6. Quantifizierung des Risikos.

Der Algorithmus wird für einen Kühlmittelverlust-Störfall angewendet, dabei wird die Thermohydraulik mit dem Code MARS-KS simuliert.

Die Schritte 4 und 5 werden besonders erläutert. In Schritt 4 werden die Szenarien anhand relevanter Variablen gruppiert, hier der Kühlmittelaustrittsrate und der Zeit. Dabei können Szenarien mit unterschiedlichen Systemausfällen zusammengefasst werden, die zu einem ähnlichen Verlauf der Austrittsrate führen. In Schritt 5 sollen anschließend alle möglichen Szenarien identifiziert werden, die zu keinem Kernschaden führen. Dazu werden in einem initialen Simulationslauf Szenarien in einem breiten Bereich von günstigen Bedingungen zu ungünstigen Bedingungen simuliert, bis das erste Szenario mit einem Kernschaden identifiziert ist. Innerhalb des Bereichs mit Szenarien ohne Kernschaden werden alle möglichen weiteren Szenarien simuliert. Anschließend wird, ausgehend von dem simulierten Bereich, in allen Dimensionen erneut ein initialer Simulationslauf unter den ungünstigen Bedingungen durchgeführt. Dadurch können alle Szenarien ohne Kernschaden identifiziert werden. Die bedingte Kernschadenswahrscheinlichkeit kann anschließend aus der Summe aller Szenarien ohne Kernschaden abgeleitet werden.

Am Beispiel eines Kühlmittelverluststörfalls (KMV) wurden mit den drei Parametern 'Sicherheitseinspeisung', 'Niederdruck-Sicherheitseinspeisung' und unterschiedlichen Zeiten der Einspeisung insgesamt 6,45 E08 diskrete Szenarien identifiziert. Schritt 4 des Algorithmus führte zu insgesamt 960 Gruppen. Mit dem Optimierungsalgorithmus in Schritt 5 wurden insgesamt 612 Szenarien simuliert, was einem Anteil von 64 % aller Szenariengruppen entspricht. Daraus wurde die Schlussfolgerung gezogen, dass mit dem Algorithmus eine Vielzahl dynamischer Szenarien untersucht werden kann, wobei nur ein geringer Anteil mit rechenaufwändigen Codes simuliert werden muss.

Data Post-Processing for Dynamic Probabilistic Risk Assessment

Bei dynamischen PSA entstehen häufig sehr große Datensätze, welche die zeitlichen Verläufe von Datenpunkten in jedem simulierten Szenarium repräsentieren /ZHA 21/.

Um die Auswertung der Daten zu vereinfachen, haben die Autoren eine Methode vorgeschlagen und auf zwei Beispiele angewendet, die auf der Clusterbildung innerhalb des Datensatzes beruht.

Die Methode basiert auf drei Schritten. Im ersten Schritt werden die in der dynamischen PSA erzeugten Daten in einer zweidimensionalen Matrix zusammengefasst. Danach wird in einem zweiten Schritt ein erster Satz an Medoiden aus der Matrix erzeugt. Ein Medoid ist hier ein simuliertes Szenario, das alle Szenarien innerhalb des Clusters repräsentiert. Dieser erste Satz an Medoiden wird anschließend im letzten Schritt mit einem Algorithmus optimiert. Man erhält eine geringere Anzahl an Szenarien, die alle simulierten Szenarien repräsentieren. Durch diese drei Schritte kann die Auswertung der Ergebnisse einer dynamischen PSA somit auf weniger Szenarien konzentriert werden.

Margin Sensitivity Analysis for Model Selection in Nuclear Power Plant Probabilistic Safety Assessment

Die dynamische PSA erlaubt es, die Prozesse in einem Unfallablauf detaillierter darzustellen, als dies in einer klassischen PSA möglich ist [MAI 17]. Der Preis dafür ist allerdings ein erhöhter Rechenaufwand. Um die Entscheidung zu vereinfachen, ob für das zu analysierende Szenario eine dynamische Analyse sinnvoll ist, wird eine Richtlinie, basierend auf einer neuartigen Sensitivitätsanalyse vorgeschlagen. Diese wird auf den dynamischen probabilistischen Sicherheitsabstand (dynamic probabilistic sensitivity margin, DPSM) angewendet.

Dieser Ansatz wird beispielhaft anhand zweier möglicher Szenarien erprobt. Dabei handelt es sich zum einen um einen Station Black-out (SBO), gefolgt von einem Kühlmittelverlust an einer Dichtung (SLOCA) für einen 3-Loop DWR und zum anderen um einen Unfallablauf in einem Dampferzeuger mit u-förmigen Heizrohren. Im ersten Fall zeigt sich, dass die dynamische Systementwicklung nicht von der Dynamik der Eingangsvariablen abhängt. Im zweiten Fall hingegen zeigt die Sensitivitätsanalyse einen deutlichen Einfluss der Dynamik verschiedener Eingangsparameter auf den Unfallablauf, wie z. B. Zeitpunkte, Größe und Reihenfolge von Ereignissen. Daraufhin wurde eine DET-Methode angewandt, um die verschiedenen Endzustände unter Berücksichtigung der Eingangsparameterdynamik untersuchen zu können. Dabei stellte sich heraus, dass sich bestimmte Unfallabläufe in der klassischen, statischen PSA in der dynamischen PSA in eine oder mehrere verschiedene Sequenzen aufteilen lassen, die in manchen Fällen auch zu unterschiedlichen Endzuständen führen.

2.4 Zusammenfassung

Im Rahmen der Weiterentwicklung und Verbesserung von Methoden der PSA durch die GRS wurde zunächst das Werkzeug HST zum umfassenden systematischen Screening übergreifender Einwirkungen und Einwirkungskombinationen entwickelt. In Bezug auf die übergreifende Einwirkung von innen „anlageninterne Überflutung“ ergab ein mit dem HST durchgeführtes Screening für eine Referenzanlage vom Typ Konvoi-DWR, dass nur Überflutungsereignisse aus dem Reaktorgebäude-Ringraum für die PSA von Relevanz sind. Die Untersuchung von Einwirkungskombinationen mit internen Überflutungen zeigte zudem, dass die Kombination eines Brandes im Ringraum mit einer anlageninternen Überflutung aus dem Feuerlöschsystem ein relevantes Szenario darstellt. Zu diesem Szenario wurden anschließend detaillierte Untersuchungen mit der von der GRS entwickelten Methode MCDET der dynamischen PSA durchgeführt und aufgezeigt, welche Maßnahmen und Systeme für den Erfolg der Brandbekämpfung bei einem solchen Szenario ausschlaggebend sind. Die Arbeiten der GRS bilden somit die Grundlage für die Auswahl der anlageninternen Überflutung für das Forschungs- und Entwicklungsvorhaben 5721R01530.

Der IAEA Specific Safety Guide SSG-3, Rev. 1 /IAE 24/ beinhaltet Vorgaben zur Durchführung einer PSA der Stufe 1 für anlageninterne Überflutungen. Dabei werden auch dynamische Elemente erwähnt. Die Nutzung bestimmter PSA-Programme wird jedoch nicht vorgegeben, um die Vielfalt der vorhandenen Programme nicht einzuschränken. Die Auswirkung der Programmauswahl zur Modellierung auf die Ergebnisse einer PSA für anlageninterne Überflutungen sollte deshalb in diesem Forschungsvorhaben untersucht werden. Dazu werden insbesondere die Vor- und Nachteile der dynamischen PSA im Vergleich zur klassischen PSA herausgearbeitet. Als Hilfsmittel für die Modellierung mit den klassischen PSA-Programmen wird das von der GRS entwickelte Werkzeug py-RiskRobot verwendet.

Zusätzlich wurden in den letzten Jahren verschiedene Fachbeiträge veröffentlicht, die sich mit der Entwicklung bzw. Anwendung von Untersuchungen zu anlageninternen Überflutungen oder der dynamischen PSA beschäftigen. Zur Bestimmung der Eintrittshäufigkeiten interner Überflutungen wurde das Bayes'sche Updating angewendet, um die Betriebserfahrung besser auswerten zu können. Der Nutzen der dynamischen PSA wurde anhand einiger Ereignisse aus der Betriebserfahrung diskutiert, darunter auch anlageninternen Überflutungen. Um den rechentechnischen Aufwand der Durchführung und Auswertung zu reduzieren, wurden in zwei Veröffentlichungen Optimierungsalgo-

rithmen vorgestellt. Zudem wurde gezeigt, wie klassische PSA-Modelle und Methoden der dynamischen PSA miteinander verknüpft werden können. Auch wenn der Fokus dieser Publikationen nicht direkt auf der eigentlichen Zielsetzung des Forschungsvorhabens 4721R01530 liegt, können insbesondere der Beitrag zur optimierten Auswertung /ZHA 21/ und der zur Verknüpfung von dynamischen und klassischen PSA-Ergebnissen /MAN 19/ für dieses Forschungsvorhaben von Interesse sein.

3 Definition des Szenarios einer anlageninternen Überflutung

Bei vielen Ereignissen infolge übergreifender Einwirkungen in Kernkraftwerken, beispielsweise anlageninternen Bränden oder Überflutungen, spielen Personalhandlungen eine zentrale Rolle. Das in der Regel geplante Vorgehen zur Begrenzung der Folgen des Ereignisses und dessen zeitlicher Ablauf sind gekennzeichnet durch zahlreiche Wechselwirkungen zwischen dem Anlagenpersonal, physikalischen Prozessen (Temperaturen, Drücke, Rauchentwicklung, Wasserstände bzw. Füllstände), sowie stochastischen Einflüssen bzw. Unsicherheiten (z. B. bzgl. der Entwicklung des Ereignisses, des Ausfalls von Komponenten und Systemen, oder der Dauer von Maßnahmen). So können beispielsweise Systemzustände oder Prozessparameter bestimmte Handlungen des Personals hervorrufen, z. B., wenn ein Sumpffüllstand einen kritischen Wert erreicht. Handlungen des Personals können wiederum einen unmittelbaren Einfluss auf Systemzustände und damit auf den weiteren Ereignisablauf haben. Wenn z. B. ein Ventil manuell geschlossen wird, wirkt sich diese Zustandsänderung unmittelbar auf den Ereignisablauf aus. Dabei kann zudem der Zeitpunkt einer Handlung einen wesentlichen Einfluss auf den Ereignisablauf haben.

In klassischen PSA-Modellen können die komplexen zeitlichen Wechselwirkungen zwischen Personalhandlungen und der Prozess- bzw. Systemdynamik nur indirekt berücksichtigt werden, sie lassen sich jedoch in einer dynamischen PSA gut modellieren. Um die Vor- und Nachteile dieser unterschiedlichen Ansätze zu untersuchen, wird in diesem Vorhaben ein Vergleich von klassischen und dynamischen PSA-Methoden durchgeführt. Dabei sollen das Vorgehen der klassischen und das der dynamischen PSA-Modellierung einander gegenübergestellt und die mit den Modellen verbundenen Vor- und Nachteile diskutiert werden.

Bei einer anlageninternen Überflutung spielen das Zusammenwirken von Systemzuständen, Prozessgrößen und Personalhandlungen sowie zeitliche Aspekte eine zentrale Rolle für die Sicherheit der Anlage. Diese Eigenschaften sollen deshalb auch in einer PSA der Stufe 1 für anlageninterne Überflutungen berücksichtigt werden /IAE 24/. Daher werden anlageninterne Überflutungen für den Methodenvergleich der klassischen und dynamischen PSA verwendet.

3.1 Auswahl des Szenarios

Der aktualisierte IAEA Specific Safety Guide SSG-3, Rev. 1 /IAE 24/ stellt den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik probabilistischer Sicherheitsanalysen dar. Dies schließt auch die probabilistische Bewertung anlageninterner Überflutungsereignisse ein. In SSG-3 /IAE 24/, § 7.72 ff. wird dargelegt, wie relevante Szenarien aufgrund anlageninterner Überflutungen spezifiziert werden sollen. Dabei sind folgende Informationen zu berücksichtigen:

- mögliche Überflutungsquellen (Rohrleitungen, Behälter, Brennelementbecken etc.), dabei auftretende Überflutungsmechanismen (Brüche, Leckagen, Aktivierung von Sprüh-Systemen, menschliche Handlungsfehler usw.),
- Charakterisierung möglicher Überflutungen (Wasservolumen, Ausflussrate, Temperatur, Dampf etc.) sowie
- Einrichtungen zur Erkennung und Meldung von Überflutungen sowie kritische Höhen von PSA-relevanten Komponenten, räumliche Abmessungen usw.

Darauf aufbauend wird die zu untersuchende Anlage in Überflutungsbereiche eingeteilt. Diese Bereiche können im Hinblick auf Überflutungen als unabhängig betrachtet werden. Für jeden Überflutungsbereich werden die SSC definiert, die durch eine Überflutung geschädigt werden können. Daraus ergeben sich die möglichen Szenarien einer Überflutung (Kombination aus Überflutungsbereich, betroffener Quelle, Überflutungsmechanismus, von der Überflutung betroffene SSC). Anschließend wird eine Vorauswahl PSA-relevanter Szenarien getroffen. Dieses Screening erfolgt entweder qualitativ über ihre Auswirkungen auf die Anlage oder quantitativ über die Eintrittshäufigkeit. Alle Szenarien, die durch das Screening nicht ausgeschlossen werden können, sind in der PSA detailliert zu untersuchen.

In /ROE 17/ (Abschnitte 4.2.1 bis 4.2.5) des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens RS1539 wurden u. a. auch anlageninterne Überflutungen in einer deutschen Referenzanlage untersucht. Das dort verwendete Verfahren entspricht dem in SSG-3, Rev. 1 /IAE 24/ beschriebenen Verfahren. Es wurden alle für die PSA relevanten Gebäude im Hinblick auf mögliche Überflutungsszenarien untersucht:

- Sicherheitsbehälter (Innenraum),
- Reaktorgebäude-Ringraum (kurz Ringraum),

- Frischdampf- und Speiswasserarmaturenkammer,
- Notspeisegebäude,
- Notstromdieselgebäude,
- Schaltanlagegebäude,
- Nebenkühlwasserpumpenbauwerke,
- Reaktorhilfsanlagegebäude,
- 400 kV-Schaltheis,
- 110 kV-Schaltheis sowie
- Verbindungen zwischen sicherheitstechnisch wichtigen Gebäuden.

Anschließend wurden für die Gebäude Überflutungsbereiche definiert und deren Potenzial zur Schädigung von SSC bestimmt. Die einzigen als relevant identifizierten Überflutungsbereiche befinden sich im Ringraum. Es wurde festgestellt, dass im Ringraum eine Wasserhöhe, die zu einer unzulässigen Schädigung von SSC führt, nicht erreicht werden kann. Diese Feststellung wird durch die ausreichende Abflussmenge und ausreichende Karenzzeiten zur Absperrung defekter wasserführender Systeme begründet. Ein Absperrern von Leitungen ist dabei in folgenden Systemen notwendig:

- Feuerlöschsystem SGB für den nuklearen Bereich,
- JNA-Leck im Ringraum bei Nachkühlbetrieb und
- Deionatversorgung GHC.

Bei einer Leckage im Feuerlöschwassersystem SGB im Ringraum der Referenzanlage können bei Ausfall der die Leckage begrenzenden Maßnahmen sicherheitstechnisch wichtige Komponenten im Ringraum überflutet werden. Dabei können insbesondere im Ringraum befindliche Messumformer oder Pumpen geschädigt werden, was die Sicherheit der Referenzanlage einschränken und ein Abfahren der Ablage notwendig machen kann. Überflutungen des Ringraums durch Freisetzung von Wasser aus anderen Systemen sowie Überflutungen in anderen Gebäudeteilen wurden demgegenüber als nicht sicherheitsrelevant und deshalb als vernachlässigbar bewertet.

Das Feuerlöschsystem SGB hat insofern eine besondere sicherheitstechnische Bedeutung, da im Falle eines Bruchs einer Löschwasserleitung im Ringraum ohne Handmaßnahmen der Ausfluss von Wasser aus den redundanten und diversitären Wasserentnahmeknoten (Brunnenwasser, Flusswasser) nicht gestoppt wird. Das Stoppen der Wasserzufuhr muss vielmehr über das Schließen der Streckenschieber der betroffenen Löschwasserleitung erfolgen. Ist das Schließen der Löschwasserleitungen nicht erfolgreich, können durch den Wassereintrag der Feuerlöschpumpen unzulässige Wasserhöhen im Ringraum erreicht werden. Damit können auf der untersten Ebene des Ringraums installierte, sicherheitstechnisch wichtige Komponenten unzulässigen hydrologischen Beeinträchtigungen ausgesetzt werden. Ein Szenario einer Leckage des Feuerlöschsystems SGB im Ringraum hat damit sowohl das Potenzial zum Ausfall mehrerer sicherheitsrelevanter Systeme, bei welchem auch zeitliche Aspekte (Anstieg des Wassers, benötigte Dauer für die Diagnose der Leckage, Durchführung der Handmaßnahmen zum Absperrern des Feuerlöschsystems) relevant sind.

Das Szenario „Leckage des Feuerlöschsystems SGB im Ringraum“ wurde daher als geeignetes Anwendungsbeispiel für den in diesem Vorhaben durchzuführenden Methodenvergleich ausgewählt. Es basiert auf dem im Vorhaben RS1539 /ROE 17/ definierten Überflutungsszenario. Eine Ereigniskombination der Ringraum-Überflutung mit einem Brand in einem Kabelkanal (ohne kausalen Zusammenhang) wurde mit dynamischen Simulationen bereits untersucht, die Ergebnisse sind in /BER 17/ beschrieben.

Das Szenario hat eine sehr geringe Eintrittshäufigkeit, da die beiden Löschwasserleitungen des Feuerlöschsystems SGB im Ringraum nur bis zu deren Absperrarmaturen mit Druck beaufschlagt sind. Diese mit Wasser befüllten Leitungsbereiche sind nach dem Eintritt in den Ringraum jeweils etwa 4 m lang. Ein Leitungsbruch ist damit sehr selten. Weiterhin sind die zur Verfügung stehenden Zeiten für Gegenmaßnahmen (Karenzzeiten) sehr groß und die Zuverlässigkeit der Detektion und der Warnmeldungen sehr hoch. Dadurch ist die durch das Szenario verursachte Schädigung sicherheitsrelevanter Komponenten im Grunde auszuschließen. Deshalb wird im hier durchgeführten Vergleich der PSA-Methoden die Eintrittshäufigkeit des Szenarios nicht quantifiziert.

3.2 Beschreibung des Szenarios

In IAEA SSG-3, Rev. 1 /IAE 24/, § 7.98 ff. werden Anmerkungen zum Vorgehen bei der Detailanalyse anlageninterner Überflutungen gemacht. Demnach sollen insbesondere

der zeitliche Ablauf eines Überflutungsszenarios sowie Gegenmaßnahmen durch Personalhandlungen berücksichtigt werden. Die Modellierung des Ereignisablaufes erfolgt mittels Ereignis- und Fehlerbäumen auf Basis des PSA-Modells für anlageninterne Ereignisse. Dabei sind die Ausfallwahrscheinlichkeiten sicherheitsrelevanter SSC und Personalhandlungen im Zuge von Gegenmaßnahmen auf ihre Wirksamkeit zu überprüfen. Bei der Bewertung der Ausfallwahrscheinlichkeiten der Personalhandlungen sind insbesondere mögliche Beschränkungen von Zugängen zu Anlagenbereichen, erhöhte Stressniveaus des Personals sowie der Ausfall von Fehlermeldungen ebenso wie falsche Fehlermeldungen zu berücksichtigen.

In dem hier betrachteten Szenario wird von einem Bruch einer Löschwasserleitung des Feuerlöschsystems SGB zwischen deren Eintritt in den Ringraum und deren Absperrarmatur ausgegangen. Aufgrund des darauffolgenden Druckabfalls werden die Feuerlöschpumpen aktiviert, siehe /KKW 12/, Abschnitt 3.3.3.4. Reicht die Förderleistung der Feuerlöschpumpen nicht aus, um den Druck auf 8 bar zu halten, werden die Wasserhaltungspumpen aktiviert. Die Förderleistung einer Wasserhaltungspumpe (500 m³/h) ist größer als die einer Feuerlöschpumpe (166 m³/h). Deshalb wird eine Speiserate von 500 m³/h der Leckage aus einer Wasserhaltungspumpe angenommen, da dieser Fall abdeckend ist.

Da sich die Leckage unterhalb der Stauhöhe der Löschwasserentnahmestelle befindet, kann der Wasserausfluss der Leckage nicht allein durch das Ausschalten der Feuerlöschwasserpumpen bzw. der Wasserhaltungspumpen gestoppt werden, sondern erfordert das Absperrern der betroffenen Löschwasserleitung. Zum Absperrern sind mehrere Absperrarmaturen vorhanden. Kurze Wasserfreisetzungen sind aufgrund der Anordnung sicherheitsrelevanter SSC ohne weitere Auswirkungen auf die Anlage, langfristig muss die Freisetzung jedoch gestoppt werden. Die möglichen Leckagen sowie die Anordnung der Löschwasserleitungen und ihrer Armaturen im Ringraum sind in Abb. 3.1 dargestellt.

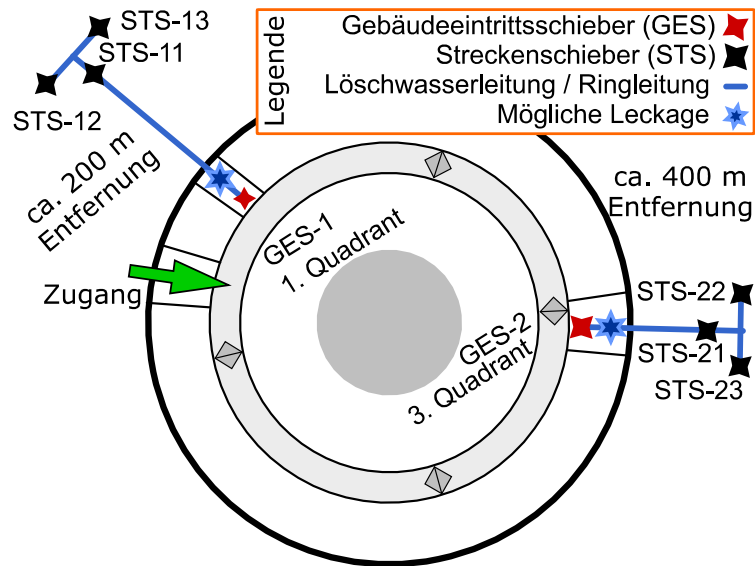


Abb. 3.1 Schematische Darstellung des Reaktorgebäude-Ringraums sowie der relevanten Streckenschieber (STS) des Feuerlöschsystems

Der Wasseraustritt aus der Leckage wird durch mehrere Detektoren erkannt und gemeldet, vgl. /KKW 12/, S. 4.3-146 bzw. Abschnitt 4.3.2.45. Zu Beginn erfolgt beim Anlaufen der Feuerlöschwasserpumpen eine akustische Klasse-2-Meldung. Anschließend erfolgen die Sumpfmeldungen „L hoch 1“ und „L hoch 2“ (KTG.CL00.) kurz hintereinander, wenn die Sümpfe des betroffenen Quadranten voll sind. Die Sümpfe der Quadranten haben eine Aufnahmekapazität von 10,2 m³ (Quadrant 1) und 6,0 m³ (Quadrant 3). Bei Erreichen eines Wasserstandes von 0,26 m im Ringraum an den Messstellen JNA...0CL8... (entsprechend einem ausgetretenen Wasservolumen von 480 m³ bei einer Flutfläche des Ringraumes von 1.847 m²) werden der Grenzwert der notstandssicheren Verriegelung erreicht und KMA-Meldungen gegeben.

Nach der richtigen Diagnose der Meldungen erfolgt das Absperrn der betroffenen Löschwasserleitung

- durch den Streckenschieber STS-11 (SGA09AA013) bei einer Leckage der Löschwasserleitung vor dem Gebäudeeintrittsschieber GES-1 (SGB15AA001) im 1. Quadranten;
- bei Ausfall des Streckenschiebers STS-11 müssen die beiden Streckenschieber STS-12 (SGA08AA017) und STS-13 (SGA09AA010) geschlossen werden;

- durch den Streckenschieber STS-21 (SGA08AA015) bei einer Leckage der Löschwasserleitung vor dem Gebäudeeintrittsschieber GES-2 (SGB57AA001) im 3. Quadranten:
- bei Ausfall des Streckenschiebers STS-21 müssen die beiden Streckenschieber STS-22 (SGA08AA020) und STS-23 (SGA08AA010) geschlossen werden, siehe /KKW 12/, Abschnitt 4.5.3.1.

Die Streckenschieber STS-11, STS-12 und STS-13 befinden sich südlich des Versorgungsanlagegebäudes und der Deionatbehälter und liegen direkt nebeneinander. Der Streckenschieber STS-21 liegt zwischen Notspeisegebäude und den Dieselkraftstoff-Vorratsbehältern. Die beiden zugehörigen Streckenschieber STS-22 und STS-23 liegen in etwa 10 bis 15 m Entfernung zum Streckenschieber STS-21 in entgegengesetzter Richtung. Die Entfernung der Streckenschieber STS-11 und STS-21 zur Warte im Schaltanlagegebäude beträgt etwa 200 m (STS-11) bzw. 400 m (STS-21).

Sollte eine Absperrung der Löschwasserleitung langfristig unterbleiben, ist mit dem Ausfall sicherheitsrelevanter SSC im Ringraum auf der untersten Ringraumebene auf - 6,00 m zu rechnen. Die möglichen Komponentenausfälle wurden bereits in /ROE 17/ dargelegt. Demnach beträgt die Flutfläche des Ringraumes 1.847 m². Diese Fläche wird ab einem Wasserstand von 0,20 m gleichmäßig über alle vier Redundanzen geflutet. Außerdem wurden in der Robustheitsanalyse der Referenzanlage /KKW 16/ die in Tab. 3.1 dargestellten notwendigen Überflutungshöhen und Wasservolumen für Ausfälle unterschiedlicher Systeme berechnet.

Tab. 3.1 Ausfälle von Komponenten in Abhängigkeit der Überflutungshöhe und dem kritischen Wasservolumen im Ringraum, nach /KKW 16/

Komponentenbezeichnung	Kurzbezeichnung laut KKS	Überflutungshöhe	Kritisches Wasservolumen bis zum Ausfall
Ringraumabsaugung	KLB	0,35 m	645 m ³
Sicherheitseinspeisepumpe	JND10/20/30/40AP001	0,40 m	738 m ³
Zusatzborierpumpe	JDH10/20/30/40AP001	0,64 m	1.175 m ³
Nachkühlpumpe	JNA10/20/30/40AP001	0,69 m	1.274 m³
Not- und Nachkühlpumpe / Beckenkühlpumpe	FAK10/20/40AP001	0,74 m	1.367 m ³

Komponentenbezeichnung	Kurzbezeichnung laut KKS	Überflutungshöhe	Kritisches Wasservolumen bis zum Ausfall
Zwischen- / Notzwischenkühlpumpe	KAA10/20/30/40AP001; KAA21/31AP001; KAA50/80AP001	0,74 m	1.367 m ³
Reaktorschutz Messumformer	siehe /ROE 17/, Tab. 4.2	> 0,74 m	> 1.367 m ³

Anmerkung: Die kursiv dargestellten Wasservolumen wurden mit einer Flutfläche von 1.847 m² und der Überflutungshöhe berechnet; der Zustand der Nachkühlpumpen (fett hervorgehoben) gilt als Kriterium für die endgültige Überflutung im Ringraum in den klassischen PSA-Modellen.

Für die Referenzanlage wurde die Ringraumüberflutung durch eine Leckage im Feuerlöschsystem SGB in dem klassischen PSA-Modell RiskSpectrum® /RIS 24//RIS 24/ über den Ereignisbaum S50 modelliert, siehe /KKW 12/, Abschnitt 4.3.3.3.4. Tab. 3.2 stellt die dort verwendeten Systemfunktionen dar und zeigt deren Übertragung auf die PSA-Modelle aus diesem Vorhaben (Ereignisbaum S50-R1530DYN).

Tab. 3.2 Systemfunktionen für das Szenario aus /ROE 17/

Systemfunktion	Beschreibung
Bruch SGB in UJB (S50)	Verwendung einer Eintrittswahrscheinlichkeit des einleitenden Ereignisses von 1 (S50-R1530DYN)
Erkennung der Überflutung (LE50)	über betriebliche Sumpfmeldung und Reaktorschutz-Ringraumüberwachung (siehe auch /KKW 12/, Abschnitt 4.5.3.1)
Richtige Diagnose bei S50 (OP_S50-DI)	im Kontrollraum durch SL und SLV
Absperren der Streckenschieber (AS501)	Absperrung über Streckenschieber STS-11 bzw. über STS-12/13 und STS-21 bzw. über STS-22/23

Anmerkung: Die Bezeichnungen im klassischen PSA-Modell von SAPHIRE weichen von den hier dargestellten Bezeichnungen ab.

Zur Bestimmung der Ausfallwahrscheinlichkeiten der Personalhandlungen in den Systemfunktionen zur Erkennung (LE50), Diagnose (OP_S50-DI) und Unterbindung des Wasserausflusses (AS501) wurden folgende Annahmen in /ROE 17/, Abschnitt 4.2.8, getroffen, die den Annahmen in /KKW 12/, Abschnitt 4.5.3.4 entsprechen:

- Die Erkennung der Überflutung (LE50) kann entweder über die betrieblichen Sumpfmeldungen oder über die KMA-Meldungen der Ringraumüberwachung des Reaktorschutzes erfolgen.

- Die Diagnose der Überflutung (OP_S50-DI) dauert etwa 60 min, die Karenzzeit beträgt etwa 2,5 h (500 m³/h Ausflussrate und Schädigung der Nachkühlpumpen bei einem kritischen ausgetretenen Wasservolumen von 1.274 m³), siehe /KKW 12/, Abschnitt 4.5.3.4. Daraus folgt mit THERP /SWA 83/ eine menschliche Fehlerwahrscheinlichkeit für die Diagnose von 1,7 E-03 (Streufaktor 30).
- Zur Absperrung der Streckenschieber muss ein Anlagenwärter verständigt und die Absperrung veranlasst werden. Der Anlagenwärter befindet sich in der Warte im Schaltanlagegebäude und wird zeitgleich mit dem Personal der Feuerwehr informiert. Ein Trupp der Feuerwehr begibt sich ebenfalls zum Streckenschieber. Bei einer Diagnose von 60 min verbleibt für die Durchführung der Personalhandlung eine Zeitspanne von mindestens 60 min. Mittels THERP /SWA 83/ wurde eine menschliche Fehlerwahrscheinlichkeit der Personalhandlung von 4,8 E-06 pro Anforderung (Streufaktor 2,8) bestimmt.

Bei der Bewertung der Handmaßnahme werden in /KKW 12/, Abschnitt 4.5.3.4.2. folgende Tabellen aus /SWA 83/ verwendet:

- Table 20-7, item 3: Unterlassungsfehler bei kurzer Liste ohne Checkliste;
- Table 20-13, item 2: Fehler bei der Auswahl eines Ventils (klar und eindeutig gekennzeichnet);
- Table 20-15, item 2: Verwendung nominaler Werte;
- Table 20-16a, item 4: Stressfaktor 2;
- Table 16-4, item 2a: geringe Abhängigkeit zwischen Anlagenwärter und Trupp der Feuerwehr.

Diese Bewertung der Handmaßnahme berücksichtigt somit keine zeitlichen Aspekte. Zeitliche Aspekte können indirekt über einen erhöhten Stressfaktor einbezogen werden. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Streckenschieber nicht schließt, beträgt 5,91 E-04 pro Anforderung. Nach dem Schließen des ersten Streckenschiebers halten die Anlagenwärter Rücksprache mit dem Wartpersonal. Das Wartpersonal erkennt einen Fehler beim Schließen des Streckenschiebers und gibt in diesem Fall Anweisungen zum Schließen der weiteren Streckenschieber. Bei allen beschriebenen Personalhandlungen ist von erhöhtem Stress auszugehen. Die verwendeten Modelle für die Bewertung der Handmaßnahmen sind in /KKW 12/, Tab. 4.5-4 mit Bezug zu THERP /SWA 83/ zusammengefasst.

Bei einem nicht-beherrschten Ereignisablauf (keine Unterbindung des Wasserausflusses) wird von einem Ausfall der Sicherheitssysteme in Tab. 3.1 in Abhängigkeit vom ausgetretenen Wasservolumen ausgegangen (Zustand 'IF'). Da in diesem Fall der Wasseraustritt nicht mehr durch geplante Maßnahmen unterbunden werden kann, wird die Referenzanlage administrativ abgefahren. Der dafür vorgesehene Ereignisablauf ist im Ereignisbaum S50A /KKW 12/, Abschnitt 4.3.3.3.5. modelliert. Die zugehörigen Systemfunktionen sind

- OP_AB_S50: Handmaßnahme zum Abfahren nach S50,
- LB_S50: Frischdampf-Abgabe zum Abfahren nach S50,
- LA: Dampferzeugerbespeisung mit LAH oder LAR bei Transienten,
- SDE: Notfallmaßnahme Sekundärseitiges Druckentlasten und Bespeisen.

Diese Systemfunktionen werden nicht durch die Ringraumüberflutung eingeschränkt, da sich alle benötigten Komponenten außerhalb des Ringraumes befinden. Die primärseitige Druckentlastung ist nicht möglich, da dafür der Ringraum betreten werden muss. Nach einem Abfahren der Referenzanlage mit funktionierender Frischdampfumleitung wird ein sicherer Endzustand erreicht, sofern entweder die Dampferzeugerbespeisung oder die sekundärseitige Druckentlastung und Bespeisung erfolgreich sind. Alle anderen Sequenzen führen zum Kernschaden (SZ).

Die für das PSA-Modell der Referenzanlage in RiskSpectrum® /KKW 12/ getroffenen Annahmen für die Modellierung des Szenarios wurden für die aktuellen Analysen übernommen, sofern es nicht anders beschrieben ist. Zudem wurden zwei wesentliche Anpassungen vorgenommen.

- Die jeweiligen Zeitpunkte der Ausfälle von Komponenten im Ringraum werden berücksichtigt. Dabei werden eine variierende Ausflussrate sowie unterschiedliche benötigte Zeitspannen bis zur Unterbindung des Wasserausflusses einbezogen.
- Für Personalhandlungen außerhalb von Gebäuden können zudem erschwerende Randbedingungen angenommen werden. Diese erschwerenden Randbedingungen sind im nachfolgenden Abschnitt beschrieben.

Durch diese Anpassungen wird die Dynamik innerhalb des Szenarios hervorgehoben. Diese Dynamik stellt einen besonderen Schwerpunkt im hier durchgeführten Methodenvergleich dar.

3.3 Beschreibung der erschwerenden Randbedingungen

Erschwerende Randbedingungen bei Personalhandlungen außerhalb von Gebäuden können durch zusätzliche Einwirkungen von außen wie Wind, Regen, Hitze, Glatteis etc., verursacht werden, die noch unterhalb der Schwelle zum auslösenden Ereignis liegen. Beispielsweise sind Personalhandlungen außerhalb von Gebäuden ab Windstärken von 10 (> 24,5 m/s, 88 km/h) entsprechend einer Beaufort Skala deutlich erschwert, die Bewegung im Freien ist aber schon ab einer Windstärke von Beaufort 8 (> 17 m/s, 61 km/h) eingeschränkt. Durch solche erschwerenden Randbedingungen kann u. a. die Gehgeschwindigkeit verlangsamt oder der Stress erhöht werden.

Die Tabellen Tab. 3.3 und Tab. 3.4 geben eine Auswahl besonderer Wettersituationen mit Stürmen, Stark- oder Dauerniederschlägen über Deutschland im Zeitraum von 2017 bis 2020 wieder, die zu Einschränkungen geführt haben /DWD 24/. Die Wettersituationen hängen dabei oft mit mehreren Unwetterereignissen zusammen. Die Übersicht wurde vom Deutschen Wetterdienst erstellt und umfasst nicht alle Ereignisse, die zu Einschränkungen geführt haben.

Tab. 3.3 Auswahl an besonderen Wettersituationen mit Stürmen (Beaufortskala 9 oder größer) über Deutschland im Zeitraum 2017 bis 2020 /DWD 24/

Datum	Anmerkung
09./10.02.2020	Sturmtief Sabine
04.-17.03.2019	mehrere Sturmtiefs, z. B. Bennet und Eberhard
23.09.2018	Sturmtief Fabienne
18.01.2018	Orkantief Friederike
28./29.10.2017	Sturmtief Herwart
05.10.2017	Sturmtief Xavier

Tab. 3.4 Auswahl an besonderen Wettersituationen zusammen mit Stark- und Dauerniederschlägen über Deutschland im Zeitraum 2017-2024 /DWD 24/

Datum	Anmerkung
16.-19.05.2024	Stark- und Dauerniederschläge in Rheinland-Pfalz, Saarland, Tiefdruckgebiet Katinka
19.12.2023-5.01.2024	großräumige Hochwasserlagen im Bereich der Ems, Weser, Elbe

Datum	Anmerkung
22./23.06.2023	Starkregenereignisse mit Orkanböen in Nordrhein-Westfalen, Hessen, Niedersachsen und Sachsen-Anhalt, Tiefdruckgebiet Lambert
12.-19.07.2021	sehr ausgeprägte Starkregenereignisse in Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz
19.-22.05.2019	extrem ergiebige Dauerniederschläge am Nordrand der Alpen und der Mittelgebirge, Tiefdruckgebiet Axel
01.-31.01.2019	Stark- und Dauerschneefälle am Nordrand der Alpen und der Mittelgebirge
01.-31.07.2017	Starkregen und Sturzfluten in Moers (14.07.), Köln (19.07.), Berlin (22.07.); Dauerregen in Südniedersachsen, im Harzumfeld, Nordthüringen zwischen 24.07. und 26.07.

Weiterhin wurde im Jahr 2023 seitens der GRS die Eintrittshäufigkeit von Ereignissen mit Windstärken (Böen auf einer Höhe von 2 m über Boden) größer Beaufort 10 für einen Küstenort am Mittelmeer auf Basis von Winddaten bestimmt. Die Analyse ergab eine Ereignishäufigkeit von 0,2 pro Jahr, bei denen die Handlungen von Personen außerhalb von Gebäuden zeitweise stark eingeschränkt sind. Für einen anderen Standort in der Nähe der Nordsee wurde eine Eintrittshäufigkeit von zwei Ereignissen pro Jahr mit einer Windgeschwindigkeit (1 h-Mittelwert auf 10 m über Boden) von mindestens Beaufort 8 auf Basis von Winddaten berechnet.

Am Standort des Kernkraftwerks Fort Calhoun am Missouri in den USA kam es 2011 zu einer langanhaltenden Überflutung eines großen Gebiets durch regenbedingtes Hochwasser mit einer mehrere Wochen anhaltenden Überflutung des gesamten Anlagengeländes. Während dieses Überflutungsereignisses kam es zu einem von der Überflutung unabhängigen, anlageninternen Brandereignis (Ereigniskombination zweier unabhängig voneinander zufällig gleichzeitig auftretender übergreifender Einwirkungen) /NEA 16/.

4 Modellierung des Szenarios und des Handlungsablaufes

Das Szenario „Leckage des Feuerlöschsystems SGB im Ringraum“ wurde mit den klassischen PSA-Programmen RiskSpectrum® (Ereignisbaum S50-RS1530-DYN „Überflutung UJB durch Bruch SGB“ bei Leistungsbetrieb) und SAPHIRE sowie mit den von der GRS entwickelten Methoden der dynamischen PSA MCDET und dem Crew-Modul modelliert. Dieses Szenario umfasst unterschiedliche Personalhandlungen und deren Wechselwirkungen mit bestimmten Systemzuständen. Dabei wurden insbesondere die im IAEA Safety Guide SSG-3, Rev. 1 /IAE 24/ geforderten Aspekte „zeitlicher Ablauf des Überflutungsszenarios“ sowie „Gegenmaßnahmen durch Personalhandlungen“ berücksichtigt. Aus diesem Grund ist die Strukturierung des Szenarios in einzelnen Handlungsblöcken sinnvoll, siehe Abb. 4.1. In der Beschreibung der Handlungsblöcke wird ebenfalls auf die Modellierung in den klassischen PSA-Modellen von RiskSpectrum® und SAPHIRE mit den Ereignisbäumen und den dazugehörigen Systemfunktionen in den Abbildungen Abb. 4.2 und Abb. 4.3 eingegangen.

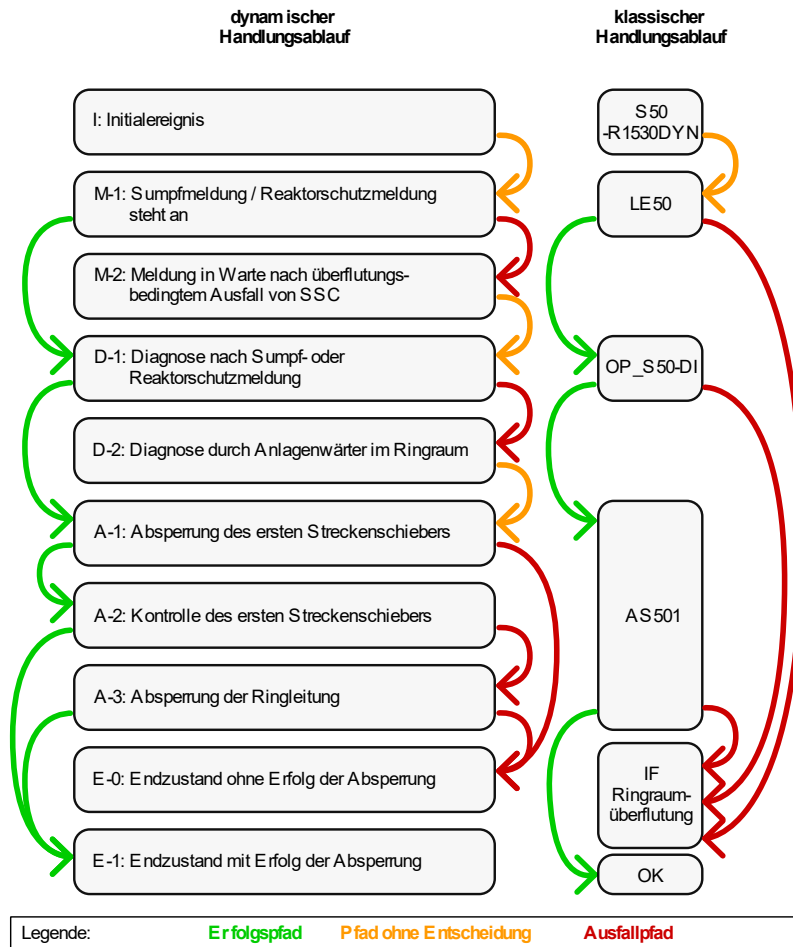


Abb. 4.1 Gegenüberstellung des dynamischen und des klassischen Handlungsablaufes zur Modellierung des Szenarios

Bruch SGB in UJB (Projekt 4721R1530)	Erkennung der Überflutung	Richtige Diagnose bei S50	Unterbindung Nachspeisung	No.	Freq.	Conseq.
S50-R1530DYN	LE50	OP_S50-DI	AS501	1		OK
				> 2		IF
				> 3		IF
				> 4		IF

Abb. 4.2 Ereignisbaum S50-R1530DYN des Szenarios bis zur Ringraumüberflutung IF im klassischen PSA-Modell von RiskSpectrum®

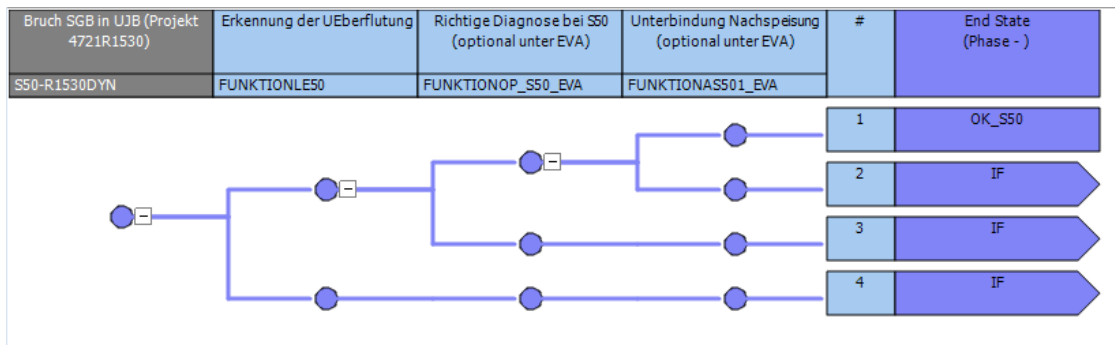


Abb. 4.3 Ereignisbaum S50-R1530DYN des Szenarios im klassischen PSA-Modell von SAPHIRE

4.1 Beschreibung der Handlungsblöcke und Ereignisbäume

4.1.1 I: Initialereignis

Bei dem das Szenario einleitende Ereignis (auch als Initialereignis I bezeichnet) handelt es sich um den Bruch einer Löschwasserleitung Feuerlöschsystems SGB im Ringraum während des Leistungsbetriebs. Die Eintrittshäufigkeit wird als 1 festgelegt, da diese nicht im Fokus des hier durchgeführten Methodenvergleiches steht. Der Bruch kann in den Redundanzen 1 und 3 des Ringraums erfolgen. Die Wahrscheinlichkeit ist dabei für beide Redundanzen gleich. Durch den Druckabfall in der Feuerlöschwasserleitung werden automatisch die Feuerlöschwasserpumpen bzw. die Wasserrückhaltungspumpen aktiviert, was zu einer Ausflussrate dV aus der Leckage zwischen 135 kg/s und 145 kg/s (entsprechend etwa 500 m³/h) führt. Die Aktivierung der Feuerlöschwasserpumpen führt zu einer Meldung in der Warte, ohne automatisch weitere Maßnahmen auszulösen. Da von der Meldung der Feuerlöschwasserpumpen nicht direkt auf eine Leckage im Ringraum geschlossen wird, erfolgt der → **Übergang zu M-1**.

Zum Zeitpunkt der Meldung der Feuerlöschwasserpumpen befinden sich ein Schichtleiter (SL), dessen erster Stellvertreter (SLV-1) sowie drei Anlagenwärter (ALW) in der Warte im Schaltanlagegebäude. Weiterhin befinden sich zwei Personen der Feuerwehr (FW) durch Zufall in einer Entfernung von 100 bis 500 m vom für die Leckage relevanten Streckenschieber (vgl. Abb. 3.1). Alle Personen können ihre aktuellen Aufgaben spontan unterbrechen.

Dieser Handlungsblock dauert nur wenige Sekunden. Er entspricht dem auslösenden Ereignis 'S50-R1530DYN' in den klassischen PSA-Modellen.

4.1.2 M-1: Sumpfmeldung / Reaktorschutzmeldung steht an

Die Sümpfe des betroffenen Quadranten werden vollständig mit Wasser gefüllt. Währenddessen werden die Füllstände für die Sumpfmeldungen „L1 hoch“ und „L2 hoch“ erreicht. Mit der angenommenen Ausflussrate kommen die Sumpfmeldungen innerhalb von 70 bis 75 s (Quadrant 1) bzw. 40 bis 45 s (Quadrant 3). Anschließend verteilt sich das Wasser zunächst in dem betroffenen Quadranten und nach dem Übertreten der 0,20 cm hohen Schwellen im gesamten Ringraum. Bei einem Wasserstand im Ringraum von 0,26 m wird der Grenzwert für die notstandssichere Verriegelung überschritten. Bei der angenommenen Ausflussrate wird die damit zusammenhängende KMA-Meldung nach ca. 55 bis 60 min gegeben. Dabei bestehen zwei Möglichkeiten:

- Mindestens eine Meldung (Sumpfmeldung bzw. die KMA-Meldung) wird in der Warte angezeigt → **Übergang zu D-1** oder
- beide Meldungen fallen aus. Das Personal in der Warte wird nicht über die Überflutung des Ringraumes informiert (Ausfallwahrscheinlichkeit einer Meldung: 1 E-04) → **Übergang zu M-2.**

Der Handlungsblock kann weniger als 1 min (Sumpfmeldung wird angezeigt) bzw. bis zu 60 min (KMA-Meldung in der Warte) dauern. In den klassischen PSA-Modellen ist dieser Handlungsblock mit der Systemfunktion 'LE50' und den Basisereignissen „Betriebliche Sumpfmeldung ausgefallen“ (KTG..CL00.-SCHN) und „Reaktorschutz-Ringraumüberwachung ausgefallen“ (JNA.0CL8..-SCHN) modelliert, siehe Abb. 4.4. Der Ausfall der Meldungen führt direkt zu Systemausfällen im Ringraum und damit zum Endzustand (Sequenz 4 in Abb. 4.2).

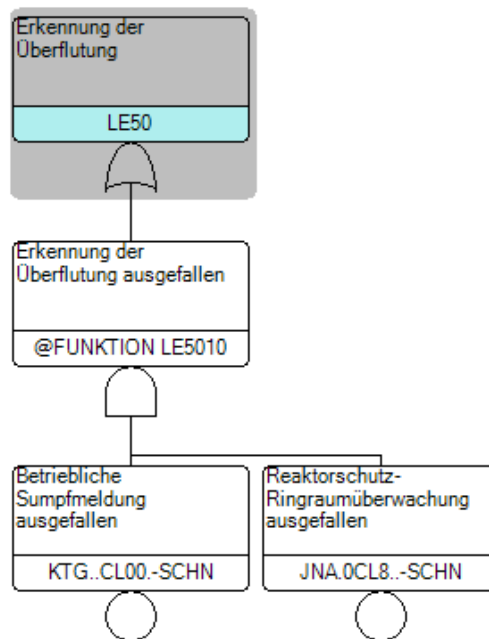


Abb. 4.4 Fehlerbaum bzgl. der Systemfunktion 'LE50' im Programm RiskSpectrum®

4.1.3 D-1: Diagnose nach Sumpf- oder Reaktorschutzmeldung

SL und SLV-1 quittieren die anstehenden Meldungen. Daraufhin kontrolliert der SLV-1 die Anzeigen in der Warte und bespricht die Ergebnisse mit dem SL. Die benötigte Dauer für die Diagnose wird mit 50 bis 70 min angenommen. Bei der Diagnose des Ereignisses können sich zwei Alternativen ergeben:

- Richtige Diagnose der Überflutung des Ringraumes durch Bruch der Löschwasserleitung, dabei ist der betroffene Quadrant ebenfalls bekannt → Übergang zu A-1 oder
- keine bzw. eine falsche Diagnose: SL / SLV-1 diagnostizieren keine bzw. eine andere Störfallursache. Die dadurch erfolgenden Maßnahmen unterbinden nicht die Wasserfreisetzung in den Ringraum (Handlungsfehler mit der Wahrscheinlichkeit $1,7 \text{ E-}03$, Error Factor $EF = 30$ bei einer benötigten Dauer von etwa 60 min, erhöhter Stress durch Leistungsbetrieb), siehe /KKW 12/, Abschnitt 4.5.3.4.1 → **Übergang zu D-2.**

Unter erschwerenden Randbedingungen (siehe Abschnitt 3.3) wird von folgenden Annahmen ausgegangen:

- SL und SLV-1 sind sich der längeren benötigten Dauern für Personalhandlungen außerhalb von Gebäuden bewusst.

- SL und SLV-1 nehmen sich daher für die Diagnose und die Planung der Maßnahmen nur 30 min Zeit, um für weitere Personalhandlungen ausreichend Zeit zur Verfügung zu haben.
- Die Stressniveaus von SL und SLV-1 während der Diagnose bleiben unverändert.

Damit ergibt sich bei erschwerenden Randbedingungen ein Handlungsfehler mit einer Wahrscheinlichkeit von $5,3 \cdot 10^{-3}$, $EF = 10$, siehe /SWA 83/, Table 20-16a, item 4 und Table 20-3, item 4.

Dieser Handlungsblock dauert bis zu etwa 80 min einschließlich der 60-minütigen Diagnose. Er ist in den klassischen PSA-Modellen mit der Systemfunktion 'OP_S50-DI' mit dem Basisereignis 'OP_S50-DI' modelliert, siehe Abb. 4.5. Die Möglichkeit der nachträglichen Diagnose durch den ALW im Ringraum (Handlungsblock D-2) ist nicht in den klassischen PSA-Modellen integriert. Keine bzw. eine falsche Diagnose führt dort direkt zum Ausfall der Systeme im Ringraum (Sequenz 3 im Ereignisbaum S50-R1530DYN, siehe Abb. 4.2). Im dynamischen PSA-Modell wird der zeitliche Verlauf des Szenarios hingegen berücksichtigt. Deshalb ist die Modellierung plausibel, dass nach der Erkennung von Flüssigkeit im Ringraum ohne eine korrekte Diagnose der Ursache zwei Personen direkt in den Ringraum zur Erkundung geschickt werden. Durch die Zeitverzögerung bis zur Diagnose kann es im dynamischen PSA-Modell dennoch zu Systemausfällen kommen, wenn der Wasseraustritt aus der Leckage in den Ringraum zu spät gestoppt wird. In den klassischen PSA-Modellen müsste dieser Pfad zu einer sicheren Diagnose führen.

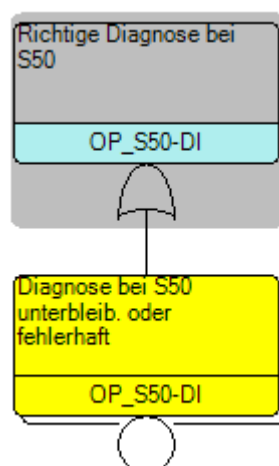


Abb. 4.5 Fehlerbaum hinter der Systemfunktion 'OP_S50-DI' im PSA-Programm RiskSpectrum®

Die Wahrscheinlichkeit für einen Handlungsfehler unter erschwerenden Randbedingungen wird in den klassischen PSA-Modellen mit dem Basisereignis 'OP_S50-DI_EVA' (erschwerende Randbedingungen durch Einwirkung von außen) über ein Exchange Event implementiert. Das Exchange Event kann über das House Event 'S50-EVA' aktiviert werden.

4.1.4 D-2: Diagnose durch Anlagenwärter im Reaktorgebäude-Ringraum

Zwei Anlagenwärter (ALW) befinden sich ohne aktuellen Auftrag in der Warte, darunter eine Person mit Aufgaben im Strahlenschutz. Sie werden vom SLV-1 in ihre Aufgabe eingewiesen und erkunden anschließend die Situation im Ringraum. Nach der vollständigen Erkundung des Ringraums meldet der ALW-Trupp eine Leckage der Löschwasserleitung an die Warte. Aufgrund der klaren Situation im Ringraum wird nicht von einem Fehler ausgegangen → **Übergang zu A-1**.

Der Handlungsblock kann bis zu über 30 min dauern. Diese Möglichkeit der Diagnose ist in den klassischen PSA-Modellen nicht berücksichtigt (siehe Handlungsblock D-1).

4.1.5 M-2: Meldung in der Warte nach überflutungsbedingtem Ausfall von SSC

Bisher wurde im Handlungsablauf die Störfallursache nicht diagnostiziert. Die Leckage im Ringraum wurde daher noch nicht gestoppt. Der steigende Wasserstand im Ringraum führt nach einer bestimmten Freisetzungsdauer zum ersten Ausfall einer sicherheitsrelevanten Komponente, siehe Tab. 3.1. Da alle Redundanzen im Ringraum betroffen sind, werden in kurzer Abfolge alle weiteren Redundanzen dieser Komponente ebenfalls ausfallen. Die Dauer bis zum ersten Ausfall beträgt in Abhängigkeit von der Ausflussrate etwa 75 bis 80 min. Die Dauer für die Meldung eines Systemausfalls in diesem Handlungsblock ist vernachlässigbar. Die Meldungen werden in der Warte angezeigt → **Übergang zu D-1**.

Diese Meldung ist in den klassischen PSA-Modellen nicht berücksichtigt, da der Systemausfall zum Endzustand (Ringraumüberflutung IF) führt. Aufgrund der zeitlichen Auflösung des Ereignisses können in der dynamischen PSA jedoch weitere Maßnahmen berücksichtigt werden.

4.1.6 A-1: Absperrung des ersten Streckenschiebers

SL und SLV-1 wissen durch ihre Ausbildung und aus den regelmäßigen Schulungen, dass der Wasseraustritt aus der Löschwasserleitung im Ringraum nur durch das Absperrern des jeweiligen Streckenschiebers (STS-11 bei Leckage im Quadrant 1, STS-21 bei Leckage im Quadrant 3) zu unterbrechen ist. Es werden ein weiterer ALW in der Warte sowie zwei Personen der Feuerwehr FW beauftragt, den Streckenschieber vor Ort zu schließen. Die Anlagenwärter ALW und die beiden Personen der Feuerwehr FW begeben sich zum Streckenschieber. Die restlichen Mitglieder der Feuerwehr begeben sich zum Bereitschaftsplatz vor dem Reaktorgebäude. Unter der Annahme einer Gehgeschwindigkeit von 1,2 m/s betragen die benötigten Dauern zum Erreichen der Streckenschieber für den ALW 2,5 min (STS-11) bzw. 5,5 min (STS-21) sowie für die FW zwischen 1,2 min und 7 min. Die erste Person bzw. der erste Trupp (ALW, FW), welche/r den Streckenschieber erreicht, schließt ihn zum Zeitpunkt t_{AB} . Die weiteren Personen begeben sich ebenfalls zum Streckenschieber und können bei Handlungsfehlern der ersten Person eingreifen.

Unter erschwerenden Randbedingungen (siehe Abschnitt 3.3) wird von einer Gehgeschwindigkeit von 0,1 m/s bis 0,5 m/s ausgegangen. Die benötigte Dauer bis zum Erreichen der Streckenschieber kann dadurch zwischen 3 (Entfernung von 100 m, Gehgeschwindigkeit 0,5 m/s) und 66 min (Entfernung von 400 m, Gehgeschwindigkeit 0,1 m/s) betragen.

Beim Schließen des Streckenschiebers gibt es zwei Möglichkeiten:

- Das Schließen wird erfolgreich durchgeführt → **Übergang zu A-2** oder
- das Schließen wird nicht erfolgreich durchgeführt (Handlungsfehler mit der Wahrscheinlichkeit $4,8 \text{ E-}06$, $EF = 2,8$) → **Übergang zu E-0**.

Zudem wird unter erschwerenden Randbedingungen von einem hohen Stressfaktor ausgegangen (siehe /SWA 83/, Tab. 20-16a, item 6: Stressfaktor 5). Dadurch erhöht sich die Wahrscheinlichkeit des Handlungsfehlers um den Faktor 2,5. Die Fehlerwahrscheinlichkeit beträgt somit $2,4 \text{ E-}5$, $EF = 2,8$.

Dieser Handlungsblock dauert unter normalen Randbedingungen weniger als 12 min und unter erschwerenden Randbedingungen weniger als 70 min. Er ist in den klassi-

schen PSA-Modellen mit der Systemfunktion 'AS501' modelliert, siehe Abb. 4.6. Der Handlungsfehler wird im Basisereignis 'OP_S50_AR' berücksichtigt.

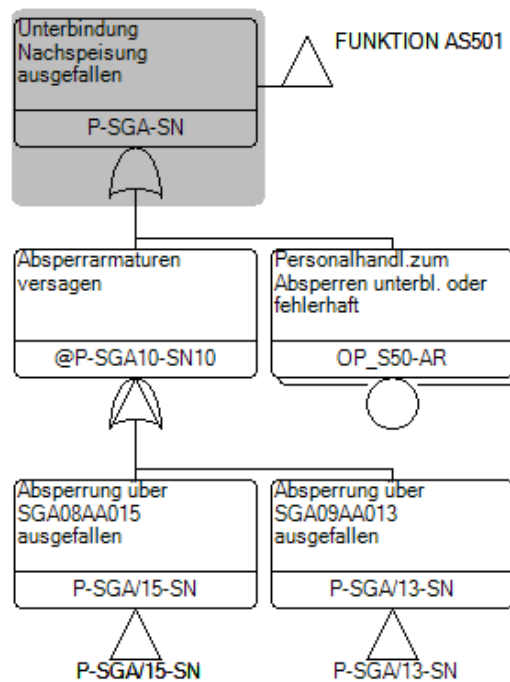


Abb. 4.6 Fehlerbaum bzgl. der Systemfunktion AS501 im Programm RiskSpectrum®

Die Wahrscheinlichkeit für einen Handlungsfehler unter erschwerenden Randbedingungen wird in den klassischen PSA-Modellen mit dem Basisereignis 'OP_S50-AR_EVA' (erschwerende Randbedingungen durch Einwirkung von außen) über ein Exchange Event implementiert. Das Exchange Event kann über das House Event 'S50-EVA' aktiviert werden.

4.1.7 A-2: Kontrolle des ersten Streckenschiebers

ALW bzw. FW halten telefonische Rücksprache mit dem SL in der Warte, ob der Durchfluss in die betroffene Löschwasserleitung unterbunden wurde. Hierfür gibt es zwei Möglichkeiten:

- Der erste Streckenschieber wurde erfolgreich geschlossen → **Übergang zu E-1** oder
- der erste Streckenschieber wurde nicht geschlossen (Ausfallwahrscheinlichkeit bei Anforderung des Streckenschiebers berechnet sich aus der Ausfallrate von 1,35 E-07 /h und einem Testintervall von einem Jahr, EF = 3,13) → **Übergang zu A-3**.

Dieser Handlungsblock dauert weniger als zwei Minuten. Er ist in den klassischen PSA-Modellen im Fehlerbaum P-SGA/13-SN (Quadrant 1) in Abb. 4.7 bzw. P-SGA/15-SN (Quadrant 3) der Systemfunktion 'AS501' modelliert. Das Basisereignis S05-GENERIC_Q1/3 wurde mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,5 zur Fallunterscheidung zwischen den Quadranten 1 bzw. 3 implementiert. Die Ausfallwahrscheinlichkeit des Streckenschiebers wird im Parameter 'A.15.8-4_SN' und den dazugehörigen Basisereignissen (Quadrant 1: SGA09AA013-SN; Quadrant 3: SGA08AA015-SN) berücksichtigt.

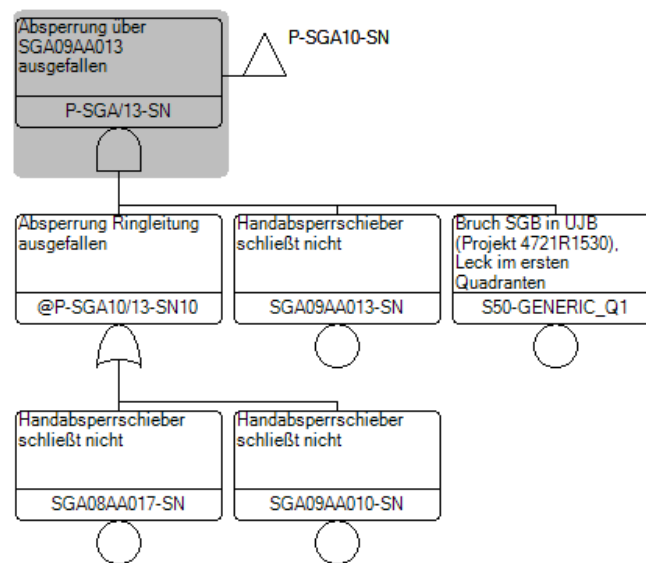


Abb. 4.7 Fehlerbaum zum Absperren des Streckenschiebers und der Ringleitung im Programm RiskSpectrum®

4.1.8 A-3: Abspernung der Ringleitung

Nachdem der Ausfall des ersten Streckenschiebers von der Warte bestätigt wurde, gehen ALW bzw. FW zum ersten Streckenschieber der Ringleitung (STS-12 bei Leckage im Quadrant 1; STS-22 bei Leckage im Quadrant 3). Sie schließen den Streckenschieber. Anschließend gehen sie zum zweiten Streckenschieber der Ringleitung (STS-13 bei Leckage im Quadrant 1; STS-23 bei Leckage im Quadrant 3). Sie schließen den Streckenschieber zum Zeitpunkt t_{AB} . Sobald beide Streckenschieber geschlossen sind, melden ALW bzw. FW per Telefon die Abspernung der Ringleitung an die Warte. Sie erkundigen sich, ob der Durchfluss in die betroffene Löschwasserleitung unterbunden wurde. Hierfür gibt es zwei Möglichkeiten:

- Die beiden Streckenschieber der Ringleitung wurden erfolgreich geschlossen → **Übergang zu E-1** oder
- einer der beiden Streckenschieber der Ringleitung wurde nicht geschlossen (Ausfallwahrscheinlichkeit der Absperrung der Ringleitung: $2p + p^2$ mit p als Ausfallwahrscheinlichkeit eines Streckenschiebers aus A-2 → **Übergang zu E-0**).

Dieser Handlungsblock dauert weniger als 7 min. Er wird in den klassischen PSA-Modellen in der Systemfunktion des Handlungsblocks A-2 modelliert (siehe Abb. 4.7). Die Ausfallwahrscheinlichkeit des Streckenschiebers wird im Parameter 'A.15.8-4_SN' und den dazugehörigen Basisereignissen berücksichtigt.

4.1.9 E-0: Endzustand ohne Erfolg der Absperrung

Die Leckage konnte nicht abgesperrt werden, sodass es zum Ausfall aller sicherheitsrelevanten Komponenten (siehe Tab. 3.1), insbesondere der Nachkühlpumpen, kommt.

In den klassischen PSA-Modellen wird dieser Handlungsblock mit dem Endzustand 'Ringraumüberflutung IF' modelliert. Er führt in den weiteren Ereignisablauf zum administrativen Abfahren im Ereignisbaum S50A.

4.1.10 E-1: Endzustand mit Erfolg der Absperrung

Die Leckage wurde erfolgreich abgesperrt. Ob sicherheitsrelevante Komponenten ausgefallen sind, hängt von den ausgetretenen Wasservolumina in den Ringraum ab. Die ausgetretenen Wasservolumina sind $V_W = t_{AB} \cdot dV$, wobei t_{AB} der Zeitpunkt zu Beginn der Absperrung der Löschwasserleitung ist. Anhand der ausgetretenen Wasservolumina kann mittels Tab. 3.1 bestimmt werden, welche SSC ausgefallen sind.

Dieser Handlungsblock wird in den klassischen PSA-Modellen mit dem Endzustand 'OK' modelliert. Sobald die Nachkühlpumpen als ausgefallen gelten (siehe Tab. 3.1), entspricht der Handlungsblock dem Zustand 'Ringraumüberflutung IF'. Diese Sequenzen führen in den nachfolgenden Ereignisbaum S50A.

4.2 Weiterer Ereignisablauf nach der Ringraumüberflutung IF in den klassischen PSA-Modellen

Wie bei der Definition des Szenarios in Abschnitt 3.2 dargelegt, wird bei einem nicht beherrschten Ereignisablauf der Ringraum überflutet (Zustand IF), siehe /KKW 12/, Abschnitt 4.3.3.3.5. Dabei ist von einem Ausfall der Nachkühlpumpen auszugehen. Deshalb wird die Referenzanlage von Hand über die Frischdampfumleitstation abgefahren. Die Bespeisung erfolgt dabei mit dem An- und Abfahrssystem. Bei dessen Ausfall kann das Notspeisesystem die Bespeisung übernehmen. Die dafür notwendigen Systemfunktionen des Ereignisbaumes S50A sind in Abb. 4.8 für RiskSpectrum® und in Abb. 4.9 für SAPHIRE dargestellt.

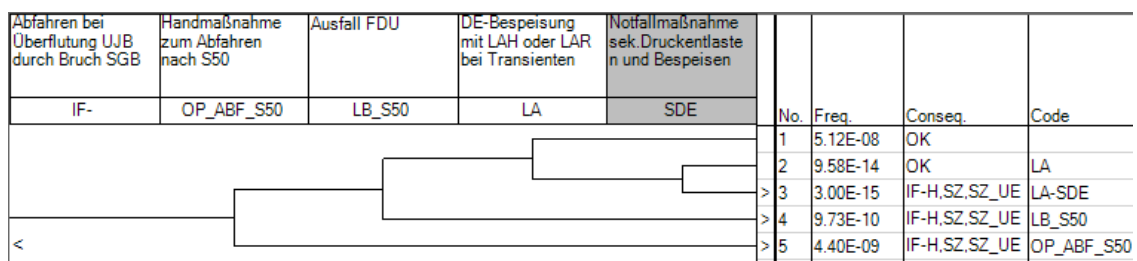


Abb. 4.8 Ereignisbaum S50A des Szenarios nach der Ringraumüberflutung IF im klassischen PSA-Modell von RiskSpectrum®

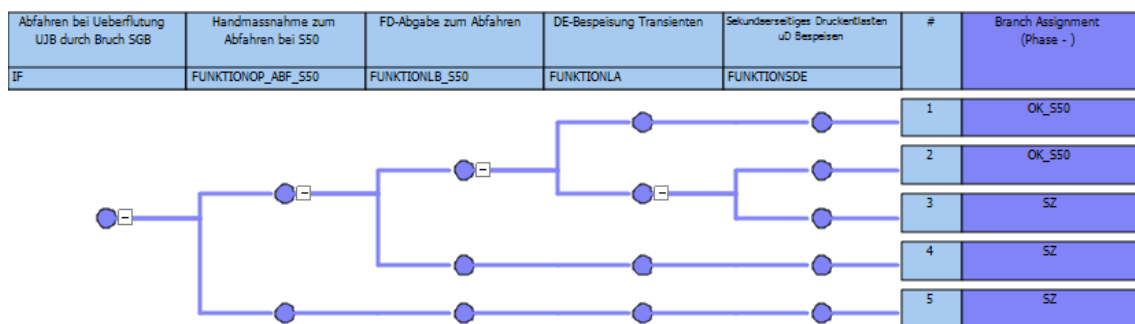


Abb. 4.9 Ereignisbaum S50A des Szenarios nach der Ringraumüberflutung IF im klassischen PSA-Modell von SAPHIRE

Die Systemfunktionen „Handmaßnahme zum Abfahren nach S50“ (OP_ABF_S50) und „Ausfall der Frischdampfumleitstation FDU“ (LB_S50) werden durch jeweils ein Basisereignis abgebildet, siehe Abb. 4.10 und Abb. 4.11. Die beiden nachfolgenden Systemfunktionen „Dampferzeuger (DE)-Bespeisung mit LAH und LAR bei Transienten“ (LA) und „Notfallmaßnahme sekundäres Druckentlasten und Bespeisen“ (SDE) umfassen eine Vielzahl an Verzweigungen und Basisereignissen.

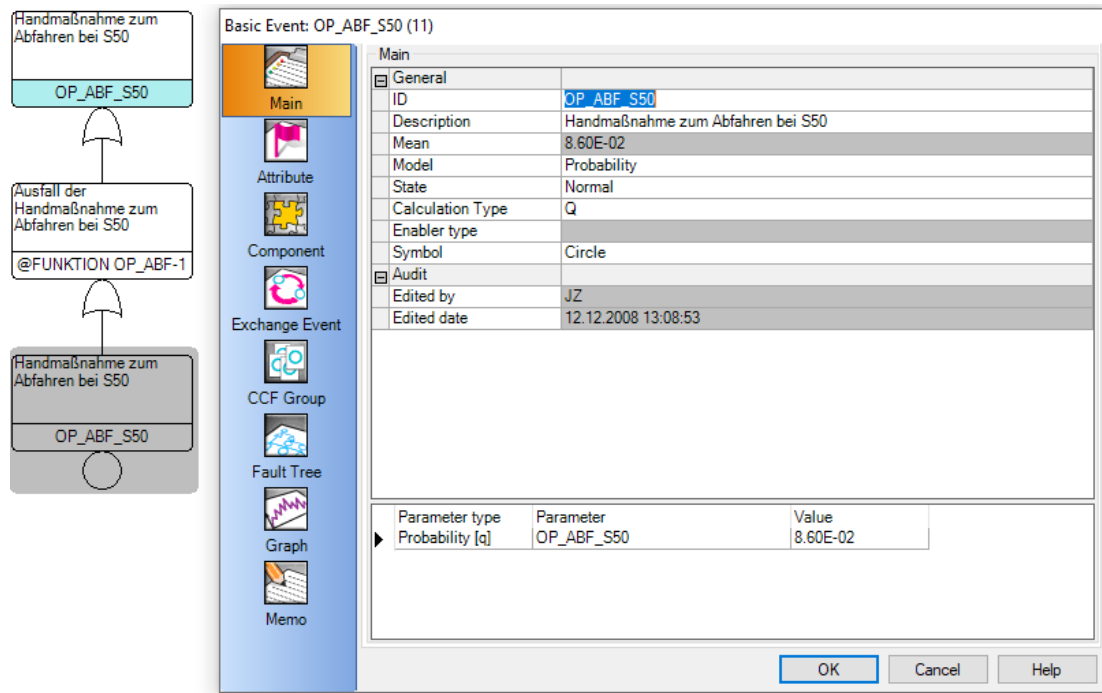


Abb. 4.10 Fehlerbaum und zugehöriges Basisereignis bzgl. der Systemfunktion 'OP_ABF_S50' im Programm RiskSpectrum®

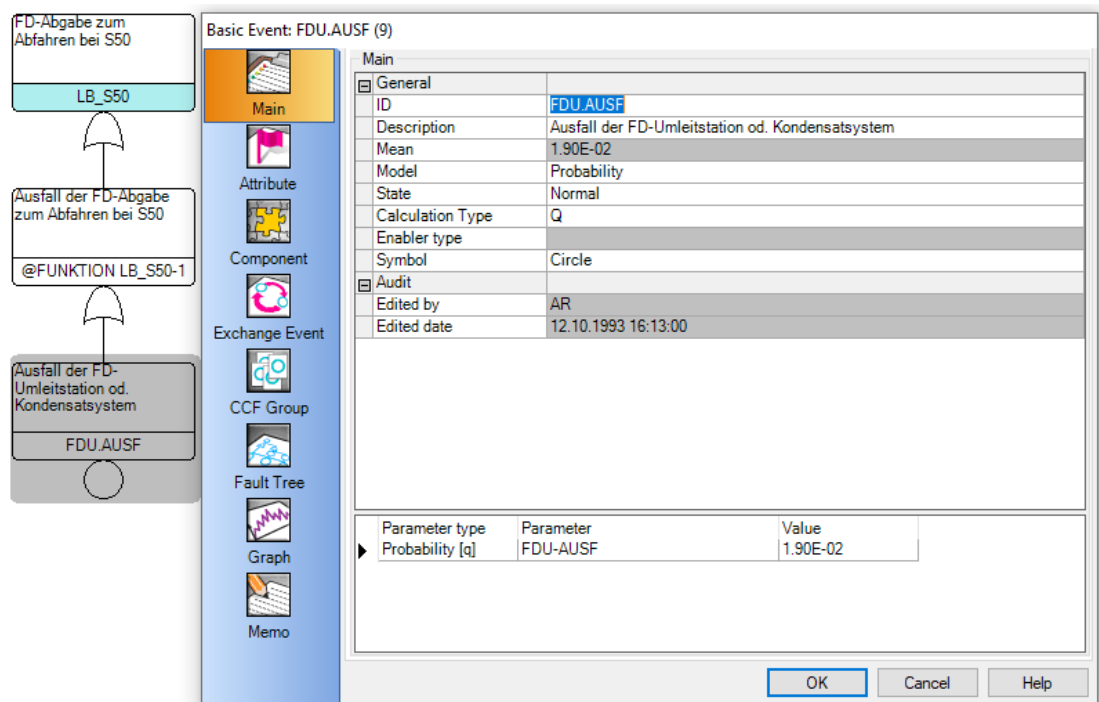


Abb. 4.11 Fehlerbaum und zugehöriges Basisereignis hinter der Systemfunktion 'LB_S50' im Programm RiskSpectrum®

In den Abbildungen Abb. 4.12 und Abb. 4.13 werden jeweils nur die ersten Teile der Fehlerbäume gezeigt, beide Fehlerbäume verweisen jedoch noch auf nachgeordnete Fehlerbäume.

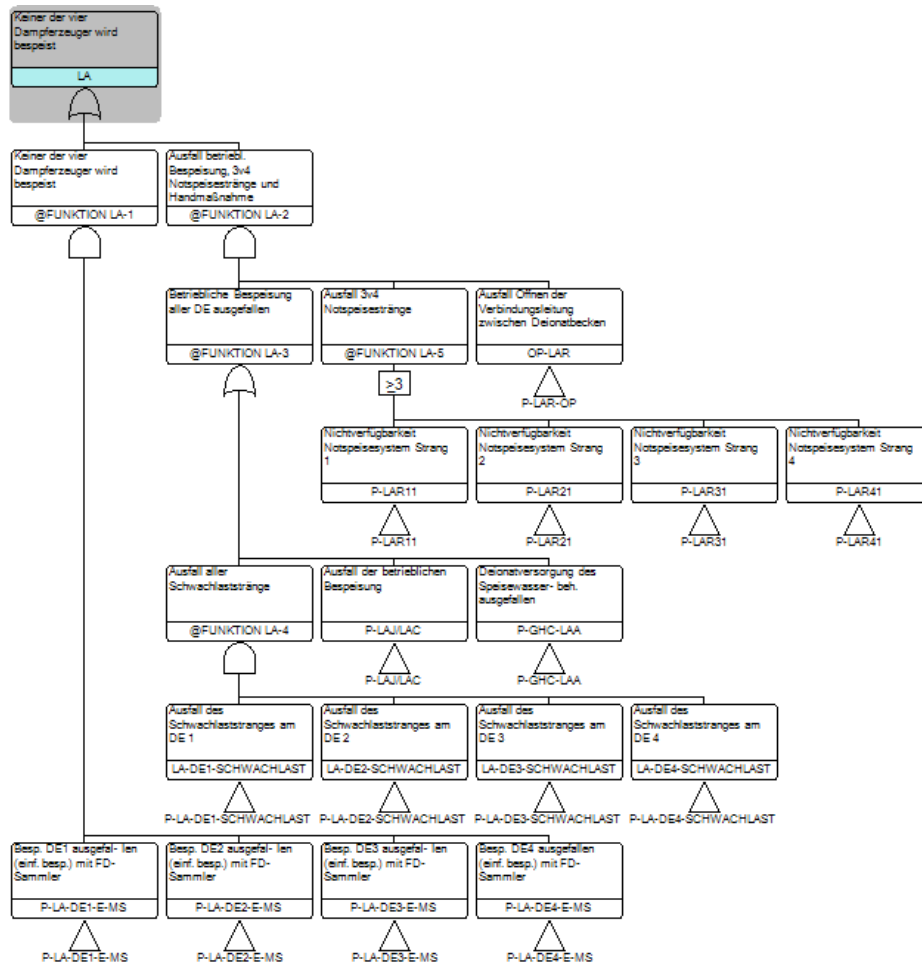


Abb. 4.12 Fehlerbaum bzgl. der Systemfunktion 'LA' im Programm RiskSpectrum®

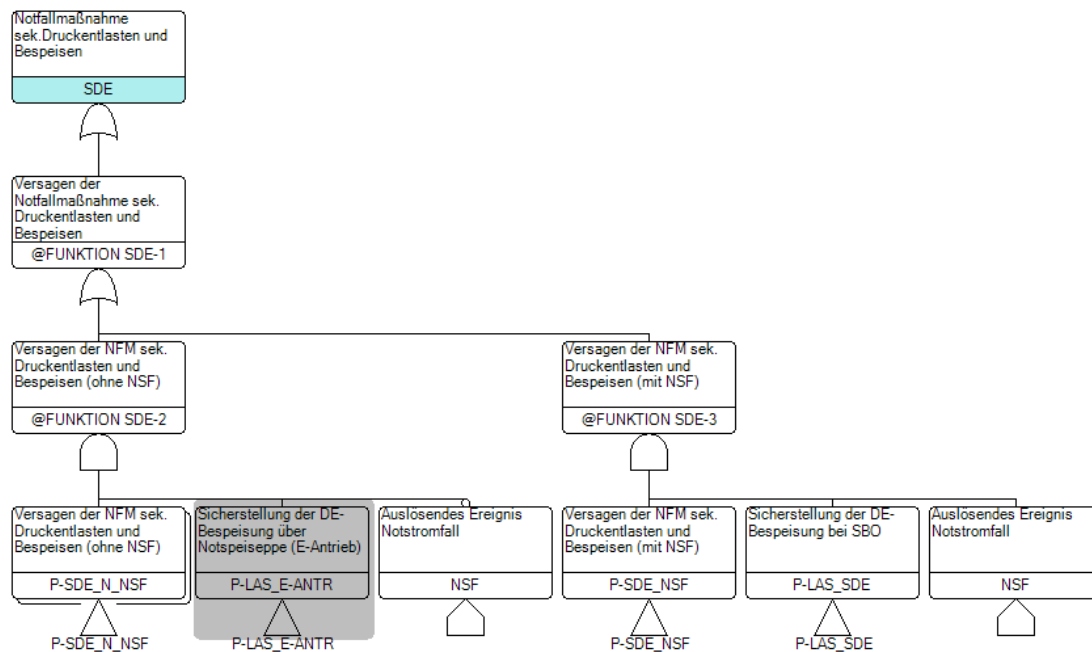


Abb. 4.13 Fehlerbaum hinter der Systemfunktion 'SDE' im Programm RiskSpectrum®

4.3 Übertragung des klassischen PSA-Modells aus RiskSpectrum® in SAPHIRE

Das ursprüngliche klassische PSA-Modell aus dem Vorhaben RS1539 /ROE 17/ bzw. von der Referenzanlage /KKW 12/ wurde mit dem kommerziellen, klassischen PSA-Programm RiskSpectrum® erstellt. Im Rahmen der hier vorgestellten Arbeiten wurden die Ereignisbäume S50-R1530DYN und S50A des PSA-Modells von RiskSpectrum® in das nicht-kommerzielle, aber ebenfalls klassische Programm SAPHIRE mithilfe des GRS-Analysewerkzeugs pyRiskRobot /BER 17/ übertragen. Hierfür wurde pyRiskRobot hinsichtlich der Übertragung eines PSA-Modells von RiskSpectrum® in SAPHIRE und umgekehrt erweitert. Die Erweiterungen des pyRiskRobot umfassten dabei insbesondere

- die Übertragung der probabilistischen Modelle von Parametern der Basisereignisse,
- die Erzeugung von Transfer-Verbindungen von Fehlerbäumen, insbesondere, wenn der Name des Fehlerbaumes nicht mit dem Namen des entsprechenden Gates übereinstimmt,
- die Erkennung und Übertragung von negierten Basisereignissen in den Fehlerbäumen,
- die Erkennung und Übertragung von House Events sowie

- die Behandlung von Sonderzeichen in Bezeichnungen von unterschiedlichen Objekten des PSA-Modells in SAPHIRE.

Durch pyRiskRobot konnten somit alle notwendigen Fehlerbäume für die Systemfunktionen der beiden Ereignisbäume S50-R1530DYN und S50A, die zugehörigen Basisereignisse und deren Parameter sowie House Events von RiskSpectrum® automatisiert in das PSA-Modell von SAPHIRE übertragen werden. Ein Beispiel hierfür ist der Fehlerbaum in Abb. 4.14 für die erste Systemfunktion LE50 im Ereignisbaum S50A. Das dadurch in SAPHIRE erstellte PSA-Modell umfasst über 2.700 Basisereignisse in über 800 Fehlerbäumen. Dieser Umfang zeigt die im Vergleich zu einer manuellen Übertragung deutlich effizientere Übertragung durch pyRiskRobot. Weiterhin ist die automatisierte Übertragung durch pyRiskRobot eindeutig und, abgesehen von vorprogrammierten systematischen Fehlern, weitgehend fehlerfrei, was gerade hinsichtlich möglicher Tipp- und Eingabefehler bei einer manuellen Übertragung Vorteile hat.

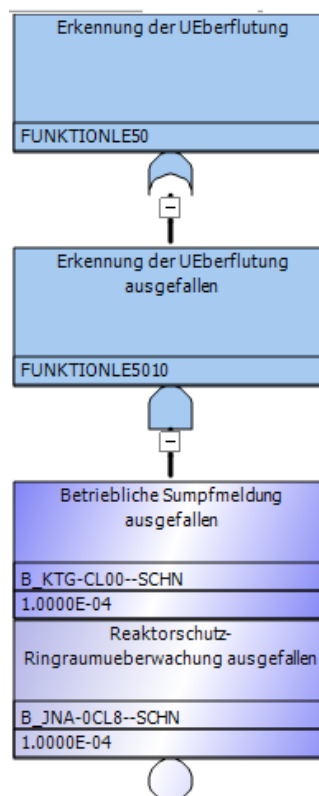


Abb. 4.14 Mittels pyRiskRobot automatisiert von RiskSpectrum® in SAPHIRE übertragener Fehlerbaum bzgl. der Systemfunktion 'LE50'

Nach der Übertragung wurde das PSA-Modell in SAPHIRE in wenigen Punkten manuell erweitert. Zum einen wurden die Ereignisbäume S50-R1530DYN und S50A mit deren

Systemfunktionen und Verzweigungen manuell in SAPHIRE nachgebildet. Eine entsprechende Erweiterung von pyRiskRobot zur Übertragung von Ereignisbäumen war innerhalb des Vorhabens nicht möglich, ist aber zukünftig vorgesehen. Zum anderen können bisher keine Exchange Events von RiskSpectrum® durch pyRiskRobot in SAPHIRE übertragen werden. Grund hierfür ist, dass es in SAPHIRE keine Möglichkeit gibt, Basisereignisse im PSA-Modell über Exchange Events auszutauschen. Deshalb wurden die erschwerenden Randbedingungen im oben dargestellten Szenario in SAPHIRE über Erweiterungen der entsprechenden Fehlerbäume eingebunden. Dazu wurden die Fehlerbäume OP_S50-DI (Systemfunktion „Richtige Diagnose bei S50“) und P-SGA-10 (Systemfunktion AS501 „Unterbindung Nachspeisung“) durch eine ODER-Verknüpfung für die Basisereignisse mit bzw. ohne erschwerende Randbedingungen und dem House Event 'S50_EVA' ergänzt (siehe Abb. 4.15 und Abb. 4.16, die entsprechenden Fehlerbäume von RiskSpectrum® mit den Exchange Events sind in Abb. 4.5 und Abb. 4.6 dargestellt). Dieses Vorgehen soll zukünftig mit pyRiskRobot automatisiert durchgeführt werden können.

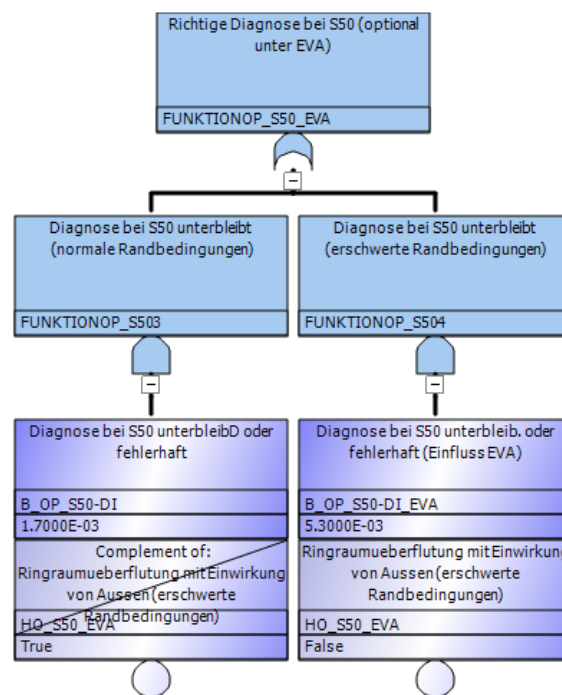


Abb. 4.15 Einbindung der erschwerenden Randbedingungen in den Fehlerbaum OP_S50 von SAPHIRE (in diesem Fall wird die Bezeichnung FUNKTIONOP_S50_EVA verwendet)

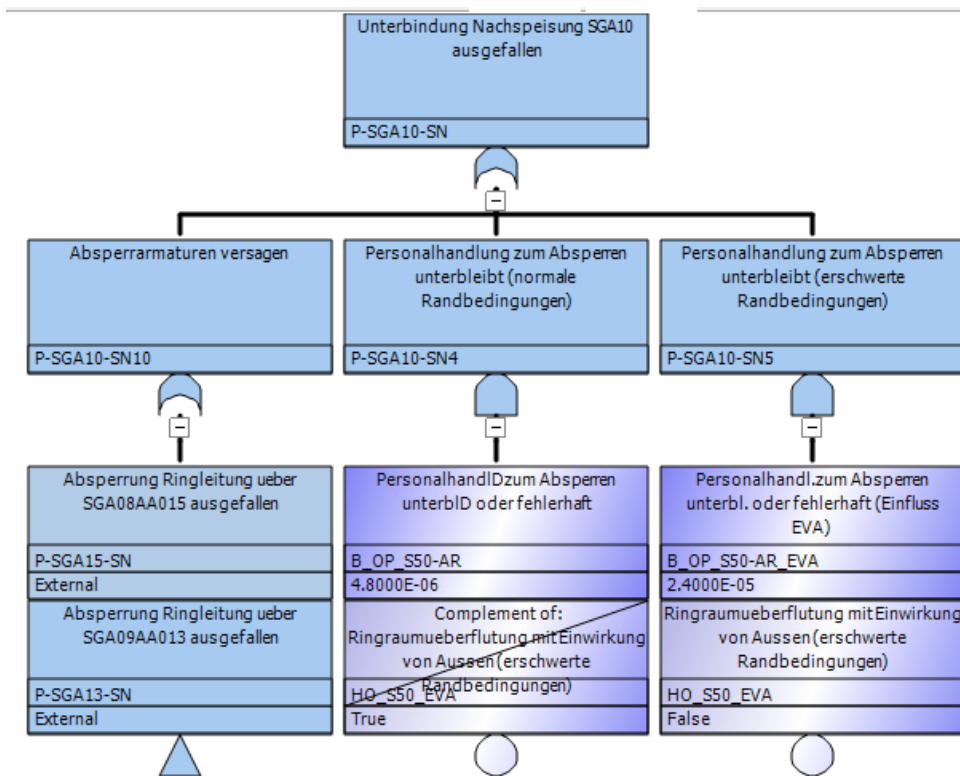


Abb. 4.16 Einbindung der erschwerenden Randbedingungen in den Fehlerbaum P-SGA-10 von SAPHIRE

Nach der automatisierten Übertragung des PSA-Modells von RiskSpectrum® in SAPHIRE mittels pyRiskRobot unterscheiden sich die PSA-Modelle in zwei übergeordneten Aspekten:

- Erstens sind zahlreiche Bezeichnungen von Objekten im PSA-Modell unterschiedlich. Grund hierfür ist, dass SAPHIRE deutlich weniger Sonderzeichen in den Bezeichnungen erlaubt (beispielsweise @, Leerzeichen, Klammern, ...). Zudem werden in RiskSpectrum® unterschiedliche Objekte, wie House Events, Basisereignisse und Parameter, definiert. Da diese Unterscheidung in SAPHIRE nicht möglich ist, werden die Namen der Objekte entsprechend angepasst (z. B. durch das Präfix „B“ für Basisereignisse und „HO“ für House Events).
- Zweitens ist es in PSA-Modellen üblich, für unterschiedliche Basisereignisse den gleichen Parameter zu verwenden. So haben beispielsweise gleichartige Pumpen unterschiedlicher Redundanzen die gleiche Ausfallwahrscheinlichkeit. In RiskSpectrum® können dafür mehrere Basisereignisse mit einem einzigen Parameter verknüpft werden. Wird der Parameter geändert (z. B. nach zusätzlicher Betriebserfahrung), überträgt sich die Änderung automatisch auf die zugehörigen Basisereignisse. In

SAPHIRE kann dafür in mehreren Basisereignissen auf die Eigenschaften eines einzigen Template Events zurückgegriffen werden. Ein Template Event in SAPHIRE ist technisch gleich zu einem Basisereignis, es hat nur die zusätzliche Eigenschaft eines Template Events. Für eine entsprechende Übertragung von Parametern aus Risk-Spectrum® in Template Events von SAPHIRE durch pyRiskRobot ist dementsprechend eine Identifikation von Template Events durch pyRiskRobot notwendig. Allerdings wurde bisher keine geeignete Möglichkeit gefunden, wie auf die Eigenschaft Template Events eines Basisereignisses über die SAPHIRE-Datenbankstruktur zugegriffen werden kann. Daher werden die Parameter der Basisereignisse im hier erstellen PSA-Modell von SAPHIRE bisher direkt in die Basisereignisse eingebunden. Dieser derzeit noch offene Punkt soll im Rahmen einer zukünftigen Erweiterung von pyRiskRobot gelöst werden.

4.4 Modellierung in der dynamischen PSA mit dem Crew-Modul

Der dynamische Handlungsablauf wurde in Abschnitt 4.1 anhand der einzelnen Handlungsblöcke dargestellt, wie er im dynamischen PSA-Modell mit der dynamischen PSA-Methode Crew-Modul berücksichtigt wurde. Die Modellierung wird nachfolgend beschrieben, wobei sich die detaillierte Auflistung aller Handlungsblöcke und der einzelnen Handlungsschritte im Anhang A findet. Die grundsätzliche Vorgehensweise bei der Modellierung im Crew-Modul ist in /PES 18/ beschrieben.

Das dynamische PSA-Modell des Szenarios ist in Abb. 4.17 mit der Mindmap als Eingabedatei für das Crew-Modul dargestellt. Die Blöcke in der Mindmap, nachfolgend als Handlungslisten bezeichnet, sind nicht mit den Handlungsblöcken aus der Beschreibung in Abschnitt 4.1 identisch, weshalb in Abb. 4.17 Erläuterungen dazu gegeben werden. Das Szenario beginnt links mit dem das Szenario einleitenden Initialereignis I und endet rechts mit den Endzuständen E-0 und E-1 (beide rot hervorgehoben). Jede Handlungsliste dazwischen umfasst unterschiedliche Handlungsschritte und Ereignisse, für die jeweils Zeit vergeht. Zudem können Zufallsvariablen für den weiteren Verlauf festgelegt werden. Der weitere Verlauf wird entweder über Verbindungen in der Mindmap dargestellt oder über Textverweise in den Handlungslisten, die auch in den Erläuterungen zu Abb. 4.17 skizziert sind. Bei der Simulation im Crew-Modul hat die graphische Darstellung im Mindmap jedoch keine Bedeutung, da hierfür nur die Textinformationen aus der Mindmap ausgelesen werden.

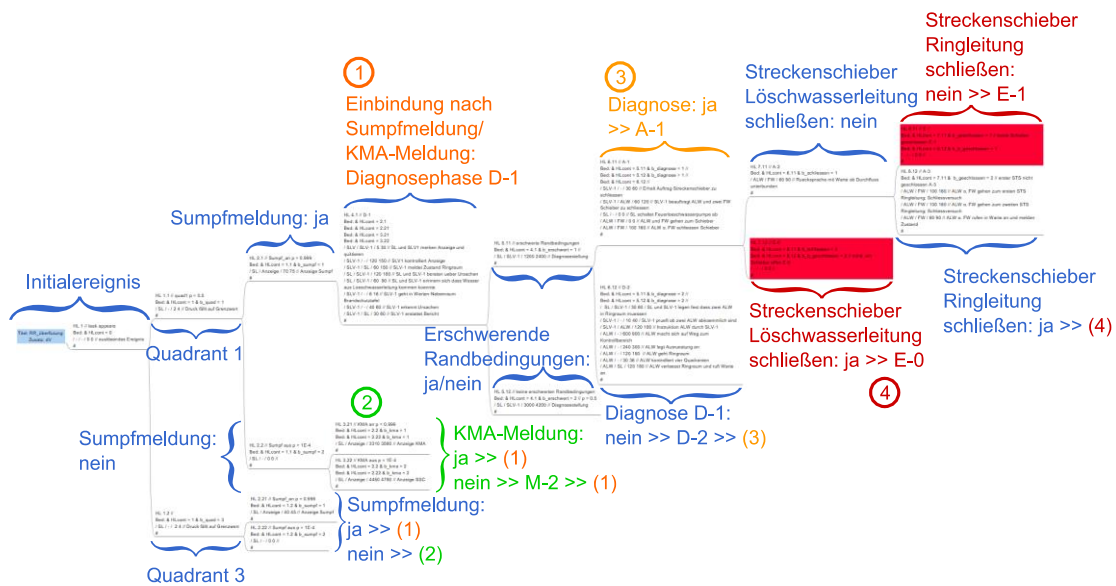


Abb. 4.17 Mindmap als Eingabedatei für das dynamische PSA-Modell im Crew-Modul; die Pfeile '>>' sind Querverweise zu den Nummern 1, 2, 3, 4 bzw. zu anderen Handlungsblöcken, die in der Mindmap selbst nicht dargestellt sind, die beiden roten Blöcke rechts oben sind die Endzustände E-0 und E-1

Die Zufallsvariablen in den Handlungsblöcken werden entweder als epistemische oder als aleatorische Unsicherheiten im dynamischen PSA-Modell berücksichtigt. Die epistemischen Unsicherheiten sind in Tab. 4.1 zusammengefasst.

Tab. 4.1 Epistemische Unsicherheiten im dynamischen PSA-Modell

Epistemische Unsicherheit	Verteilungstyp	Parameter
Ausfallwahrscheinlichkeit für Anzeige der Sumpf- bzw. KMA-Meldung	Lognormal	Mittelwert: 1,0 E-04 EF: 3
Wahrscheinlichkeit für eine falsche Diagnose (D-1) (normale Randbedingungen)	Lognormal	Mittelwert: 1.7 E-03 EF: 30
Wahrscheinlichkeit für eine falsche Diagnose (D-1) (erschwerende Randbedingungen)	Lognormal	Mittelwert: 5,3 E-03 EF: 10
Wahrscheinlichkeit für einen nicht richtig durchgeführten Schließvorgang	Lognormal	Mittelwert: 4.8 E-06 EF: 28
Ausfallhäufigkeit eines Streckenschiebers	Lognormal	Mittelwert: 1.35 E-07 /h EF: 3.13

Diese Unsicherheiten werden auch in den klassischen PSA-Modellen berücksichtigt. Die aleatorischen Unsicherheiten beziehen sich auf die Zeiten bzw. Dauern der einzelnen Handlungsschritte bzw. auf die Ausflussrate aus der Leckage. Dabei wird auch zwischen

normalen und erschwerenden Randbedingungen unterschieden. Die Verteilungen der entsprechenden Variablen sind in Anhang A beschrieben.

5 Vergleich der PSA-Modelle

Die klassischen und dynamischen PSA-Modelle wurden anhand des modellierten Szenarios einer Ringraumüberflutung bei Leistungsbetrieb miteinander verglichen. Dazu werden in Abschnitt 5.1 zunächst die Unterschiede zwischen den beiden klassischen PSA-Modellen qualitativ beschrieben. Diese Erkenntnisse sind insbesondere bei der Übertragung von PSA-Modellen zwischen den PSA-Programmen relevant. Anschließend werden die Ergebnisse der beiden klassischen PSA-Modelle quantitativ einander gegenübergestellt. Dabei bezieht die Auswertung insbesondere den vollständigen Ereignisablauf bis zum Kernschadenzustand ein. In Abschnitt 5.2 erfolgen der qualitative und quantitative Vergleich zwischen dem dynamischen PSA-Modell und den klassischen PSA-Modellen. Bei diesem Vergleich wird ausschließlich der Ereignisablauf bis zum Endzustand 'Ringraumüberflutung IF' berücksichtigt, da die nachfolgenden Sequenzen nicht im dynamischen PSA-Modell modelliert wurden.

Aufgrund der sehr geringen Eintrittshäufigkeit eines Bruchs der Feuerlöschwasserleitung im Reaktorgebäude-Ringraum wird, wie in Abschnitt 3.1 beschrieben, dessen Eintrittshäufigkeit bei der Auswertung nicht betrachtet, sondern als Vorbedingung vorausgesetzt. In den klassischen PSA-Modellen wird daher die bedingte Eintrittshäufigkeit der Endzustände (entweder Ringraumüberflutung oder Kernschadenzustand) nach dem Bruch einer Löschwasserleitung als Ergebnis angegeben. Die bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit des Endzustands 'Ringraumüberflutung IF' wird vor allem bei der Auswertung des dynamischen PSA-Modells auch als „bedingte Überflutungswahrscheinlichkeit“ bezeichnet.

5.1 Vergleich der klassischen PSA-Modelle

5.1.1 Qualitativer Vergleich der klassischen PSA-Programme

RiskSpectrum® und SAPHIRE wurden bereits im Abschnitt 2.2 eingeführt und werden in Tab. 5.1 genauer in Bezug auf ihre Einsatzmöglichkeiten verglichen. Die kommerzielle Software RiskSpectrum® /RIS 24/ verfügt über integrierbare Module, welche die Analysen in bestimmten Anwendungsfällen (z. B. Multi-Unit für Mehrblock-Anlagen, FRI3D für Brand-PSA) unterstützen können. Zudem können sich wiederholende Modellierungsschritte mit PSA Macro automatisiert ausgeführt werden. Die einzelnen Module sind allerdings kostenpflichtig. Dahingegen ist SAPHIRE deutlich leichter zugänglich und erfüllt

alle grundlegenden Anforderungen an die Durchführung einer PSA, wie die Modellierung von Ereignis- bzw. Fehlerbäumen, Ausfällen aus gemeinsamer Ursache (GVA) etc. Allerdings bietet SAPHIRE keine Erweiterungen für spezielle Anwendungsfälle in der PSA. Zudem erscheint in SAPHIRE der Zugriff auf die Datenbankstruktur auch längerfristig möglich zu bleiben, während dieser in RiskSpectrum® ggf. eingeschränkt werden könnte.

Tab. 5.1 Gegenüberstellung von RiskSpectrum® und SAPHIRE in Bezug auf ihre Einsatzmöglichkeiten

Programm	RiskSpectrum®	SAPHIRE
Bezugsmöglichkeiten	Kommerziell vertriebenes Programm mit kostenpflichtiger Lizenzvergabe für die Nutzung des Programms und der weiteren Module	Freier Download über eine kostenpflichtige Nutzergruppe; das Programm ist anschließend ohne weitere kostenpflichtige Lizenzen von weiteren Personen nutzbar
Integrierbare Module (Auswahl)	<p>PSA-Modul mit</p> <ul style="list-style-type: none"> – Cutset tracing: Anzeigen von Minimalschnitten in den Ereignis- und Fehlerbäumen – ModelCompare: Vergleich von Modellen – HazardLite: Unterstützung bei der Modellierung übergreifender Einwirkungen <p>PSA Macro: Modellierung über Skripte PSA Multi-Unit: zur Unterstützung bei der Modellierung von Mehrblock-PSA PSA ModelBuilder: zur Erstellung von PSA-Modellen über Flussdiagramme FRI3D: zur Durchführung einer Brand-PSA mit Verknüpfung zu komplexen Brandmodellen (keine dynamische Verbindung zwischen Brandmodell und PSA-Modell)</p>	<p>Integrierte Module:</p> <ul style="list-style-type: none"> – CCF-Modul: für die Modellierung von GVA – Load-Capacity Calculation: z. B. bei übergreifenden Einwirkungen – HRA calculator: für die Modellierung menschlicher Fehlerwahrscheinlichkeiten
Zugriff auf das Modell	Ein Zugriff auf die Datenbankstruktur des PSA-Modells ist möglich. Perspektivisch könnte dieser Zugang jedoch gesperrt werden. Dann wäre ein Zugang über das Modul PSA Macro möglich.	Ein Zugriff auf die Datenbankstruktur des PSA-Modells ist möglich.
Zugriff auf die Ergebnisse	Die Ergebnisse können <ul style="list-style-type: none"> – im PSA-Modell bzw. über manuell erstellte .xls-Dateien, – über die Datenbank des PSA-Modells (siehe Zugriff auf das Modell) oder – über Textausgaben (.txt) bei den Analysen gelesen und weiterverarbeitet werden.	Die Ergebnisse lassen sich <ul style="list-style-type: none"> – im PSA-Modell bzw. über manuell erstellte Dateien (unterschiedliche Formate, darunter .csv) oder – über die Datenbank des PSA-Modells (siehe Zugriff auf das Modell) lesen und weiterverarbeiten.

RiskSpectrum® und SAPHIRE haben ebenfalls unterschiedliche Ansätze bei der Auswertung von PSA-Modellen. Dafür bietet RiskSpectrum® die sogenannten „Analysis Cases“: ‘FT Analysis Case’, ‘Sequence Analysis Case’ und ‘Consequence Analysis Case’ sowie weitere Möglichkeiten zur Kombination mehrerer Analysen. Für unterschiedliche Analysen können unterschiedliche Randbedingungen über Boundary Condition Sets gesetzt werden, die sich auf House Events auswirken. SAPHIRE bietet die Möglichkeit, Minimalschnitte von Fehlerbäumen und Ereignisbäumen schnell über eine „solve“-Funktion zu berechnen. Die Randbedingungen dieser Analysen können über Change Sets oder Flag Sets angepasst werden. Zudem können in SAPHIRE „Workspaces“ definiert werden, in denen das PSA-Modell, getrennt vom ursprünglichen Modell, für eine Analyse angepasst werden kann, z. B. der Wert eines House Events. Mit den Workspaces können Analysen reproduzierbar dokumentiert werden.

Die Programmauswahl für die Erstellung eines PSA-Modells kann, abgeleitet aus diesem Vergleich, abhängig sein

- von der Komplexität bzw. dem Umfang der zu erstellenden PSA (hier kann RiskSpectrum® durch seine Module einen Vorteil bei aufwändigen PSA-Modellen haben),
- von der geplanten Verbreitung des PSA-Modells (bei der geplanten Veröffentlichung bzw. Weitergabe eines PSA-Modells kann SAPHIRE durch die leichte Zugänglichkeit von Vorteil sein),
- vom Zugriff auf die Daten bzw. die Datenbankstruktur, was z. B. bei der Verwendung des GRS-Analysewerkzeugs pyRiskRobot von Bedeutung ist (aktuell haben beide Programme die gleichen Möglichkeiten) sowie
- von der Erfahrung der Nutzer, eigenen Bearbeitungsroutinen und der Verfügbarkeit vorhandener PSA-Modelle.

5.1.2 Unterschiede der klassischen PSA-Programme bei der Übertragung von PSA-Modellen

Wie in Abschnitt 4.3 beschrieben, wurde das PSA-Modell für das zu untersuchende anlageninterne Überflutungsszenario von RiskSpectrum® in SAPHIRE übertragen und dabei die automatisierte Übertragung mittels des GRS-Analysewerkzeugs pyRiskRobot für übergreifende Einwirkungen verwendet. Bei der Entwicklung der Übertragungsfunktionen in pyRiskRobot mussten bestimmte Unterschiede in den PSA-Programmen berücksichtigt werden. Diese Unterschiede sind im Folgenden dargestellt.

Exchange Events finden in RiskSpectrum® eine breite Verwendung bei der Anpassung von Basic Events oder Gates in Fehlerbäumen im Rahmen unterschiedlicher Analysen eines PSA-Modells. Sie können vollständig durch Erweiterungen in den Fehlerbäumen von SAPHIRE abgebildet werden, siehe Abb. 4.15. Dafür bietet SAPHIRE zudem die Möglichkeiten sogenannter „Model Types“ bzw. „Flag Sets“. Im Rahmen des Vorhabens 4721R01530 wurden „Model Types“ jedoch nicht angewendet, da der jeweilige Model Type zusätzlich in allen Basisereignissen ergänzt werden muss und die entsprechenden Änderungen nicht nur lokal an den betreffenden Stellen der Fehlerbäume vorgenommen werden können. Bei der Einbindung der erschwerenden Randbedingungen im Beispiel der Ringraumüberflutung ist eine lokale Fehlerbaumerweiterung des PSA-Modells daher vorzuziehen. Im Rahmen der Arbeiten zur automatisierten Übertragung der Exchange Events werden die weiteren Möglichkeiten aber berücksichtigt.

Ein weiterer wesentlicher Unterschied ist die vielfältigere Unterscheidung von Objekttypen in RiskSpectrum® im Vergleich zu SAPHIRE. Beispielsweise werden in RiskSpectrum® Objekttypen für Initiating Events, House Events und Parameter bereitgestellt. In SAPHIRE können diese drei Objekttypen, wie in Tab. 5.2 dargestellt, mit Basic Events modelliert werden. In pyRiskRobot sind diese Ansätze bisher noch nicht vollständig implementiert (für Initiating Events), entsprechende Erweiterungen sind geplant.

Tab. 5.2 Unterschiedliche Modellierung von Objekten in RiskSpectrum® und SAPHIRE

Objekt in RiskSpectrum®	Modellierung in SAPHIRE	Ansatz in pyRiskRobot
Initiating Event	Basic Event, welches in ein Fehlerbaum-Gate eingebunden wird	noch nicht umgesetzt, da die Übertragung von Ereignisbäumen noch nicht implementiert wurde
House Event	Basic Event mit dem „Event Display Type“ 'House'	Anpassung des Namens des Basic Events mit dem Präfix „HO_“ ohne Anpassung des „Event Display Types“
Parameter	Basic Event mit dem Attribut 'Template Event'	noch nicht umgesetzt

RiskSpectrum® und SAPHIRE unterscheiden sich auch in den verfügbaren Typen von Wahrscheinlichkeitsverteilungen, Tab. 5.3 gibt dazu eine Übersicht. Die in PSA-Modellen gebräuchlichsten Verteilungstypen sind identisch modelliert. Allerdings bietet SAPHIRE eine größere Auswahl. Sollten die zusätzlichen Typen von einem in SAPHIRE

erstellten PSA-Modell in RiskSpectrum® übertragen werden, müssten sie zunächst umgerechnet werden. Hierfür stellt pyRiskRobot jedoch aktuell noch keine Methoden bereit.

Tab. 5.3 Vergleich der Typen von Wahrscheinlichkeitsverteilungen in den klassischen PSA-Programmen

Verteilungstyp	RiskSpectrum®	SAPHIRE	Kommentar
Lognormalverteilung	x	x	identisch
Beta-Verteilung	x	x	identisch
Gamma-Verteilung	x	x	identisch
Normalverteilung	x	x	identisch
Gleichverteilung	x	x	identisch
Lognormale Gleichverteilung	x		
Diskret / Histogramm	x	x	unterschiedliche Modellierung
Lineare Interpolation	x	x	RiskSpectrum®: beliebige Anzahl von Punkten SAPHIRE: Dreiecksverteilung
Chi-Quadrat-Verteilung		x	
Beschränkte, nicht-informative Verteilung		x	
Dirichlet-Verteilung		x	
Exponentialverteilung		x	
Maximale Entropie		x	

Ein weiterer Unterschied zwischen RiskSpectrum® und SAPHIRE besteht in der Verwendung von Sonderzeichen. Da SAPHIRE weniger Sonderzeichen akzeptiert, müssen Objekte aus RiskSpectrum® gegebenenfalls umbenannt werden. Die Umbenennung ist in pyRiskRobot automatisiert und folgt den in Tab. 5.4 dargestellten Übertragungsregeln.

Tab. 5.4 Übertragungsregeln von pyRiskRobot für Sonderzeichen in Namen von RiskSpectrum® nach SAPHIRE

Akzeptierte Sonderzeichen in RiskSpectrum®	Gewählte Ersatzzeichen für Namen in SAPHIRE
Ä/ä	Ae/ae
Ü/ü	Ue/ue
Ö/ö	Oe/oe
ß	Ss
<	L
>	G
=	E
,	K
.	D
/	S

Zusammenfassend sind die meisten Unterschiede zwischen RiskSpectrum® und SAPHIRE in pyRiskRobot berücksichtigt. Allerdings können folgende Punkte derzeit noch nicht übertragen werden:

- Exchange Events (wird demnächst umgesetzt und erlaubt dann die vollständige Übertragung von Fehlerbäumen),
- Initiating Events (wird demnächst umgesetzt, parallel dazu wird ein Konzept zur Übertragung von Ereignisbäumen erstellt, was bisher noch nicht möglich ist),
- Übertragung von bestimmten Typen von Wahrscheinlichkeitsverteilungen (die relevanten Typen sind in RiskSpectrum® und SAPHIRE identisch, eine diesbezügliche Erweiterung von pyRiskRobot ist bisher noch nicht geplant).

5.1.3 Quantitativer Vergleich der Ergebnisse der klassischen PSA-Programme

Im aktuellen IAEA Safety Guide SSG-3, Rev. 1 /IAE 24/ (§ 5.164) sind folgende, für das hier betrachtete Szenario einer anlageninternen Überflutung relevante Aspekte für die Auswertung eines PSA-Modells dargelegt:

- Kernschadenshäufigkeit (Punktwert und Unsicherheiten),
- Minimalschnitte und deren Häufigkeiten,

- Ergebnisse der Unsicherheitsanalysen sowie
- Ergebnisse der Importanzanalyse.

Diese Aspekte werden nachfolgend in den Vergleich der beiden PSA-Modelle einbezogen.

Für den Vergleich wurden mit den beiden klassischen PSA-Programmen jeweils vier Untersuchungen (jeweils Minimalschnittanalysen, Unsicherheitsanalysen mit Monte-Carlo-Simulationen) durchgeführt, um die Kombinationen aus den Endzuständen (Ringraumüberflutung IF, Kernschadenzustand SZ) und den zugehörigen Randbedingungen (normal, erschwerend) abzudecken. Für den Endzustand Ringraumüberflutung werden die Ereignisbäume in Abb. 4.2 bzw. Abb. 4.3 verwendet, für den Kernschadenzustand SZ werden zusätzlich die Ereignisbäume in Abb. 4.8 bzw. Abb. 4.9 berücksichtigt. Die Randbedingungen werden zwischen „normal“ und „erschwerend“ variiert, wobei die Hintergründe der erschwerenden Randbedingungen in Abschnitt 3.3 dargelegt sind. Die vier Untersuchungen werden gemäß Tab. 5.5 bezeichnet.

Tab. 5.5 Bezeichnung der Untersuchungen in den klassischen PSA-Modellen

Endzustand	Randbedingung	
	normal	erschwerend
Ringraumüberflutung	Überflutung (n)	Überflutung (e)
Kernschadenzustand	Kernschaden (n)	Kernschaden (e)

Für den Vergleich der beiden PSA-Modelle werden in den PSA-Programmen folgende Parameter festgelegt:

- Der Fokus der Untersuchungen liegt auf der bedingten Eintrittswahrscheinlichkeit des Endzustands (entweder Ringraumüberflutung oder Kernschadenzustand) infolge des angenommenen Szenarios eines Bruchs der Feuerlöschwasserleitung. Dafür wird die Eintrittshäufigkeit des Initialereignisses (siehe Abschnitt 4.1.1) mit 1 angenommen.
- Die Abschneidekriterien für Minimalschnitte sind 1 E-14 (RiskSpectrum®) und 1 E-12 (SAPHIRE) und haben für die hier beschriebene Auswertung keine Auswirkungen.
- Die Minimalschnitte werden in beiden PSA-Programmen nicht nachbearbeitet.

- Für die Unsicherheitsanalysen wurden in RiskSpectrum® und SAPHIRE 1 E+05 Durchläufe in den Monte-Carlo-Simulationen gemacht.

Tab. 5.6, Abb. 5.1 sowie Abb. 5.2 zeigen die bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit der Endzustände in den beiden klassischen PSA-Modellen. Der Punktwert ist das Ergebnis der Minimalschnittanalyse. Die anderen Werte sind die charakteristischen Ergebnisse der Unsicherheitsanalyse. Beide Programme führen zu ähnlichen Ergebnissen, im Rahmen der statistischen Unsicherheit zu gleichen Ergebnissen. Die bedingte Kernschadenswahrscheinlichkeit nach einer Ringraumüberflutung (das Verhältnis zwischen bedingter Kernschadenswahrscheinlichkeit und Überflutungswahrscheinlichkeit) liegt etwa bei 0,11). Erschwerende Randbedingungen können die bedingte Überflutungswahrscheinlichkeit um einen Faktor 3,13 erhöhen. Die genauen Hintergründe dazu werden im Vergleich mit dem dynamischen PSA-Modell erläutert.

Tab. 5.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeiten der beiden Endzustände in den jeweiligen Untersuchungen mit den beiden klassischen PSA-Programmen RiskSpectrum® (RISP) und SAPHIRE (SAP)

Untersuchung	PSA-Modell	Punktwert	Mittel	Median	5 %-Quantil	95 %-Quantil
Überflutung (e)	RISP	5,32 E-03	5,33 E-03	2,04 E-03	2,27 E-04	1,99 E-02
	SAP	5,32 E-03	5,32 E-03	2,01 E-03	2,20 E-04	1,97 E-02
Überflutung (n)	RISP	1,70 E-03	1,67 E-03	2,04 E-04	1,23 E-05	6,01 E-03
	SAP	1,70 E-03	1,70 E-03	2,05 E-04	1,22 E-05	6,09 E-03
Kernschaden (e)	RISP	5,59 E-04	5,53 E-04	1,61 E-04	1,39 E-05	2,13 E-03
	SAP	5,59 E-04	5,48 E-04	1,60 E-04	1,38 E-05	2,10 E-03
Kernschaden (n)	RISP	1,79 E-04	1,79 E-04	1,65 E-05	7,99 E-07	5,92 E-04
	SAP	1,79 E-04	1,81 E-04	1,64 E-05	7,77 E-07	5,76 E-04

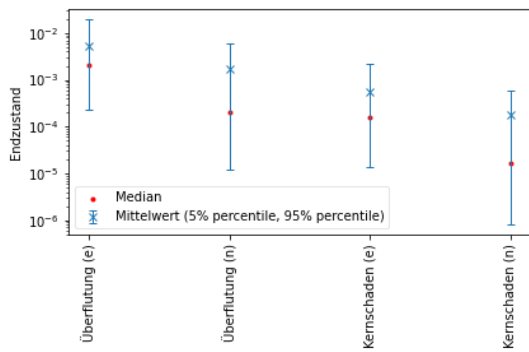


Abb. 5.1 Ergebnisse der Unsicherheitsanalysen in RiskSpectrum®

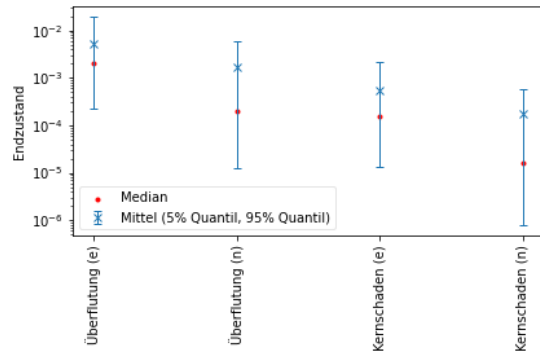


Abb. 5.2 Ergebnisse der Unsicherheitsanalysen in SAPHIRE

Die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der bedingten Wahrscheinlichkeiten der beiden Endzustände aus den Unsicherheitsanalysen werden in den Abbildungen Abb. 5.3 bis Abb. 5.6 gezeigt. Beide PSA-Modelle führen zu ähnlichen Wahrscheinlichkeitsverteilungen, was auch den vorherigen Ergebnissen entspricht. Die bedingte Kernschadenswahrscheinlichkeit unterliegt einer größeren Unsicherheit (breitere Streuung der Ergebnisse) als die bedingte Überflutungswahrscheinlichkeit, was an den zusätzlichen unsicheren Faktoren bis zum Kernschaden liegt.

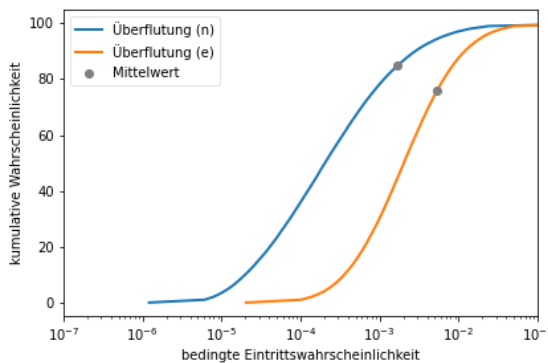


Abb. 5.3 Ringraumüberflutung in RiskSpectrum®

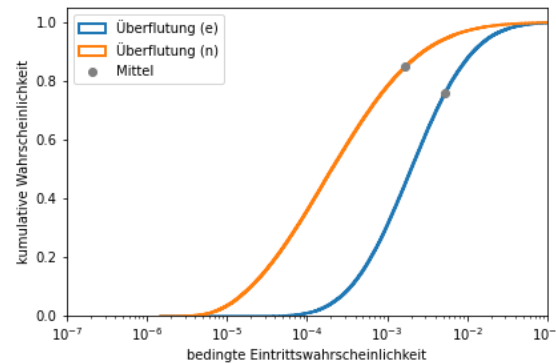


Abb. 5.4 Ringraumüberflutung in SAPHIRE

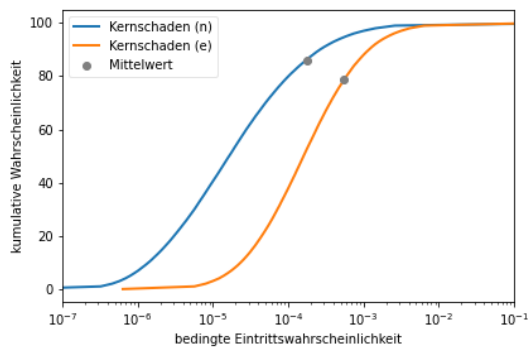


Abb. 5.5 Kernschadenszustand in RiskSpectrum®

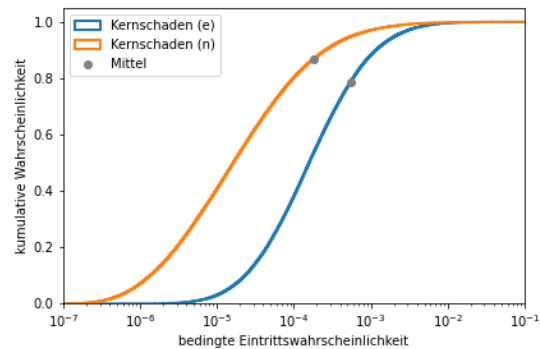


Abb. 5.6 Kernschadenszustand in SAPHIRE

Die Minimalschnitte aus den Minimalschnittanalysen aller Untersuchungen stimmen zwischen RiskSpectrum® und SAPHIRE weitgehend überein. Als Beispiele werden die Minimalschnitte für den Endzustand 'Ringraumüberflutung (normale Randbedingungen)' in den Tabellen Tab. 5.7 und Tab. 5.8 gezeigt. Die Namen der Basisereignisse enthalten folgende Bestandteile:

- 'S50': einleitende Ereignis aus dem Szenario ('S50-GENERIC_Q1/Q3' in RiskSpectrum® bzw. 'S50-R1530DYN_Q1/Q3' in SAPHIRE, wobei sich Q1 und Q3 auf die jeweiligen Quadranten im Ringraum beziehen),
- 'OP': ausgefallene Handmaßnahme (siehe Fehlerbäume in Abb. 4.5 und Abb. 4.6),
- 'DI': Diagnose des einleitenden Ereignisses,
- 'AR': Absperrern des Streckenschiebers oder der Ringleitung,
- 'SGA': Ausfall eines Streckenschiebers in den Löschwasserleitungen,
- 'JNA': Ausfall der Reaktorschutz-Ringraumüberwachung und
- 'KTG': Ausfall der betrieblichen Sumpfmeldung.

Insgesamt führen nur sieben Minimalschnitte zum Endzustand Ringraumüberflutung. Die Minimalschnitte sind zwischen RiskSpectrum® und SAPHIRE fast identisch, nur die Reihenfolge der ausgefallenen Streckenschieber ist für die beiden PSA-Programme unterschiedlich.

Die Minimalschnitte hängen mit folgenden drei Sequenzen aus dem Ereignisbaum S50 (siehe Abb. 4.2 und Abb. 4.3) zusammen:

- Minimalschnitt #1 / Sequenz 3: Ausfall der Diagnose nach Sumpf- oder Reaktorschutzmeldung (Systemfunktion OP_S50-DI, Handlungsblock D-1),
- Minimalschnitte #2 bis #6 / Sequenz 2: Ausfall der Unterbindung der Nachspeisung durch Absperren des Streckenschiebers oder der Ringleitung (Systemfunktion AS501, Handlungsblöcke A-1, A-2, A-3) und
- Minimalschnitt #7 / Sequenz 4: Ausfall der Erkennung der Überflutung (Systemfunktion LE50, Handlungsblock M-1).

Der Minimalschnitt #1 mit einer falschen bzw. nicht durchgeführten Diagnose hat fast den alleinigen Anteil an der Ringraumüberflutung. Dieser hohe Beitrag resultiert aus der vergleichsweise hohen Fehlerwahrscheinlichkeit, welche direkt aus /KKW 12/, Abschnitt 4.5.3.4.1 übernommen wurde.

Die Minimalschnitte der Untersuchungen mit erschwerenden Randbedingungen entsprechen qualitativ den Untersuchungen mit normalen Randbedingungen. Ein Beispiel für die Minimalschnitte zum Kernschadenzustand mit dem PSA-Programm RiskSpectrum® ist in Tab. 5.9 dargestellt, was auch den Ergebnissen aus SAPHIRE entspricht. In den Minimalschnitten sind zusätzliche Basisereignisse relevant:

- OP_ABF_S50: Ausfall der Handmaßnahme zum Abfahren nach einer Ringraumüberflutung,
- FDU.AUSF: Ausfall der Frischdampfumleitstation oder des Kondensatsystems,
- OP_SDE_DI: Ausfall der Handmaßnahmen zur Durchführung der Notfallmaßnahme SDE,
- X-GHC: Gemeinsam verursachter Ausfall von Magnetventilen in der Deionatversorgung.

Tab. 5.7 Alle Minimalschnitte zum Endzustand Ringraumüberflutung (normale Randbedingungen) aus RiskSpectrum®

#	Punktwert	Anteil in %	BE_00	BE_01	BE_02	BE_03	Sequenz
1	1,700 E-03	99,7	S50-GENERIC	OP_S50-DI			3
2	4,800 E-06	0,3	S50-GENERIC	OP_S50-AR			2
3	1,745 E-07	0,0	S50-GENERIC	S50-GENERIC_Q1	SGA08AA017-SN	SGA09AA013-SN	2
4	1,745 E-07	0,0	S50-GENERIC	S50-GENERIC_Q1	SGA09AA010-SN	SGA09AA013-SN	2
5	1,745 E-07	0,0	S50-GENERIC	S50-GENERIC_Q3	SGA08AA010-SN	SGA08AA015-SN	2
6	1,745 E-07	0,0	S50-GENERIC	S50-GENERIC_Q3	SGA08AA015-SN	SGA08AA020-SN	2
7	1,000 E-08	0,0	S50-GENERIC	JNA.0CL8..-SCHN	KTG..CL00.-SCHN		4

8 **Tab. 5.8** Alle Minimalschnitte zum Endzustand Ringraumüberflutung (normale Randbedingungen) aus SAPHIRE

#	Punktwert	Anteil in %	BE_00	BE_01	BE_02	BE_03	Sequenz
1	01,7 E-03	99,68	S50-R1530DYN	B_OP_S50-DI			3
2	4,80 E-06	0,28	S50-R1530DYN	B_OP_S50-AR			2
3	1,75 E-07	0,01	S50-R1530DYN	B_SGA08AA010-SN	B_SGA08AA015-SN	S50-R1530DYN_Q3	2
4	1,75 E-07	0,01	S50-R1530DYN	B_SGA08AA015-SN	B_SGA08AA020-SN	S50-R1530DYN_Q3	2
5	1,75 E-07	0,01	S50-R1530DYN	B_SGA09AA010-SN	B_SGA09AA013-SN	S50-R1530DYN_Q1	2
6	1,75 E-07	0,01	S50-R1530DYN	B_SGA08AA017-SN	B_SGA09AA013-SN	S50-R1530DYN_Q1	2
7	1,00 E-08	< 0,01	S50-R1530DYN	B_JNA-0CL8--SCHN	B_KTG-CL00--SCHN		4

Tab. 5.9 Die 15 obersten Minimalschnitte zum Kernschadenzustand unter erschwerenden Randbedingungen aus RiskSpectrum®

#	Punktwert	Anteil in %	BE_00	BE_01	BE_02	BE_03	BE_04
1	4,558 E-04	81,5	S50-GENERIC	OP_ABF_S50	OP_S50-DI_EVA		
2	1,007 E-04	18,0	S50-GENERIC	FDU.AUSF	OP_S50-DI_EVA		
3	2,064 E-06	0,4	S50-GENERIC	OP_ABF_S50	OP_S50-AR_EVA		
4	4,560 E-07	0,1	S50-GENERIC	FDU.AUSF	OP_S50-AR_EVA		
5	1,501 E-08	0,0	S50-GENERIC	OP_ABF_S50	S50-GENERIC_Q1	SGA09AA010-SN	SGA09AA013-SN
6	1,501 E-08	0,0	S50-GENERIC	OP_ABF_S50	S50-GENERIC_Q1	SGA08AA017-SN	SGA09AA013-SN
7	1,501 E-08	0,0	S50-GENERIC	OP_ABF_S50	S50-GENERIC_Q3	SGA08AA015-SN	SGA08AA020-SN
8	1,501 E-08	0,0	S50-GENERIC	OP_ABF_S50	S50-GENERIC_Q3	SGA08AA010-SN	SGA08AA015-SN
9	3,316 E-09	0,0	S50-GENERIC	FDU.AUSF	S50-GENERIC_Q1	SGA09AA010-SN	SGA09AA013-SN
10	3,316 E-09	0,0	S50-GENERIC	FDU.AUSF	S50-GENERIC_Q1	SGA08AA017-SN	SGA09AA013-SN
11	3,316 E-09	0,0	S50-GENERIC	FDU.AUSF	S50-GENERIC_Q3	SGA08AA010-SN	SGA08AA015-SN
12	3,316 E-09	0,0	S50-GENERIC	FDU.AUSF	S50-GENERIC_Q3	SGA08AA015-SN	SGA08AA020-SN
13	8,600 E-10	0,0	S50-GENERIC	JNA.0CL8..-SCHN	KTG..CL00.-SCHN	OP_ABF_S50	
14	1,900 E-10	0,0	S50-GENERIC	FDU.AUSF	JNA.0CL8..-SCHN	KTG..CL00.-SCHN	
15	2,027 E-11	0,0	S50-GENERIC	OP_S50-DI_EVA	OP_SDE_DI	X-GHC31AA07/8ÖN2V2	

Die oberen beiden Minimalschnitte in Tab. 5.8 hängen mit dem Ausfall der Diagnose der Ringraumüberflutung zusammen. Im ersten Minimalschnitt wird die Anlage nicht abgefahren. Im zweiten Fall fällt die Frischdampfumleitung aus. Die weiteren Minimalschnitte hängen mit dem Ausfall der Absperrung zusammen. Der letzte Minimalschnitt in Tab. 5.8 stellt den Ausfall der Sumpf- und KMA-Meldung dar.

Die Ergebnisse der Importanzanalyse des Kernschadenzustands werden in Abb. 5.7 für beide klassischen PSA-Modelle und die unterschiedlichen Randbedingungen gezeigt. Dem IAEA Safety Guide SSG-3, Rev. 1 /IAE 24/, § 5.171 entsprechend, wird auf folgende Importanzmaße eingegangen:

- Die Fussel-Vessely-Importance (FV) zeigt für das auszuwertende Basisereignis den Anteil der Minimalschnitte an der gesamten bedingten Endzustands-Wahrscheinlichkeit, in denen das Basisereignis enthalten ist.
- Der Risk Decrease Factor (RDF) entspricht dem Verhältnis der bedingten Endzustands-Wahrscheinlichkeit mit der Ausfallwahrscheinlichkeit 0 des auszuwertenden Basisereignisses zur bedingten Endzustandswahrscheinlichkeit mit der normalen Ausfallwahrscheinlichkeit des Basisereignisses. Der RDF gibt damit Informationen zum Anteil des Basisereignisses an der gesamten bedingten Endzustands-Wahrscheinlichkeit.
- Der Risk Increase Factor (RIF) gibt, im Gegensatz zum RDF, das Verhältnis zwischen der bedingten Endzustandswahrscheinlichkeit mit dem sicheren Ausfall des auszuwertenden Basisereignisses (Ausfallwahrscheinlichkeit 1) zur bedingten Endzustands-Wahrscheinlichkeit mit der normalen Ausfallwahrscheinlichkeit des Basisereignisses an. Mit dem RIF können Basisereignisse identifiziert werden, die einen großen Einfluss auf die Sicherheit der untersuchten Anlage haben, auch wenn die Ausfallwahrscheinlichkeit des Basisereignisses sehr gering ist.

Beide PSA-Modelle führen zu ähnlichen Importanzmaßen. Nur der RDF und der RIF für das Basisereignis S50 werden in RiskSpectrum® und SAPHIRE unterschiedlich dargestellt, da die Importanzmaße „unendlich“ sind und dieser Wert in den Programmen unterschiedlich verarbeitet wird. Nach dem einleitenden Ereignis haben die Diagnose der Ringraumüberflutung (OP_S50-DI), das Abfahren bei einer Überflutung (OP_ABF_S50), der Ausfall der Frischdampfumleitung (FDU.AUSF) und die Handmaßnahme zum Absperrern des Streckenschiebers bzw. der Ringleitung (OP_S50-AR) den größten Einfluss

auf die bedingte Kernschadenswahrscheinlichkeit. Der RDF führt zur gleichen Reihenfolge der Basisereignisse. Gemäß RIF haben sowohl die Diagnose der Ringraumüberflutung als auch die Handmaßnahme zum Absperren (OP_ABF_S50) den größten Einfluss und stellen somit die beiden relevantesten Sicherheitsmaßnahmen im Ereignisablauf dar. Die Ergebnisse unter erschwerenden Randbedingungen entsprechen denen bei normalen Randbedingungen.

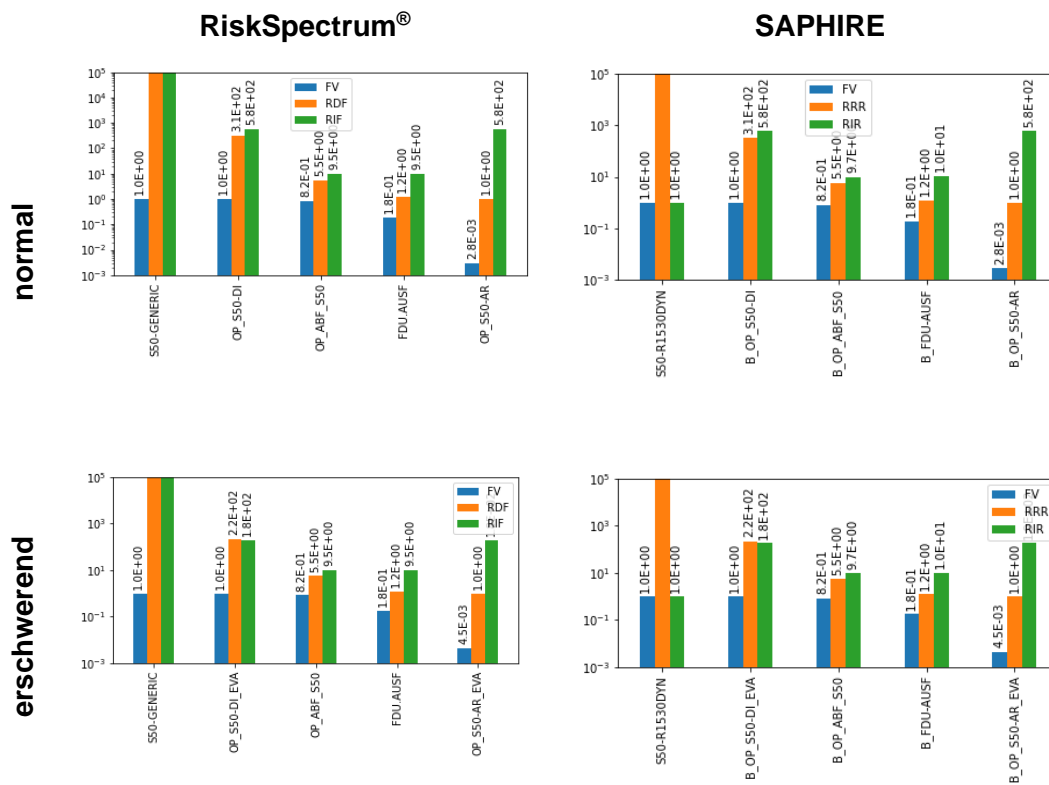


Abb. 5.7 Ergebnisse der Importanzanalyse für den Kernschadenszustand und beide klassischen PSA-Modelle

5.1.4 Schlussfolgerungen aus dem Vergleich der klassischen PSA-Modelle

Die beiden klassischen PSA-Programme wurden in den Abschnitten 5.1.1 und 5.1.2 qualitativ, auch in Bezug auf den Einsatz von pyRiskRobot, verglichen. Demnach kann die Auswahl des PSA-Programms für die Erstellung eines PSA-Modells von folgenden Faktoren abhängen: von der Komplexität bzw. dem Umfang des PSA-Modells, von der geplanten Verbreitung des PSA-Modells; vom Zugriff auf die Daten bzw. die Datenbankstruktur sowie von der Erfahrung der Nutzer, der eigenen Bearbeitungsrountinen und der Verfügbarkeit vorhandener Modelle. Die letzten beiden Faktoren sind für den Einsatz von pyRiskRobot relevant. Entsprechend der in Abschnitt 5.1.2 dargestellten Unterschiede gibt es derzeit noch folgende offene Punkte bei der automatisierten Übertragung

von PSA-Modellen mit pyRiskRobot: die Übertragung von Ereignisbäumen und Initialereignissen, die Übertragung von Exchange Events sowie die unterschiedlichen Definitionen von Wahrscheinlichkeitsverteilungen. Die ersten beiden Punkte sollen im Rahmen eines weiteren, bereits geplanten Forschungs- und Entwicklungsvorhabens zumindest konzeptionell (für die Ereignisbäume) gelöst werden.

Die beiden klassischen PSA-Modelle führen zu nahezu gleichen Ergebnissen, von der bedingten Endzustandswahrscheinlichkeit bis hin zu den Importanzmaßen von Basisereignissen. Das zeigt zum einen, dass die Übertragung des PSA-Modells von RiskSpectrum® in SAPHIRE mit pyRiskRobot fehlerfrei funktioniert. Zum anderen kann daraus geschlossen werden, dass die Berechnungsmethoden beider PSA-Programme zu gleichen Ergebnissen führen. pyRiskRobot kann demnach selbst bei einem Wechsel des PSA-Programms von einem überschaubaren PSA-Modell, wie hier für die Ringraumüberflutung mit 2.700 Basisereignissen und 800 Fehlerbäumen, zu einer erheblichen Zeiterparnis führen.

Die Diagnose der Ringraumüberflutung hat in den klassischen PSA-Modellen den größten Einfluss auf das Endergebnis (Ringraumüberflutung, Kernschaden). Des Weiteren ist gemäß dem Importanzmaß RIF die Handmaßnahme zum Absperren des Streckenschiebers bzw. der Ringleitung die zweitwichtigste Sicherheitsmaßnahme bei einer Ringraumüberflutung. Die Ausfallwahrscheinlichkeiten der Diagnose und der Handmaßnahme sind direkt von den dafür verfügbaren Zeitspannen abhängig. Das Absperren der Leitungen findet außerhalb der Gebäude statt und kann somit durch Wettereinflüsse erschwert werden. Dadurch verlängert sich vermutlich die für die Durchführung der Maßnahme erforderliche Zeitdauer. Aufgrund der längeren Dauer für das Absperren steht für die Diagnose weniger Zeit zur Verfügung, wodurch sich auch hier die Fehlerwahrscheinlichkeit erhöhen kann. Diese Ergebnisse lassen vermuten, dass erschwerende Randbedingungen einen deutlichen Effekt auf das Endergebnis der Ringraumüberflutung haben. Genauere zeitliche Analysen erfolgen mit dem dynamischem PSA-Modell im nachfolgenden Abschnitt.

5.2 Vergleich des dynamischen PSA-Modells mit den klassischen PSA-Modellen

Im Abschnitt 4.1 wurde der Ablauf des Szenarios anhand der einzelnen Handlungsblöcke des dynamischen Handlungsablaufes dargestellt und dabei auf die Unterschiede

zu den Systemfunktionen in den Ereignisbäumen der klassischen PSA-Modelle eingegangen. Grund für die Unterschiede ist, dass im dynamischen Handlungsablauf detaillierte zeitliche Betrachtungen möglich sind und deshalb zusätzliche Maßnahmen berücksichtigt werden können, um eine Überflutung zu verhindern.

Im Kapitel 4 wurden die klassischen PSA-Modelle und das dynamische PSA-Modell für das Szenario der Ringraumüberflutung beschrieben. Im Abschnitt 5.1 wurde gezeigt, dass die klassischen PSA-Programme RiskSpectrum® und SAPHIRE zu den gleichen Ergebnissen führen. Daher wird im Folgenden nur Bezug auf ein klassisches PSA-Modell genommen, wobei die Ergebnisse von RiskSpectrum® repräsentativ für beide klassischen PSA-Modelle dargestellt werden.

Zunächst erfolgt ein qualitativer Vergleich der Modellierung des Überflutungsszenarios zwischen klassischem und dynamischem PSA-Modell. Anschließend werden die Ergebnisse quantitativ verglichen. Dabei wird insbesondere die bedingte Überflutungswahrscheinlichkeit des Ringraumes nach dem Bruch der Feuerlöschwasserleitung betrachtet. Abschließend werden Schlussfolgerungen aus den beiden Vergleichen gezogen.

5.2.1 Qualitative Unterschiede in der Modellierung

Dynamische PSA-Modelle weichen in zwei wesentlichen Charakteristika von den Modellen der klassischen PSA ab. Dementsprechend sind auch die Eingangsinformationen in die beiden Typen von PSA-Modellen unterschiedlich. Zunächst werden die beiden Charakteristika kurz dargelegt, anschließend werden die Eingangsinformationen detailliert miteinander verglichen.

Ein dynamisches PSA-Modell ermöglicht die Modellierung von Prozess- oder Handlungsabläufen, wobei auch externe Codes eingebunden werden können. Eine wichtige Charakteristik dafür ist, dass auch kontinuierliche Verläufe von Systemgrößen simuliert werden können und sich außerdem ein Pfad in mehr als zwei Pfade verzweigen kann. Ebenso kann im dynamischen PSA-Modell ein Endzustand über eine Variable mit kontinuierlichem Wertebereich (Wasserstand im Ringraum) beschrieben werden und muss somit nicht einen diskreten Wertebereich (OK, Ringraumüberflutung) umfassen. In dem hier beschriebenen dynamischen PSA-Modell wird dies insbesondere am Verlauf des Wasseranstiegs mit der Zeit und der zeitlich abhängigen Schädigung der unterschiedlichen Systeme im Ringraum sowie an der Modellierung der für das Absperrn der Streckenschieber des Feuerlöschsystems benötigten Zeit deutlich. Dadurch wurde eine

Berücksichtigung der zusätzlichen Handlungsblöcke M-2 und D-2 im Vergleich zum klassischen PSA-Modell ermöglicht.

Des Weiteren können in dynamischen PSA-Modellen Abhängigkeiten in vielfältiger Weise modelliert werden, wie in Abb. 4.17 zu erkennen ist. In einem dynamischen Ereignisbaum müssen Ereignisse nicht in einer im Vorfeld vom Analysten manuell festgelegten Reihenfolge erfolgen, sondern können in Abhängigkeit von unterschiedlichen Faktoren zu unterschiedlichen Zeitpunkten eintreten, beispielsweise auch anhand von Ergebnissen eines externen Codes. Zudem können eine Verzweigungswahrscheinlichkeit im Ereignisbaum, eine beliebige andere Prozessgröße oder ein Handlungsablauf abhängig von anderen, zeitlich veränderlichen Größen sein. Bei dem Anwendungsfall der anlageninternen Überflutung kann das Schließen der Streckenschieber beispielsweise vor oder nach der Überflutung der Nachkühlpumpen erfolgen. Außerdem sind die Gehgeschwindigkeiten von den äußeren Randbedingungen abhängig und die erforderliche Wegstrecke zum Schließen der Streckenschieber ist für die beiden Quadranten, in denen es zu einem Leitungsbruch kommen kann, unterschiedlich.

Diese beiden Charakteristika des klassischen und des dynamischen PSA-Modells führen zu den in Tab. 5.10 zusammengefassten unterschiedlichen Eingangsinformationen für die Modelle. Da das dynamische PSA-Modell dem klassischen PSA-Modell nachempfunden wurde, sind die Ausfallwahrscheinlichkeiten ebenso wie die Eintrittshäufigkeit des Ausgangsereignisses im klassischen PSA-Modell auch im dynamischen PSA-Modell enthalten. Dies gilt auch für die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Ausfallwahrscheinlichkeiten. Unterschiede in den Eingangsinformationen zeigen sich bei der Berechnung der Karenzzeit (Zeitspanne zwischen Bruch der Löschwasserleitung und der Überflutung der Nachkühlpumpen) sowie bei der Modellierung der für die Absperrung der Leitungen benötigten Zeit. Die Karenzzeit wird in der Dokumentation des klassischen PSA-Modells /KKW 09/ über die Ausflussrate und das Wasservolumen bis zum Erreichen der Nachkühlpumpen abgeleitet, dann aber im klassischen PSA-Modell nur noch bei der Bewertung des Endzustands (IF / OK) indirekt berücksichtigt.

Tab. 5.10 Detaillierte Gegenüberstellung aller Eingangsvariablen des klassischen (K) und des dynamischen (D) PSA-Modells

Eingangsinformation	Modell	Erläuterung
Eintrittswahrscheinlichkeit Initialereignis	K D	identisch
p (Sumpfmeldung)	K D	identisch
p (KMA-Meldung)	K D	identisch
p (Diagnose D-1)	K D	identisch
p (Absperren der Streckenschieber)	K D	identisch
p (Streckenschieber schließt nicht)	K D	identisch
p (Quadrant 1 oder 3)	K D	identisch
Schalter für erschwerende Randbedingungen	K D	identisch
Ausflussrate aus Leckage	(K) D	für das klassische PSA-Modell nur ein konstanter Parameter bei der Berechnung der Karenzzeit; im dynamischen PSA-Modell wurde eine Unsicherheitsverteilung angenommen (siehe Abschnitt 4.1.1)
Wasservolumen bis zur Schädigung der Nachkühlpumpen	(K) D	für das klassische PSA-Modell nur bei der Berechnung der Karenzzeit; im dynamischen PSA-Modell wurde eine Unsicherheitsverteilung angenommen.
Gehgeschwindigkeit (ALW, FW)	D	für das klassische PSA-Modell nicht im Detail berücksichtigt (laut Dokumentation)
Strecke zu Streckenschiebern	D	für das klassische PSA-Modell nicht im Detail berücksichtigt (laut Dokumentation)
Notwendige Zeit bis zum Absperren der Streckenschieber	(K) D	für das klassische PSA-Modell nur eine grobe Abschätzung mit Bezug zur Karenzzeit
Handlungsblöcke M-2 und D-2	D	im klassischen PSA-Modell nicht berücksichtigt
K: wurde im klassischen PSA-Modell berücksichtigt (K): wurde nur als Hintergrundinformation im klassischen PSA-Modell berücksichtigt D: wurde im dynamischen PSA-Modell berücksichtigt p: Ausfallwahrscheinlichkeit		

Zur Berechnung der zum Absperren der Leitungen benötigten Zeit werden in der Dokumentation des klassischen PSA-Modells /KKW 09/ keine Angaben gemacht. Dort wird nur die Einschätzung getroffen, dass das Absperren innerhalb der Karenzzeit möglich ist. Im dynamischen PSA-Modell hingegen wurde die benötigte Zeit detailliert modelliert

und dabei die Gehgeschwindigkeiten und notwendigen Entfernungen zu den Streckenschiebern einbezogen. Hierbei wird die größere Detailtiefe des dynamischen PSA-Modells deutlich, da dabei unterschiedliche Personengruppen (Feuerwehr FW und Anlagenwärter ALW zum Absperrern, sowie Schichtleiter SL und Schichtleiter-Stellvertreter SL-V in der Warte), die miteinander interagieren können, modelliert wurden. Zuletzt wurden im dynamischen PSA-Modell weitere Parameter bei der Modellierung der zusätzlichen Handlungsblöcke M-2 und D-2 berücksichtigt, die im klassischen PSA-Modell nicht notwendig sind.

Die hier dargestellten Möglichkeiten im dynamischen PSA-Modell erlauben im Vergleich zur Boole'schen Algebra der klassischen PSA-Modelle einerseits eine flexiblere Modellierung des Ereignisablaufes, verursachen dadurch andererseits jedoch eine größere Komplexität im Modell, was an den zusätzlichen Eingangsinformationen deutlich wird. Dadurch können aber gerade Handmaßnahmen (oder Mindestwirksamkeiten von Systemen, wenn auch nicht im hier dargestellten Modell relevant) im dynamischen PSA-Modell genauer bewertet werden.

5.2.2 Quantitativer Vergleich der Ergebnisse

Generell werden die Ergebnisse in MCDET (dynamisches PSA-Modell) anders berechnet als in den klassischen PSA-Programmen. MCDET berücksichtigt bei der Auswertung von Handlungsabläufen auch Wahrscheinlichkeiten der Erfolgspfade (z. B. die Wahrscheinlichkeit für eine erfolgreiche Diagnose: $1 - 1,7 \cdot 10^{-3}$). In den klassischen PSA-Modellen werden in den Standardeinstellungen diese Wahrscheinlichkeiten vernachlässigt, da sie sehr nahe an 1 sind und daher oft kaum Einfluss auf die gesamten Ausfallwahrscheinlichkeiten von Systemen haben. Die quantitativen Ergebnisse von den dynamischem und den klassischen PSA-Modellen können daher geringfügig abweichen, werden hier in diesen Fällen aber als gleich betrachtet.

Im dynamischen PSA-Modell wird zwischen Ereignisabläufen ohne Erfolg der Absperrung des Feuerlöschsystems (E-0) sowie mit Erfolg der Absperrung (E-1) unterschieden. Bei Erfolg der Absperrung (E-1) kann es zu einer Überflutung des Ringraumes kommen (ausgetretenes Wasservolumen ist größer als das kritische Wasservolumen von 1.274 m^3), wenn die Absperrung zu spät erfolgt. Die Karenzzeit für die Absperrung beträgt etwa 2,5 h. Beide Ereignisabläufe führen zur Überflutung des Ringraums und werden damit im Ergebnis der bedingten Überflutungswahrscheinlichkeit berücksichtigt.

Das Gesamtergebnis der bedingten Überflutungswahrscheinlichkeit ist in Tab. 5.11 für das klassische und das dynamische PSA-Modell angegeben. Das klassische und das dynamische PSA-Modell zeigen dabei einen deutlichen Unterschied, obwohl beide PSA-Modelle identische Ausfallwahrscheinlichkeiten für die einzelnen Komponenten und Personalhandlungen haben. Der Unterschied wird durch die zusätzlichen Handlungsblöcke M-2 und D-2 (siehe Abb. 4.1) sowie der ausreichenden zur Verfügung stehenden Zeitspanne für die Durchführung dieser Handlungsblöcke verursacht. Im dynamischen PSA-Modell und bei normalen Randbedingungen liegt der Anteil der Ereignisabläufe ohne Erfolg der Absperrung (E-0) zur Überflutungswahrscheinlichkeit bei etwa 97 %. Demzufolge hat die Überflutung trotz erfolgreicher Absperrung (E-1) nur einen geringen Anteil an der Schadenswahrscheinlichkeit, wobei hierfür die Diagnosezeit den größten Beitrag liefert. Bei erschwerenden Randbedingungen wird die bedingte Überflutungswahrscheinlichkeit um den Faktor 3,1 bzw. 4,8 im klassischen bzw. dynamischen PSA-Modell erhöht. Dabei ist mit einem Faktor von 15,5 ein deutlicher Unterschied bei Ereignisabläufen mit Erfolg der Absperrung zu erkennen. Das dynamische PSA-Modell weist zudem bei erschwerenden Randbedingungen einen Anteil von Ereignisabläufen mit Erfolg der Absperrung an der gesamten Überflutungswahrscheinlichkeit von 10 % aus. Dies deutet auf deutliche Auswirkungen der Zeitverzögerungen beim Absperrern (Handlungsblöcke A-1, A-2, A-3) hin. Insgesamt lassen sich daraus die folgenden Schlussfolgerungen ziehen:

- Die Handlungsblöcke M-2 und D-2 haben einen deutlichen Einfluss auf die Überflutungswahrscheinlichkeit zwischen klassischem und dynamischem PSA-Modell.
- Die Zeitverzögerung durch erschwerende Randbedingungen beim Absperrern der Feuerlöschwasserleitung hat ebenfalls einen deutlichen Einfluss im Vergleich zu normalen Randbedingungen.

Tab. 5.11 Bedingte Wahrscheinlichkeit für Endzustand ‘Überflutung Ringraum (IF)’ bei nicht erfolgter Absperrung (E-0) und erfolgter Absperrung (E-1)

Randbedingungen	Klassisch	Dynamisch		
		E-0	E-1	gesamt
Normal	1,7 E-03	5,50 E-06	1,69 E-07	5,67 E-06
Erschwerend	5,32 E-03	2,47 E-05	2,62 E-06	2,73 E-05
Erschwerend/Normal	3,1 E+00	4,50 E+00	1,55 E+01	4,8 E+00

Zur genaueren Untersuchung der Einflüsse der Handlungsblöcke M-2 und D-2 wurden die in Tab. 5.12 dargestellten Varianten definiert. Diese Varianten entsprechen den in der Tabelle dargestellten Sequenzen aus dem klassischen Ereignisbaum S50-RS1530-DYN in Abb. 4.2. In der Variante A wird im klassischen PSA-Modell nur von einer nicht erfolgten Absperrung ausgegangen, da sonst der Endzustand 'OK' mit der Sequenz 1 erreicht wird. Die bedingte Wahrscheinlichkeit für eine nicht erfolgte Absperrung (E-0) im dynamischen PSA-Modell hat den gleichen Wert wie im klassischen PSA-Modell. In den Varianten B, C und D kann wegen der zusätzlichen Handlungsblöcke M-2 und D-2 der Endzustand E-1 mit erfolgreicher Absperrung erreicht werden, obwohl mindestens eine im klassischen PSA-Modell für eine Absperrung erforderliche Systemfunktion ausfällt. Der Endzustand E-1 im dynamischen PSA-Modell kann wie E-0 zum Endzustand 'Ringraumüberflutung IF' des klassischen PSA-Modells führen. Für die Variante D gibt es im klassischen PSA-Modell keine entsprechende Sequenz, da schon die Einzelausfälle von M-1 bzw. D-1 in den Sequenzen 3 und 4 zum Endzustand IF führen.

Tab. 5.12 Übersicht über die betrachteten Varianten des Handlungsablaufes im dynamischen PSA-Modell mit der entsprechenden Sequenz mit Endzustand IF in Abb. 4.2

Variante	Meldung M-1	Diagnose D-1	Sequenz im Ereignisbaum mit Endzustand IF
Variante A	erfolgreich	richtig	2
Variante B	erfolgreich	falsch	3
Variante C	ausgefallen	richtig	4
Variante D	ausgefallen	falsch	–

Die quantitativen Ergebnisse der unterschiedlichen Varianten sind in der nachfolgenden Tab. 5.13 im Detail dargestellt.

Tab. 5.13 Vergleich der bedingten Überflutungswahrscheinlichkeit für alle Varianten im dynamischen und klassischen PSA-Modell bei normalen Randbedingungen

Variante	Klassisch	Dynamisch		
		E-0	E-1	gesamt
Variante A	5,50 E-06	5,49 E-06	4,71 E-09	5,49 E-06
Variante B	1,70 E-03	9,35 E-09	1,58 E-07	1,59 E-07

Variante	Klassisch	Dynamisch		
		E-0	E-1	gesamt
Variante C	1,00 E-08	4,78 E-14	6,96 E-09	6,96 E-09
Variante D	–	< 1,00 E-14	1,70 E-11	1,70 E-11
Anmerkung: Variante A: Im klassischen PSA-Modell wird nur von einer ausgefallenen Absperrung ausgegangen, da sonst der Endzustand OK erreicht wird. Variante D wird im klassischen PSA-Modell nicht modelliert.				

In der Variante A kann im dynamischen PSA-Modell trotz einer erfolgreichen Meldung M-1, einer erfolgreichen Diagnose D-1 und einer erfolgreichen Absperrung der Löschwasserleitung E-1 der Endzustand IF mit einer Wahrscheinlichkeit von $4,71 \text{ E-}09$ eintreten. Die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls der Absperrung ($p = 5,49 \text{ E-}06$) ist jedoch um einen Faktor von mehr als 1.000 größer und überwiegt somit in der gesamten Überflutungswahrscheinlichkeit. Die bedingte Überflutungswahrscheinlichkeit ist somit bei klassischem und dynamischem PSA-Modell gleich.

In der Variante B führt der Ausfall von D-1 mit einer vergleichsweise hohen Ausfallwahrscheinlichkeit von $1,7 \text{ E-}03$ zum Handlungsblock D-2 und damit zu einer Zeitverzögerung von etwa 30 min. Die daraus resultierende bedingte Wahrscheinlichkeit für eine Überflutung trotz erfolgreicher Absperrung E-1 übersteigt die Wahrscheinlichkeit für den Ausfall der Absperrung E-0. Dadurch ist die bedingte Wahrscheinlichkeit für eine Überflutung $p = 1,58 \text{ E-}07$ bei E-1 mit einem Faktor von ca. 17 größer als die kombinierten Ausfallwahrscheinlichkeit der Diagnose D-1 und der Absperrung ($p = 9,35 \text{ E-}09$). Da im dynamischen PSA-Modell die falsche Diagnose D-1 durch die Diagnose D-2 sowie die relativ sichere rechtzeitige Absperrung kompensiert werden kann, wird der hohe Beitrag der Sequenz 2 im klassischen PSA-Modell zur Überflutungswahrscheinlichkeit deutlich reduziert. Dieser Unterschied zwischen klassischem und dynamischem PSA-Modell wirkt sich auf die gesamte bedingte Überflutungswahrscheinlichkeit des Szenarios aus.

In der Variante C führt die Ausfallwahrscheinlichkeit der Absperrung E-0 in Kombination mit der Ausfallwahrscheinlichkeit der Sumpf- und KMA-Meldungen M-1 zu einer sehr geringen bedingten Überflutungswahrscheinlichkeit von $p = 4,78 \text{ E-}14$. Die Zeitverzögerung durch den Handlungsblock M-2 führt jedoch zu einer deutlich erhöhten Überflutungswahrscheinlichkeit von $p = 6,96 \text{ E-}09$ bei einer erfolgreichen Absperrung E-1. Dadurch erreichen die Ergebnisse des dynamischen Modells fast die Werte des klassischen Modells ($p = 1,00 \text{ E-}08$).

Die Ergebnisse der Variante D entsprechen denen der vorab gezeigten Varianten.

Damit lassen sich aus den Ergebnissen in Tab. 5.13 folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Die Kompensation der falschen Diagnose D-1 durch den Handlungsblock D-2 in der Variante B des dynamischen PSA-Modells führt trotz einer Verzögerung zu einer deutlich geringeren Wahrscheinlichkeit der Ringraumüberflutung im Vergleich zum klassischen PSA-Modell.
- Die Zeitreserve im Handlungsablauf und die Ausfallwahrscheinlichkeit der Absperrung führen dazu, dass Überflutungen bei erfolgreicher Absperrung E-1 einen vernachlässigbaren Beitrag auf die bedingte Überflutungswahrscheinlichkeit im dynamischen PSA im Vergleich zum klassischen PSA-Modell haben.

Der Handlungsablauf zur Absperrung der Löschwasserleitung kann durch erschwerende Randbedingungen verzögert werden, siehe Abschnitt 3.3. Wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, werden folgende Auswirkungen der erschwerenden Randbedingungen modelliert:

- Die erschwerenden Randbedingungen führen zu einer geringeren Gehgeschwindigkeit, die die Absperrung der Löschwasserleitung verzögert (siehe Handlungsblock A-1 in Abschnitt 3.2).
- Durch den angenommenen erhöhten Stress erhöht sich die Wahrscheinlichkeit eines Handlungsfehlers beim Absperrern auf $2,47 \cdot 10^{-5}$ (siehe Handlungsblock A-1 in Abschnitt 3.2).
- Durch die längere, benötigte Zeitspanne für die Absperrung wird für die strategische Planung innerhalb der Diagnose 30 min weniger Zeit eingeplant (siehe Handlungsblock D-1). Dadurch erhöht sich die Wahrscheinlichkeit einer falschen Diagnose auf $5,30 \cdot 10^{-3}$.

Die daraus resultierende bedingte Überflutungswahrscheinlichkeit der vier Varianten ist in Tab. 5.14 dargestellt.

Tab. 5.14 Vergleich der bedingten Überflutungswahrscheinlichkeit für alle Varianten im dynamischen und klassischen PSA-Modell bei erschwerenden Randbedingungen

	Klassisch	Dynamisch		
Variante		E-0	E-1	gesamt
Variante A	2,47 E-05	2,46 E-05	2,48 E-06	2,71 E-05
Variante B	5,30 E-03	1,31 E-07	1,35 E-07	2,66 E-07
Variante C	1,00 E-08	2,38 E-13	1,47 E-99	1,47 E-09
Variante D	–	< 1 E-14	4,57 E-11	4,57 E-11

Anmerkung: Variante A: Im klassischen PSA-Modell wird nur von einer ausgefallenen Absperrung ausgegangen, da sonst der Endzustand OK erreicht wird. Variante D wird im klassischen PSA-Modell nicht modelliert

In der Variante A wird die Absperrung durch die erschwerenden Randbedingungen so verzögert, dass die Wahrscheinlichkeit einer Überflutung bei E-1 etwa 10 % der Ausfallwahrscheinlichkeit der Absperrung E-0 beträgt. Dadurch führt das dynamische PSA-Modell zu einer höheren bedingten Überflutungswahrscheinlichkeit als das klassische PSA-Modell (Faktor 1,10). Die Ergebnisse der Varianten B, C und D entsprechen den Ergebnissen bei normalen Randbedingungen. Dadurch zeigt sich, dass

- der Handlungsblock D-2 im dynamischen PSA-Modell trotz der Zeitverzögerungen bei erschwerenden Randbedingungen zu einer geringeren gesamten bedingten Überflutungswahrscheinlichkeit ($p = 2,73 \text{ E-}05$) führt als im klassischen PSA-Modell ($p = 5,30 \text{ E-}03$);
- die erschwerenden Randbedingungen die Zuverlässigkeit einzelner Handlungsabläufe und Sequenzen deutlich beeinflussen können (z. B. Variante A). In diesem Fall führen die im klassischen PSA-Modell gemachten Annahmen für den Ereignisablauf nicht zu einem konservativen Ergebnis.

Die bisherigen Ergebnisse haben gezeigt, dass Verzögerungen einen deutlichen Einfluss auf die Überflutungswahrscheinlichkeiten bestimmter Handlungsabläufe haben können. Die Wahrscheinlichkeit einer Überflutung unter Voraussetzung der Absperrung E-1 und der Varianten A bis D aus Tab. 5.12 (im Folgenden als „spezifische Überflutungswahrscheinlichkeit“ bezeichnet) ist in Abb. 5.8 dargestellt.

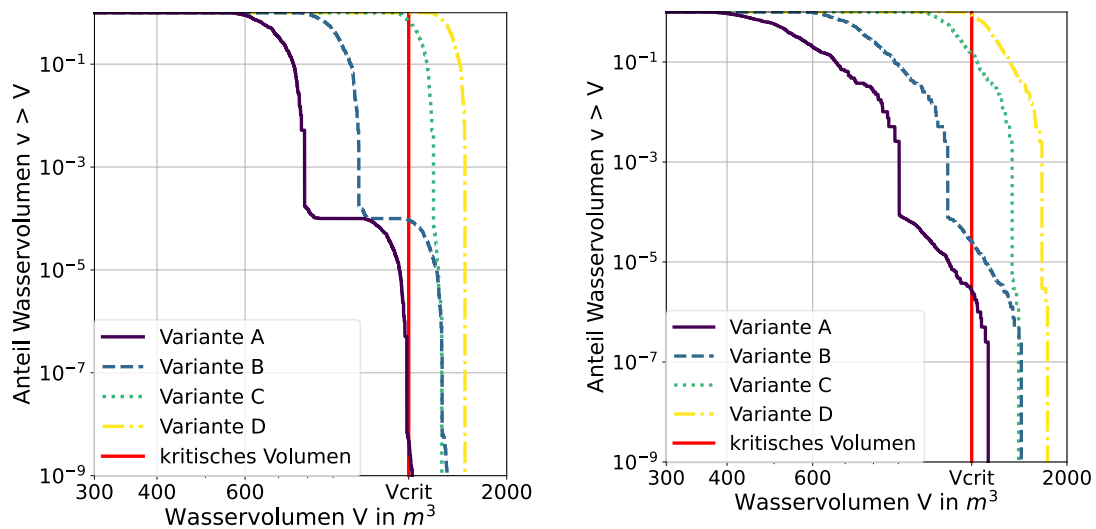


Abb. 5.8 Komplementäre kumulative Wahrscheinlichkeitsverteilung des ausgetretenen Wasservolumens nach erfolgter Absperrung (E-1) unter Voraussetzung der unterschiedlichen Varianten für normale Randbedingungen (links) und erschwerender Randbedingungen (rechts)

Der Verlauf der kumulativen Wahrscheinlichkeitsverteilung zeigt jeweils zwei konstante horizontale Verläufe. Der erste horizontale Verlauf bei $p = 1$ geht bis zur minimalen Dauer eines Ereignisablaufes. Zum Beispiel geht für die Variante A der horizontale Verlauf bis ca. 500 m^3 , was einer Dauer von etwa 60 min von D-1 entspricht. Der horizontale Verlauf von Variante B geht bis ca. 750 m^3 (ca. 90 min), was der Dauer von D-1 und D-2 entspricht. Der nachfolgende Abstieg resultiert aus den Zufallsverteilungen der betrachteten Dauern. Der zweite horizontale Verlauf bei $p = 1,0 \text{ E-}04$ von den Varianten A und B stellt die Zeitverzögerung beim Ausfall der Sumpfmeldung in M-1 dar. Bei den Varianten C und D wird von einem Fehler von M-1 ausgegangen, weshalb der zweite horizontale Verlauf direkt an den ersten bei $p = 1$ anschließt.

Aus diesen Betrachtungen kann geschlossen werden, dass alle Szenarien, die zu einer Überflutung führen, zumindest mit dem Ausfall der Sumpfmeldung in Zusammenhang stehen.

Die kumulative Wahrscheinlichkeitsverteilung der spezifischen Überflutungswahrscheinlichkeit bei normalen Randbedingungen wird in Abb. 5.8 (links) und Tab. 5.15 dargestellt. Unter der Voraussetzung von Variante A und E-1 beträgt die spezifische Überflutungswahrscheinlichkeit $p = 4,71 \text{ E-}09$. Wenn allerdings das kritische Wasservolumen bis zum

Ausfall der Nachkühlpumpen von 1.274 m³ um 25 m³ geringer wäre, steigt die spezifische Überflutungswahrscheinlichkeit um einen Faktor von 200. Bei einem kritischen Volumen von 1.000 m³ steigt sie auf knapp 1,00 E-04 und beträgt damit knapp 6 % der Ausfallwahrscheinlichkeit der Diagnose D-1. Die Ausfallwahrscheinlichkeit von D-1 entspricht dem Hauptbeitrag der Überflutungswahrscheinlichkeit im klassischen PSA-Modell. Damit könnte die Variante A bzw. Sequenz 2 im klassischen Modell ebenfalls einen merkbaren Beitrag auf die gesamte bedingte Überflutungswahrscheinlichkeit haben. Unter der Voraussetzung der Variante B hat eine Verringerung des kritischen Wasservolumens keinen größeren Einfluss auf die spezifische Überflutungswahrscheinlichkeit. In den Varianten C und D müsste das kritische Wasservolumen deutlich größer sein, um die Überflutungswahrscheinlichkeit zu senken. Bei dem aktuellen kritischen Wasservolumen liegt die Überflutungswahrscheinlichkeit nahe 1. Zusammenfassend zeigt die Verteilung der spezifischen Überflutungswahrscheinlichkeit unter Variante A in Abhängigkeit des kritischen Wasservolumens in Tab. 5.15, dass kleine Änderungen in den Parametern eine große Auswirkung auf die Überflutungswahrscheinlichkeit haben können.

Tab. 5.15 Spezifische Überflutungswahrscheinlichkeit unter Voraussetzung der Variante A und E-1 zur Verdeutlichung der Sensitivität zum kritischen Wasservolumen

Kritisches Wasservolumen	Überflutungswahrscheinlichkeit
1.000 m ³	9,98 E-05
1.200 m ³	1,85 E-05
1.250 m ³	1,01 E-06
1.274 m ³	4,71 E-09
1.300 m ³	2,95 E-10

Die kumulativen Wahrscheinlichkeitsverteilungen der spezifischen Überflutungswahrscheinlichkeiten bei erschwerende Randbedingungen werden in Abb. 5.8 (rechts) dargestellt. Aufgrund der erschwerenden Randbedingungen werden für die strategische Planung innerhalb der Diagnose D-1 nur 30 min anstelle von 60 min eingeplant. Dadurch soll mehr Zeit für die außerhalb von Gebäuden durchzuführenden Handmaßnahmen zur Verfügung stehen. Dadurch steigt zwar die Ausfallwahrscheinlichkeit von D-1, das ausgetretene Wasservolumen ist am Ende der Diagnose D-1 allerdings geringer. Zusätzlich wird für das Absperren der Löschwasserleitung außerhalb von Gebäuden mehr Zeit be-

nötigt. Dadurch haben erschwerende Randbedingungen zwei Effekte auf den Handlungsablauf:

- Durch die verkürzte Diagnose D-1 ist bei einem günstigem Ereignisablauf eine frühere Absperrung der Löschwasserleitung möglich als dies unter normalen Randbedingungen der Fall wäre. Die spezifische Überflutungswahrscheinlichkeit sinkt deshalb mit zunehmenden kritischen Volummen früher.
- Insgesamt wird jedoch für das Absperrren der Löschwasserleitung mehr Zeit benötigt. Die Überflutungswahrscheinlichkeit fällt daher langsamer mit zunehmenden kritischen Volumen als unter normalen Randbedingungen.

Wie in Tab. 5.16 dargelegt, führen diese Effekte für die Variante A zu einer deutlich größeren spezifischen Überflutungswahrscheinlichkeit (Faktor 529) während die spezifischen Überflutungswahrscheinlichkeiten der Varianten B, C und D bei erschwerenden Randbedingungen kleiner sind als bei normalen Randbedingungen. Die Auswirkungen dieser beiden Effekte sind zudem in Abb. 5.9 zu sehen, wo auch die Überflutungswahrscheinlichkeit bei erschwerenden Randbedingungen ohne verkürzte Diagnose dargestellt ist. Wenn man bei erschwerenden Randbedingungen nicht von einer verkürzten Diagnose ausgeht, führt das verzögerte Absperrren der Löschwasserleitung in allen Szenarien zu einem größeren ausgetretenen Wasservolumen als bei normalen Randbedingungen. Dieses Beispiel zeigt die Auswirkungen einer Annahme und verdeutlicht die Relevanz von Sensitivitätsanalysen in klassischen und dynamischen PSA-Modellen.

Tab. 5.16 Spezifische Überflutungswahrscheinlichkeit unter Voraussetzung der Varianten A bis D bei erfolgreicher Absperrung E-1 im Vergleich zwischen normalen und erschwerenden Randbedingungen

Variante	Normale Randbedingungen	Erschwerende Randbedingungen	Erschwerend / normal
A	4,72 E-09	2,50 E-06	529
B	9,27 E-05	2,55 E-05	0,28
C	6,97 E-01	1,48 E-01	0,21
D	1,00 E±00	8,63 E-01	0,86

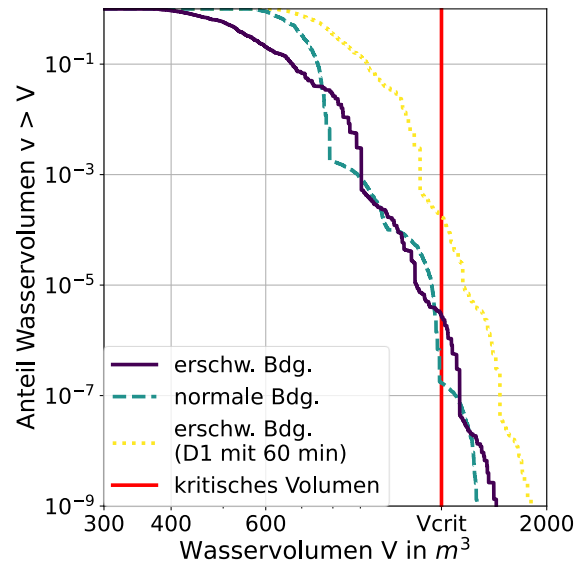


Abb. 5.9 Komplementäre kumulative Wahrscheinlichkeitsverteilung der ausgetretenen Wasservolumen (alle Varianten) für normale und erschwerende Randbedingungen und erschwerende Randbedingungen bei einer Dauer für die Diagnose D1 von 60 min

Weiterhin können nicht nur Verzögerungen im Handlungsablauf, sondern auch zufällige Randbedingungen im Szenario die spezifische Überflutungswahrscheinlichkeit beeinflussen. Ein Beispiel hierfür ist die Unterscheidung zwischen dem ersten und dritten Quadranten des Ringraums. Bisher wurden beide Quadranten gleichzeitig betrachtet. Da die Streckenschieber für eine Leckage im ersten Quadranten jedoch näher liegen als für den dritten Quadranten, kann auch hier ein Einfluss auf die Überflutungswahrscheinlichkeit bestehen. Die spezifische Überflutungswahrscheinlichkeit mit Unterscheidung zwischen den Quadranten ist in Abb. 5.10 dargestellt. Bei normalen Randbedingungen ist die spezifische Überflutungswahrscheinlichkeit weitgehend unabhängig vom betroffenen Quadranten, da der Streckenunterschied bei normaler Gehgeschwindigkeit nur einen geringen Zeitunterschied verursacht. Bei erschwerenden Randbedingungen ist jedoch die Gehgeschwindigkeit deutlich herabgesetzt, was dementsprechend auch Zeitunterschiede beim Schließen der Streckenschieber für die beiden Quadranten bedeutet. Diese Zeitunterschiede sind in der spezifischen Überflutungswahrscheinlichkeit deutlich ersichtlich.

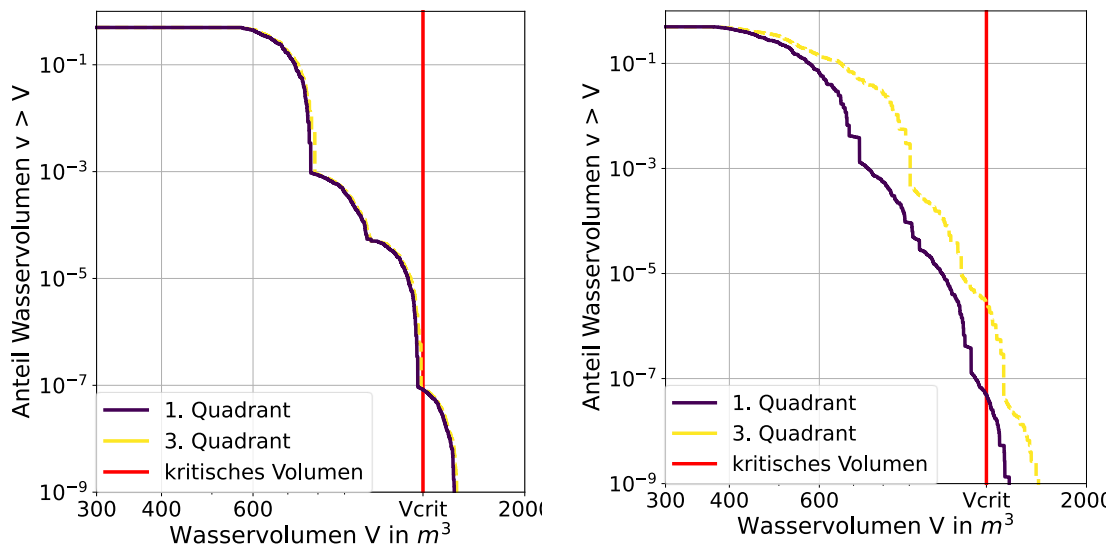


Abb. 5.10 Spezifische Überflutungswahrscheinlichkeit nach erfolgreicher Absperrung ohne Unterscheidung in Varianten (links: unter normalen Randbedingungen; rechts: unter erschwerenden Randbedingungen)

Abschließend erfolgt die Betrachtung der Dauer des Szenarios für unterschiedliche Ereignisabläufe, vor allem mit Blick auf die verfügbare Zeitspanne bis zur Ringraumüberflutung. Die verfügbare Zeit bis zur Ringraumüberflutung bei einer Speiserate der Leckage von ca. 500 m³/h bis zum kritischen Wasservolumen von 1.274 m³ zur Schädigung der Nachkühlpumpen beträgt ca. 2,5 h. Die zum Absperrern der Löschwasserleitung erforderliche Zeitspanne wird hauptsächlich durch folgende Parameter definiert (siehe auch Abschnitt 3.2):

- Dauer vom Bruch der Löschwasserleitung bis zur Meldung: 1 min bei Sumpfmeldung in M-1; ca. 60 min bei KMA-Meldung in M-1; ca. 80 min bei M-2,
- Dauer der Diagnose: 50 – 70 min bei D-1 bei normalen Randbedingungen, zusätzlich weniger als 30 min bei D-2 sowie
- Dauer der Absperrung: weniger als 15 – 20 min bei normalen Randbedingungen; weniger als 70 min bei erschwerenden Randbedingungen.

Im Folgenden werden drei Fälle skizziert:

- Erstens, für einen Ereignisablauf mit erfolgreicher Sumpfmeldung in M-1 und Diagnose D-1 werden etwa 60 min benötigt. Die für die Absperrung vorhandene Zeit von

ca. 90 min ist somit ausreichend, häufig auch unter erschwerenden Randbedingungen mit einer Diagnosedauer von 30 min.

- Zweitens, bei erfolgreicher Sumpfmeldung in M-1 mit falscher Diagnose D-1 erfolgt die richtige Diagnose in D-2 nach ca. 90 min. Damit sind ca. 60 min für die Absperrung verfügbar, was unter normalen Randbedingungen ausreichend ist.
- Drittens, bei Versagen der Sumpfmeldung und erfolgreicher KMA-Meldung in M-1 sowie 60 min Diagnose stehen 30 min für die Absperrung zur Verfügung. Demnach ist unter diesen Annahmen die Absperrung unter normalen Randbedingungen in den meisten Fällen möglich (bedingte Überflutungswahrscheinlichkeit von Variante A beträgt $4,71 \text{ E-}09$). Aus diesen drei Fällen können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

Die oben erfolgte Interpretation der Abb. 5.8 (links), dass alle Ringraumüberflutungen mit dem Ausfall der Sumpfmeldung zusammenhängen, wird bestätigt.

Für einzelne Ausfälle, z. B. der Sumpfmeldung oder der Diagnose D-1, bestehen ausreichend zeitliche Reserven.

Für mehrere Ausfälle oder Kombinationen von Ausfällen, z. B. von M-1 in Kombination mit erschwerenden Randbedingungen ist die Zeitreserve nicht ausreichend. Unter der Annahme dieser Ereignisabläufe geht die spezifische Überflutungswahrscheinlichkeit bis 1, siehe Tab. 5.16.

5.2.3 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen des Vergleichs

Das dynamische PSA-Modell wurde mit den klassischen PSA-Modellen sowohl qualitativ als auch quantitativ verglichen.

Qualitativ unterscheidet sich das dynamische PSA-Modell von den klassischen dahingehend, dass es eine detaillierte Modellierung von Prozess- oder Handlungsabläufen sowie von Abhängigkeiten zwischen unterschiedlichen Faktoren im Modell erlaubt. Dementsprechend können Ereignisabläufe deutlich flexibler modelliert werden, was durch die zusätzlichen Handlungsblöcke M-2 und D-2 im dynamischen PSA-Modell gezeigt wurde. Daraus folgend sind im Vergleich zum klassischen PSA-Modell zusätzliche Eingangsinformationen für das dynamische PSA-Modell notwendig. Die zusätzlichen Eingangsinformationen führen neben den komplexeren hinterlegten Modellen (basierend auf logi-

schen Operatoren im klassischen PSA-Modell) zu einer höheren Komplexität bei der Modellierung.

Die quantitative Analyse mit dem dynamischen PSA-Modell zeigte im Vergleich zu den klassischen PSA-Modellen folgende Ergebnisse:

- Es sind deutliche Zeitreserven im Handlungsablauf zur Unterbindung der Ringraumüberflutung vorhanden. Dadurch ist der Beitrag von Überflutungen bei einer erfolgreichen, aber verspäteten Absperrung des Feuerlöschwassersystems im Vergleich zum Ausfall der Absperrung vernachlässigbar.
- Überflutungen des Ringraums hängen entweder mit dem Ausfall der Absperrung oder mit dem Ausfall der Sumpfmeldung zusammen.
- Die im dynamischen PSA-Modell zusätzlich modellierten Schritte M-2 und D-2 führen zu einer deutlichen Senkung der Überflutungswahrscheinlichkeit im Vergleich zum klassischen PSA-Modell. Grund hierfür sind die Zeitreserven im Handlungsablauf sowie die im Vergleich zu anderen Ausfallwahrscheinlichkeiten hohe Ausfallwahrscheinlichkeit der Diagnose (Hauptbeitrag im klassischen PSA-Modell).
- Weiterhin wurde mit dem dynamischen PSA-Modell gezeigt, dass geringe Änderungen im kritischen Wasservolumen im Ringraum einen Einfluss auf dessen Überflutungswahrscheinlichkeit haben können.
 - Wenn das kritische Wasservolumen 25 m³ kleiner wäre, würde die Überflutungswahrscheinlichkeit nach erfolgreicher, aber verspäteter Absperrung knapp 20 % der Ausfallwahrscheinlichkeit der Absperrung ausmachen.
 - Sofern das kritische Wasservolumen 1.000 m³ betragen würde, würde die Überflutungswahrscheinlichkeit nach erfolgreicher, aber verspäteter Absperrung knapp 6 % der gesamten Überflutungswahrscheinlichkeit des klassischen PSA-Modells ausmachen.

Demzufolge kann sich auch die benötigte Zeit für die Absperrung auf die Überflutungswahrscheinlichkeit auswirken. So kann sich z. B. der Beitrag einzelner Sequenzen durch die Zeitverzögerung unter erschwerenden Randbedingungen deutlich erhöhen, gleiches gilt auch für die Unterschiede zwischen den beiden Quadranten.

Der Ausfall der Diagnose (D-1) dominiert die gesamte Überflutungswahrscheinlichkeit aufgrund der vergleichsweise hohen Ausfallwahrscheinlichkeit. Daher ergeben die oben

gezeigten Effekte des kritischen Wasservolumens oder von Zeitverzögerungen nur einen untergeordneten Beitrag zur gesamten Überflutungswahrscheinlichkeit. Wäre die Ausfallwahrscheinlichkeit der Diagnose D-1 deutlich geringer, hätten das kritische Wasservolumen oder Zeitverzögerungen, z. B. durch erschwerende Randbedingungen, einen deutlich größeren Effekt auf die gesamte Überflutungswahrscheinlichkeit.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens 4721R01530 wurde das Szenario einer „Leckage des Feuerlöschsystems SGB im Ringraum“ mit den beiden klassischen (statischen) PSA-Programmen RiskSpectrum® und SAPHIRE sowie mit der von der GRS entwickelten Methode der dynamischen PSA MCDET und dem Crew-Modul modelliert. Bei diesem Szenario wird von einem Bruch einer Löschwasserleitung des Feuerlöschsystems zwischen deren Eintritt in den Reaktorgebäude-Ringraum und deren Absperrarmatur ausgegangen. In diesem Abschnitt steht die Löschwasserleitung dauerhaft unter Druck, ein Ausfluss kann nur durch Absperrern der Löschwasserleitung gestoppt werden. Dazu sind Handmaßnahmen außerhalb von Gebäuden erforderlich. Wird der Ausfluss in den Ringraum nicht gestoppt, werden ab einem Wasservolumen von 1.274 m³ im Ringraum u. a. die Nachkühlpumpen beeinträchtigt, was zum Endzustand „Ringraum überflutet“ führt.

Zur Veranschaulichung zeitlicher Aspekte wurden zusätzlich erschwerende Randbedingungen bei außerhalb von Gebäuden erforderlichen Handmaßnahmen im Szenario betrachtet. Solche erschwerenden Randbedingungen können insbesondere durch Einwirkungen von außen, wie Wind, Regen, Hitze oder Glätte, verursacht werden und verlangsamen die Bewegung außerhalb von Gebäuden bzw. erhöhen die Fehlerwahrscheinlichkeit von Handmaßnahmen, da von einem erhöhten Stressniveau der handelnden Personen auszugehen ist. So ist beispielsweise das Gehen im Freien ab einer Windstärke von 17 m/s nur noch eingeschränkt möglich. Eine entsprechende Windstärke führt allerdings zu keinem auslösenden Ereignis.

6.1 Vergleich der klassischen PSA-Programme RiskSpectrum® und SAPHIRE

RiskSpectrum® und SAPHIRE sind beides klassische PSA-Programme mit ähnlichen Vorgehensweisen in der Modellierung, Berechnung und Auswertung von PSA-Modellen. Kleinere Unterschiede gibt es dabei jedoch zwischen den beiden Programmen in der Unterscheidung der Ereignis-Typen (Basic Event, House Event, etc.), der Benutzung von Sonderzeichen in Bezeichnungen von Objekten sowie bei der Vielfalt an Typen von Wahrscheinlichkeitsverteilungen.

Die Programmauswahl für ein neues PSA-Modell kann von unterschiedlichen Faktoren abhängen. Dabei spielen vor allem die bisherigen Erfahrungen der Nutzer, die Komplexität und der Umfang der zu erstellenden PSA, der gewünschte (dauerhafte) Zugang auf die Daten bzw. die Datenbankstruktur, sowie die geplante Verbreitung des PSA-Modells eine Rolle. RiskSpectrum® bietet im Vergleich zu SAPHIRE eine größere Funktionsvielfalt und eignet sich eher für komplexe PSA-Aufgaben. SAPHIRE hingegen ist für Dritte leichter zugänglich und ermöglicht einen uneingeschränkten Zugang auf die Datenbankstruktur (RiskSpectrum® bisher auch, der Hersteller schließt aber mögliche Änderungen nicht aus). Zusammenfassend haben RiskSpectrum® und SAPHIRE beide Vor- und Nachteile, die im Einzelfall für die Programmauswahl entscheidend sein können.

Das für das Szenario bereits vorhandene klassische PSA-Modell von RiskSpectrum® wurde mithilfe des GRS-Analysewerkzeugs pyRiskRobot automatisiert in SAPHIRE übertragen und dabei alle Sequenzen bis zum Kernschaden einbezogen. Dazu wurde pyRiskRobot im Rahmen des Vorhabens 4721R01530 erweitert und konnte nach dieser Erweiterung über 2.700 Basisereignisse, ihre Parameter und über 800 Fehlerbäume automatisiert übertragen. Somit verblieben nur noch die beiden Ereignisbäume des Szenarios als auch die Exchange Events zur Modellierung der erschwerenden Randbedingungen für eine manuelle Ergänzung. Das Verhältnis zwischen automatisierter und manueller Übertragung macht deutlich, dass pyRiskRobot entsprechende Arbeiten ganz erheblich unterstützen kann, zumal die Übertragung frei von Tippfehlern durchgeführt wird.

Für eine vollständige Übertragung von PSA-Modellen sind aber noch weitere Entwicklungsschritte nötig, die in naher Zukunft erfolgen sollen. Unabhängig von den letzten notwendigen Erweiterungen von pyRiskRobot kann das Werkzeug den Anwender bereits bei einem erforderlichen Wechsel des PSA-Programms zwischen RiskSpectrum® und SAPHIRE (in beiden Richtungen) erheblich unterstützen.

Ein zentraler Aspekt bei einem Programmwechsel ist, dass beide Programme mit den gleichen Eingangsdaten auch zu den gleichen Ergebnissen führen. Dies konnte im hier durchgeführten Vergleich der beiden klassischen PSA-Modelle gezeigt werden. Sowohl RiskSpectrum® als auch SAPHIRE führten nicht nur zum gleichen Endergebnis, sondern auch zu gleichen Minimalschnitten, gleichen Beiträgen der Minimalschnitte, gleichen Ergebnissen der Importanzanalysen sowie zu gleichen Ergebnissen der Unsicherheitsanalysen. Der Modellvergleich lässt damit zwei Schlussfolgerungen zu: zum einen berechnen RiskSpectrum® wie auch SAPHIRE die gleichen Ergebnisse (zumindest mit dem

getesteten Modell), zum anderen wurden bei der Übertragung des PSA-Modells von RiskSpectrum® in SAPHIRE mittels pyRiskRobot keine Fehler beobachtet, pyRiskRobot kann daher einen Wechsel des PSA-Codes erheblich unterstützen.

6.2 Vergleich zwischen dynamischem PSA-Modell und klassischen PSA-Modellen

Eine dynamische Modellierung von Prozessabläufen und vielfältigen Abhängigkeiten zwischen Faktoren im Ereignisablauf ermöglicht eine deutlich flexiblere Modellierung von Ereignisabläufen, als es mit klassischen PSA-Programmen der Fall ist. Diese zusätzlichen Modellierungsmöglichkeiten erfordern zusätzliche Eingangsinformationen in das dynamische PSA-Modell und verursachen eine größere Komplexität des Modells.

Das mittels der klassischen PSA-Codes modellierte Szenario der anlageninternen Überflutung des Reaktorgebäude-Ringraums wurde mit MCDET und dem Crew-Modul bis zum Endzustand 'Ringraum überflutet' nachmodelliert, um die klassischen Methoden mit der dynamischen PSA-Methode vergleichen zu können. Aufgrund der flexibleren Modellierungsmöglichkeiten wurden bei der dynamischen Modellierung zwei zusätzliche Handlungsblöcke in den Ereignisablauf integriert. Diese Handlungsblöcke stellen Ersatzmaßnahmen für den Ausfall von Systemfunktionen dar, die im klassischen PSA-Modell direkt zur Überflutung des Ringraums führen (Ausfall der Meldung der Überflutung, Ausfall der Diagnose der Überflutung). Die Ersatzmaßnahmen sind im dynamischen PSA-Modell möglich bzw. ergeben sich aus der Methode, da zeitliche Betrachtungen im Vordergrund stehen. Demzufolge muss beispielsweise eine falsche Diagnose nicht zur Überflutung führen, sondern es können im dynamischen PSA-Modell weitere Maßnahmen angenommen werden. Aufgrund der zeitlichen Betrachtung ist es jedoch auch möglich, dass die Absperrung des Feuerlöschsystems zwar erfolgreich, aber zu spät durchgeführt wird, sodass der Ringraum dennoch überflutet wird. Aufgrund der Randbedingungen im Szenario sind jedoch ausreichende Zeitreserven im Handlungsablauf vorhanden, so dass der Beitrag einer zu späten Absperrung vernachlässigt werden kann.

Die zusätzlichen Möglichkeiten bei der Modellierung mit Methoden der dynamischen PSA ermöglichen es somit, in klassischen PSA-Methoden unerkannte Ereignisabläufe zu identifizieren. Am Beispiel der anlageninternen Überflutung konnte dies für zwei Aspekte gezeigt werden. Die zusätzlichen Handlungsblöcke der zweiten Meldung und der zweiten Diagnose können in den klassischen PSA-Modellen nicht modelliert werden.

Aufgrund der großen Zeitreserven im Handlungsablauf ist es aber durch deren Modellierung möglich, die Wahrscheinlichkeit einer Überflutung des Ringraums ganz erheblich zu senken. Grund hierfür ist, dass der Ausfall der Diagnose (Hauptbeitrag im klassischen PSA-Modell) kompensiert werden kann. Des Weiteren ist es mit dem dynamischen PSA-Modell möglich, Ereignisabläufe mit einer verspäteten Absperrung zu identifizieren. Unter den angenommenen erschwerenden Randbedingungen durch extreme Wetter- bzw. Witterungsbedingungen sind die Ereignisabläufe mit verspäteter Absperrung nicht relevant, was die Annahmen in den klassischen PSA-Modellen bestätigt. Wäre das kritische Volumen zur Schädigung der Nachkühlpumpen um 25 m^3 geringer, würde allerdings die Überflutungswahrscheinlichkeit durch eine verspätete Absperrung des Feuerlöschsystems etwa 20 % der Ausfallwahrscheinlichkeit der Absperrung betragen. Ähnliches gilt auch für Verzögerungen durch erschwerende Randbedingungen für Handmaßnahmen. Entsprechende Effekte hätten einen deutlichen Einfluss auf die gesamte Überflutungswahrscheinlichkeit, wenn die erste Diagnose den Ereignisablauf nicht dominieren würde.

Weiterhin können mit dynamischen PSA-Methoden Kipp-Effekte identifiziert werden. Zwar ist im untersuchten Szenario kein klassischer Kipp-Effekt vorhanden, in dem sich von einem Moment auf den anderen der Anlagenzustand signifikant verschlechtert, da das Wasser im Ringraum stetig steigt. Es wurde jedoch ein nicht erwarteter Kipp-Effekt entdeckt, dass sich die spezifische Überflutungswahrscheinlichkeit nach erfolgreicher Absperrung um das 215-fache erhöht (von $4,71 \text{ E-}09$ auf $1,01 \text{ E-}06$), wenn das kritische Wasservolumen bis zur Schädigung der Nachkühlpumpen (1.274 m^3) nur um 25 m^3 kleiner wäre. Eine systematische Zeitverzögerung im Handlungsablauf von 3 min, beispielsweise durch eine spätere Meldung, hat einen vergleichbaren Effekt. Ein entsprechender Kipp-Effekt kann im klassischen PSA-Modell nicht identifiziert werden.

Mit diesen Eigenschaften und Möglichkeiten ergeben sich folgende Einsatzmöglichkeiten für dynamische PSA-Methoden mit einer höheren Aussagesicherheit der Analysen:

- Methoden der dynamischen PSA lassen sich generell in Sensitivitätsanalysen von Ereignisabläufen mit erwartbar hohem Schadenspotenzial und bei außerhalb von Gebäuden durchzuführenden Handmaßnahmen, insbesondere unter Berücksichtigung erschwerender Randbedingungen einsetzen.
- Die Nutzung von Methoden der dynamischen PSA ist bei der Planung von Notfallmaßnahmen sinnvoll, da hier zeitliche Abläufe, alternative Handlungsabläufe bzw.

Handlungsoptionen und zeitabhängige Schäden einen erheblichen Einfluss haben können.

- Methoden der dynamischen PSA ermöglichen einen Vergleich der Wirksamkeit von Handmaßnahmen und automatisierten Maßnahmen (Anlagenphilosophie).
- Methoden der dynamischen PSA können zudem bei der Analyse der Widerstandfähigkeit eines Systems (Wiederherstellbarkeit bzw. Weiterbetrieb des Systems nach dem Ausfall von Teilsystemen) angewendet werden, da hier häufig zeitliche Aspekte zu betrachten sind.
- Einem in einer dynamischen Analyse identifizierten Kipp-Effekt kann anschließend durch zusätzliche Maßnahmen vorgebeugt werden.

Da klassische PSA-Modelle ein breiteres Anwendungsspektrum haben und weniger aufwändig als eine dynamische Modellierung sind, lassen sich die Ergebnisse für ausgewählte Ereignisabläufe aus den dynamischen PSA-Modellen in die klassischen PSA-Modelle übertragen. Dafür müsste beispielsweise ein zeitabhängiger, kontinuierlich verlaufender Parameter mit diskreten Parametern in das klassische PSA-Modell integriert werden, z. B. mit den Funktionsereignissen „frühe Diagnose“, „normale Diagnose“, „späte Diagnose“ für zeitabhängige Ausfallwahrscheinlichkeiten der Diagnose. Ein Beispiel für die Identifikation maßgeblicher dynamischer Sequenzen im Ereignisablauf und der entsprechenden nachträglichen Erweiterung der Ereignisbäume des klassischen PSA-Modells ist in /MAN 19/ dargestellt. Entsprechende Ansätze sind bisher allerdings noch nicht weit verbreitet.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Ergebnisse dieses Vorhabens 4721R01530 die internationalen Erkenntnisse unterstützen, dass sich der Einsatz dynamischer PSA-Methoden zunehmend bei Untersuchungen spezifischer dynamischer Wechselwirkungen und Phänomene in ausgewählten Szenarien einsetzen und sich die Ergebnisse entsprechender Studien zur Verbesserung der Sicherheit kerntechnischer Anlagen, beispielsweise durch die Änderung von Prozeduren nutzen lassen. Potenziellen Anwendern von Modellen der dynamischen PSA ist bewusst, dass in diesem Zusammenhang mehr Details zu den Bedürfnissen und Erwartungen der Entscheidungsträger in Bezug auf sinnvolle Anwendungsgebiete, die erforderliche Datenqualität, die Modellvalidierung sowie die Zielsetzung der Analysen hilfreich wären. Entsprechende internationale Leitfäden sollten in der näheren Zukunft entwickelt werden.

Literaturverzeichnis

- /AYO 22/ Ayoub, A., et al.: Generic and adaptive probabilistic safety assessment models: Precursor analysis and multi-purpose utilization, Nuclear Engineering and Technology 54, S. 2924-2932, 2022.
- /BER 17/ Berner, N., J. Herb: Weiterentwicklung der Methodik zur automatisierten Integration übergreifender Einwirkungen in PSA-Modelle der Stufe 1, Technischer Fachbericht, GRS-454, ISBN 978-3-946607-36-6, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln, März 2017, <https://www.grs.de/index.php/de/aktuelles/publikationen/grs-454-weiterentwicklung-der-methodik-zur-automatisierten-integration>.
- /BER 21/ Berchtold, F., et al.: Einsatz dynamischer Simulationsmethoden für die Analyse von Notfallmaßnahmen bei erschwerenden Randbedingungen infolge übergreifender Einwirkungen, Technischer Fachbericht / Technical Report, GRS-636, ISBN 978-3-949088-25-4, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln, September 2021, <https://www.grs.de/de/aktuelles/publikationen/grs-636>.
- /DWD 24/ Deutscher Wetterdienst (DWD): Übersicht zu besonderen Wetterereignissen, https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/stuerme/download_tabelle.html, zuletzt abgerufen am 28.05.2024.
- /EPR 13/ Electric Power Research Institute (EPRI): Pipe Rupture Frequencies for Internal Flooding Probabilistic Risk Assessments, EPRI 3002000079, Revision 3. EPRI, Palo Alto, CA, 2013.
- /GON 21/ Gonzalez, M., N. Siu: Using Operational Experience to Support Dynamic PRA Activities, Paper in: Proceedings of ANS PSA 2021, International Topical Meeting on Probabilistic Safety Assessment and Analysis, Columbus, OH, USA, November 7 – 11, 2021, on CD-ROM, American Nuclear Society, LaGrange Park, IL, USA, November 2021.

- /IAE 24/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants, Specific Safety Guide, IAEA Safety Standards Series No. SSG-3, Rev. 1, STI/PUB/2056, ISBN 978-92-0-130723-1, Wien, März 2024, <https://doi.org/10.61092/iaea.3ezv-lp4>.
- /INL 22/ Idaho National Laboratory (INL): Systems Analysis Programs for Hands-on Integrated Reliability Evaluations (SAPHIRE) Version 8.2.9 – User’s Guide (code-internal documentation), Idaho Falls, ID, USA, 2022.
- /KKW 09/ Kernkraftwerksbetreiber der Referenzanlage: Sicherheitsstatusanalyse für die Referenzanlage, Anlagenstandort, 2009.
- /KKW 12/ Kernkraftwerksbetreiber der Referenzanlage: SÜ – Referenzanlage 1999-2008 – Kapitel 4 Probabilistische Sicherheitsanalyse – 4.1 Leistungsbetrieb, revidierte Dokumentation zur Sicherheitsüberprüfung, Anlagenstandort, März 2012.
- /KKW 16/ Kernkraftwerksbetreiber der Referenzanlage: Robustheitsanalyse für die Referenzanlage bezüglich der Überflutung des Reaktorgebäude-Ringraums, Anlagenstandort, 2016.
- /KLO 06/ Kloos, M., J. Peschke: MCDET – A Probabilistic Dynamics Method Combining Monte Carlo Simulation with the Discrete Dynamic Event Tree Approach, Nuclear Science and Engineering, 153, S. 137-156, 2006.
- /KNF 20/ KNF Consulting Services LLC: Guidelines for Performance of Internal Flooding Probabilistic Risk Assessment 1019194 Final Report, Electric Power Research Institute (EPRI), Palo Alto, CA, USA, Dezember 2009, Update and Erratum, EPRI, Palo Alto, CA, USA, August 2020.
- /MAI 17/ Di Maio, F., et. al.: Safety margin sensitivity analysis for model selection in nuclear power plant probabilistic safety assessment, Reliability Engineering and System Safety 162, S. 122-138, 2017.

- /MAN 19/ Mandelli, D., et. al.: Mutual Integration of Classical and Dynamic PRA, in: Proceedings of ANS PSA 2019 International Topical Meeting on Probabilistic Safety Assessment and Analysis, Charleston, SC, USA, April 27 – May 3, 2019, on CD-ROM, American Nuclear Society, LaGrange Park, IL, USA, 2019.
- /MAY 20/ Mayer, G., et al.: Vervollständigung von Methoden für PSA der Stufe 1 für Ereignisse und Ereigniskombinationen übergreifender Einwirkungen, Technischer Fachbericht, GRS-A-4012, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln, Oktober 2020.
- /NEA 16/ Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) Nuclear Energy Agency (NEA), Committee on the Safety of Nuclear Installations (CSNI): Combinations of Fires and Other Events – The Fire Incidents Records Exchange Project Topical Report No. 3, NEA/CSNI/R(2016)7, Paris, Juli 2016, <http://www.oecd-nea.org/documents/2016/sin/csni-r2016-7.pdf>.
- /PAR 21/ Park, J. W., S.J. Lee: Dynamic PSA Framework with Optimization Algorithm applied to a Large LOCA Scenario, Paper in: Proceedings of ANS PSA 2021, International Topical Meeting on Probabilistic Safety Assessment and Analysis, Columbus, OH, USA, November 7 – 11, 2021, on CD-ROM, American Nuclear Society, LaGrange Park, IL, USA, November 2021.
- /PES 14/ Peschke, J., et al.: Methodenentwicklung zur Analyse von Personalhandlungen im Rahmen probabilistischer Dynamikanalysen am Beispiel von Brandereignisabläufen mit Brandbekämpfung, GRS-331, ISBN 978-3-944161-11-2, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, Juni 2014, <https://www.grs.de/de/aktuelles/publikationen/grs-331-methodenentwicklung-zur-analyse-von-personalhandlungen-im-rahmen>.

- /PES 18/ Peschke, J., et al.: MCDET – Methode zur Integralen Deterministisch-Probabilistischen Sicherheitsanalyse, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), GRS-520, ISBN 978-3-947685-05-9, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln, September 2018, <https://www.grs.de/de/aktuelles/publikationen/grs-520-mcde-methode-zur-integralen-deterministisch-probabilistischen>.
- /PRA 21/ Prasad, M., et al.: Dynamic PSA Studies for Advanced Reactor Using RAVEN, Paper in: Proceedings of ANS PSA 2021, International Topical Meeting on Probabilistic Safety Assessment and Analysis, Columbus, OH, USA, November 7 – 11, 2021, on CD-ROM, American Nuclear Society, LaGrange Park, IL, USA, November 2021.
- /RIS 22/ RiskSpectrum AB: RiskSpectrum® Analysis Tool – Theory Manual, Version 3.5.6, Solna, Schweden, 2022.
- /RIS 24/ RiskSpectrum®: Software RiskSpectrum PSA, <https://www.riskspectrum.com/riskspectrum-psa>.
- /ROE 17/ Röwekamp, M., et al.: Methoden zur Bestimmung des standort- und anlagenspezifischen Risikos eines Kernkraftwerks durch übergreifende Einwirkungen / Estimation of the Site and Plant Specific Risk of a Nuclear Power Plant from Hazards, Technischer Fachbericht / Technical Report, GRS-A-3888, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln, Juni 2017.
- /ROE 20/ Röwekamp, M., et al.: Vervollständigung von Methoden und Werkzeugen für Probabilistische Sicherheitsanalysen (PSA), Technischer Bericht (Completion of Methods and Data for Probabilistic Safety Analyses (PSA), Technical Report), GRS-610, ISBN 978-3-947685-96-7, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln, Oktober 2020, <https://www.grs.de/publikationen/grs-610>.

- /SMI 11/ Smith, C. L., S. T. Wood: Systems Analysis Programs for Hands-on Integrated Reliability evaluations (SAPHIRE) Version 8 – Volume 1: Overview and Summary, NUREG/CR-7039, Volume 1, United States Nuclear Regulatory Commission (NRC), 7039, Vol. 1, Idaho National Laboratory, Idaho Falls, ID, USA., 2011. Office of Nuclear Regulatory Research, Washington, EC, USA, 2011, <https://www.nrc.gov/docs/ML1119/ML11195A298.pdf>.
- /STR 20/ Strack, G., M. Röwekamp: Hazards Screening Tool (HST) – Users Guide – Hazards Screening Tool (HST), Technische Notiz / Technical Note, GRS – V – RS1556 - 1/2020, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln, Oktober 2020.
- /STR 21/ Strack, C., G. Thuma, M. Röwekamp: Recent Developments in the Assessment of Hazard Combinations, Paper 104, EUROSAFE, Forum 2021, Paris, November 22-23, 2021, <https://www.etson.eu/eurosafe>.
- /STR 24/ Strack, C., A. Bücherl, M. Röwekamp: Hazards Screening Tool, Users Guide, Revision 1, Technische Notiz, GRS – V – RS1596 - 1/2024, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln, Oktober 2024.
- /SWA 83/ Swain, A. D., H. E. Guttmann: Handbook on Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications, Final Report, NUREG/CR-1278, United States Nuclear Regulatory Commission (NRC), Washington, DC, USA, August 1983.
- /WOL 21/ Wolfgang, R. J., S. Falvo: Implementation of Methodology for Maintenance-Induced Internal Floods, Paper in: Proceedings of ANS PSA 2021, International Topical Meeting on Probabilistic Safety Assessment and Analysis, Columbus, OH, USA, November 7 – 11, 2021, on CD-ROM, American Nuclear Society, LaGrange Park, IL, USA, November 2021.

/ZHA 21/ Zhao, Y., M. Zhu, M., C. Smidts: Data Post-Processing for Dynamic Probabilistic Risk Assessment, Paper in: Proceedings of ANS PSA 2021, International Topical Meeting on Probabilistic Safety Assessment and Analysis, Columbus, OH, USA, November 7 – 11, 2021, on CD-ROM, American Nuclear Society, LaGrange Park, IL, USA, November 2021.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Vorgehen bei der Entwicklung einer PSA der Stufe 1 für anlageninterne Überflutungen, aus /IAE 24/.....	11
Abb. 3.1	Schematische Darstellung des Reaktorgebäude-Ringraums sowie der relevanten Streckenschieber (STS) des Feuerlöschsystems	26
Abb. 4.1	Gegenüberstellung des dynamischen und des klassischen Handlungsablaufes zur Modellierung des Szenarios.....	34
Abb. 4.2	Ereignisbaum S50-R1530DYN des Szenarios bis zur Ringraumüberflutung IF im klassischen PSA-Modell von RiskSpectrum®.....	34
Abb. 4.3	Ereignisbaum S50-R1530DYN des Szenarios im klassischen PSA-Modell von SAPHIRE.....	35
Abb. 4.4	Fehlerbaum bzgl. der Systemfunktion 'LE50' im Programm RiskSpectrum®.....	37
Abb. 4.5	Fehlerbaum hinter der Systemfunktion 'OP_S50-DI' im PSA-Programm RiskSpectrum®	38
Abb. 4.6	Fehlerbaum bzgl. der Systemfunktion AS501 im Programm RiskSpectrum®.....	41
Abb. 4.7	Fehlerbaum zum Absperren des Streckenschiebers und der Ringleitung im Programm RiskSpectrum®.....	42
Abb. 4.8	Ereignisbaum S50A des Szenarios nach der Ringraumüberflutung IF im klassischen PSA-Modell von RiskSpectrum®	44
Abb. 4.9	Ereignisbaum S50A des Szenarios nach der Ringraumüberflutung IF im klassischen PSA-Modell von SAPHIRE.....	44
Abb. 4.10	Fehlerbaum und zugehöriges Basisereignis bzgl. der Systemfunktion 'OP_ABF_S50' im Programm RiskSpectrum®	45
Abb. 4.11	Fehlerbaum und zugehöriges Basisereignis hinter der Systemfunktion 'LB_S50' im Programm RiskSpectrum®	45
Abb. 4.12	Fehlerbaum bzgl. der Systemfunktion 'LA' im Programm RiskSpectrum®.....	46
Abb. 4.13	Fehlerbaum hinter der Systemfunktion 'SDE' im Programm RiskSpectrum®.....	47

Abb. 4.14	Mittels pyRiskRobot automatisiert von RiskSpectrum® in SAPHIRE übertragener Fehlerbaum bzgl. der Systemfunktion 'LE50'	48
Abb. 4.15	Einbindung der erschwerenden Randbedingungen in den Fehlerbaum OP_S50 von SAPHIRE (in diesem Fall wird die Bezeichnung FUNKTIONOP_S50_EVA verwendet)	49
Abb. 4.16	Einbindung der erschwerenden Randbedingungen in den Fehlerbaum P-SGA-10 von SAPHIRE	50
Abb. 4.17	Mindmap als Eingabedatei für das dynamische PSA-Modell im Crew-Modul; die Pfeile '>>' sind Querverweise zu den Nummern 1, 2, 3, 4 bzw. zu anderen Handlungsblöcken, die in der Mindmap selbst nicht dargestellt sind, die beiden roten Blöcke rechts oben sind die Endzustände E-0 und E-1	52
Abb. 5.1	Ergebnisse der Unsicherheitsanalysen in RiskSpectrum®	63
Abb. 5.2	Ergebnisse der Unsicherheitsanalysen in SAPHIRE	63
Abb. 5.3	Ringraumüberflutung in RiskSpectrum®	63
Abb. 5.4	Ringraumüberflutung in SAPHIRE	63
Abb. 5.5	Kernschadenzustand in RiskSpectrum®	64
Abb. 5.6	Kernschadenzustand in SAPHIRE	64
Abb. 5.7	Ergebnisse der Importanzanalyse für den Kernschadenzustand und beide klassischen PSA-Modelle	69
Abb. 5.8	Komplementäre kumulative Wahrscheinlichkeitsverteilung des ausgetretenen Wasservolumens nach erfolgter Absperrung (E-1) unter Voraussetzung der unterschiedlichen Varianten für normale Randbedingungen (links) und erschwerender Randbedingungen (rechts)	80
Abb. 5.9	Komplementäre kumulative Wahrscheinlichkeitsverteilung der ausgetretenen Wasservolumen (alle Varianten) für normale und erschwerende Randbedingungen und erschwerende Randbedingungen bei einer Dauer für die Diagnose D1 von 60 min	83
Abb. 5.10	Spezifische Überflutungswahrscheinlichkeit nach erfolgreicher Absperrung ohne Unterscheidung in Varianten (links: unter normalen Randbedingungen; rechts: unter erschwerenden Randbedingungen)	84

Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1	Ausfälle von Komponenten in Abhängigkeit der Überflutungshöhe und dem kritischen Wasservolumen im Ringraum, nach /KKW 16/.....	27
Tab. 3.2	Systemfunktionen für das Szenario aus /ROE 17/	28
Tab. 3.3	Auswahl an besonderen Wettersituationen mit Stürmen (Beaufortskala 9 oder größer) über Deutschland im Zeitraum 2017 bis 2020 /DWD 24/.....	31
Tab. 3.4	Auswahl an besonderen Wettersituationen zusammen mit Stark- und Dauerniederschlägen über Deutschland im Zeitraum 2017-2024 /DWD 24/	31
Tab. 4.1	Epistemische Unsicherheiten im dynamischen PSA-Modell.....	52
Tab. 5.1	Gegenüberstellung von RiskSpectrum® und SAPHIRE in Bezug auf ihre Einsatzmöglichkeiten	56
Tab. 5.2	Unterschiedliche Modellierung von Objekten in RiskSpectrum® und SAPHIRE.....	58
Tab. 5.3	Vergleich der Typen von Wahrscheinlichkeitsverteilungen in den klassischen PSA-Programmen	59
Tab. 5.4	Übertragungsregeln von pyRiskRobot für Sonderzeichen in Namen von RiskSpectrum® nach SAPHIRE	60
Tab. 5.5	Bezeichnung der Untersuchungen in den klassischen PSA-Modellen.....	61
Tab. 5.6	Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeiten der beiden Endzustände in den jeweiligen Untersuchungen mit den beiden klassischen PSA-Programmen RiskSpectrum® (RISP) und SAPHIRE (SAP)	62
Tab. 5.7	Alle Minimalschnitte zum Endzustand Ringraumüberflutung (normale Randbedingungen) aus RiskSpectrum®	66
Tab. 5.8	Alle Minimalschnitte zum Endzustand Ringraumüberflutung (normale Randbedingungen) aus SAPHIRE	66
Tab. 5.9	Die 15 obersten Minimalschnitte zum Kernschadenzustand unter erschwerenden Randbedingungen aus RiskSpectrum®	67
Tab. 5.10	Detaillierte Gegenüberstellung aller Eingangsvariablen des klassischen (K) und des dynamischen (D) PSA-Modells.....	73

Tab. 5.11	Bedingte Wahrscheinlichkeit für Endzustand 'Überflutung Ringraum (IF)' bei nicht erfolgter Absperrung (E-0) und erfolgter Absperrung (E-1).....	75
Tab. 5.12	Übersicht über die betrachteten Varianten des Handlungsablaufes im dynamischen PSA-Modell mit der entsprechenden Sequenz mit Endzustand IF in Abb. 4.2.....	76
Tab. 5.13	Vergleich der bedingten Überflutungswahrscheinlichkeit für alle Varianten im dynamischen und klassischen PSA-Modell bei normalen Randbedingungen.....	76
Tab. 5.14	Vergleich der bedingten Überflutungswahrscheinlichkeit für alle Varianten im dynamischen und klassischen PSA-Modell bei erschwerenden Randbedingungen	79
Tab. 5.15	Spezifische Überflutungswahrscheinlichkeit unter Voraussetzung der Variante A und E-1 zur Verdeutlichung der Sensitivität zum kritischen Wasservolumen.....	81
Tab. 5.16	Spezifische Überflutungswahrscheinlichkeit unter Voraussetzung der Varianten A bis D bei erfolgreicher Absperrung E-1 im Vergleich zwischen normalen und erschwerenden Randbedingungen	82

Abkürzungsverzeichnis

AHWR	Advanced Heavy Water Reactor
ALW	Anlagenwärter
ATHLET	Analysis of Thermal Hydraulics of Leaks and Transients
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
CDF	core damage frequency (deutsch: Kernschadenshäufigkeit)
DPSM	dynamic probabilistic sensitivity margin
DWD	Deutscher Wetterdienst
DWR	Druckwasserreaktor
EF	Error Factor
EPRI	Electric Power Research Institute
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule
FaSTPro	Fast Source Term Prognosis
fdf	fuel damage frequency (deutsch: Brennstabschadenshäufigkeit)
FV	Fussel-Vessely
FW	Feuerwehr
GES	Gebäudeeintrittsschieber
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH
GVA	gemeinsam verursachter Ausfall
HST	Hazards Screening Tool
IDPSA	integrale deterministisch-probabilistische Sicherheitsanalyse
IAEA	International Atomic Energy Agency
INL	Idaho National Laboratory
ISS	<i>International Space Station</i>
KMV	Kühlmittelverluststörfall (Englisch: loss of coolant accident, LOCA)
MCDET	Monte Carlo Dynamic Even Tree
NASA	National Aeronautics and Space Administration (deutsch: Nationale Aeronautik- und Raumfahrtbehörde)
NRC	Nuclear Regulatory Commission
PSA	Probabilistische Sicherheitsanalyse
PWR	Pressurised Water Reactor
RAVEN	Reactor Analysis and Virtual Control Environment
RDF	Risk Decrease Factor
RELAP	Reactor Excursion and Leak Analysis Program

RIF	Risk Increase Factor
SAPHIRE	Systems Analysis Programs for Hands-on Integrated Reliability
SBO	Station Black-out
SL	Schichtleiter
SLOCA	Kühlmittelverlust an einer Dichtung
SL-SV	Schichtleiter-Stellvertreter
SSC	Bauliche Anlagenteile, Systeme und Komponenten (englisch: structures, systems and components)
STS	Streckenschieber

A Anhang: Szenario „Leckage des Feuerlöschsystems SGB im Ringraum“

A.1 I: Eingangereignis

Zeitpunkt	Ereignis	Personalhandlung	Erläuterungen
T = 0	Bruch einer Löschwasserleitung des Feuerlöschsystems SGB zwischen Reaktorgebäudeeintritt und Absperrarmatur <ul style="list-style-type: none"> • angenommene Eintrittshäufigkeit: 1/a Wasser strömt aus der betroffenen Löschwasserleitung in den Ringraum (Quadrant 1 oder 3) <ul style="list-style-type: none"> • Ausflussrate von Wasser aus der Leckage: $dV \sim U(135,145) \text{ kg/s}$ Füllstand im betroffenen Quadranten steigt an		Der Bruch kann eine von zwei Löschwasserleitungen betreffen <ul style="list-style-type: none"> • Wahrscheinlichkeit dafür, welche Löschwasserleitung es trifft: $p = 0,5$ • Je nach Löschwasserleitung strömt Wasser <u>entweder</u> in den Quadranten Q1 <u>oder</u> in den Quadranten Q3 des Ringraums Die Ausflussrate entspricht etwa 500 m ³ /h durch die Einspeisung der Wasserhaltungspumpen UC03/04D001 /KKW 12/, Abschnitt 4.3.3.3.4. Dieser Wert ist abdeckend zu den Feuerlöschwasserpumpen.
+ U(2,4) s	Der Druck in der betroffenen Löschwasserleitung fällt auf den Grenzwert G, deshalb <ul style="list-style-type: none"> • Kriterium für den automatschen Start der vier Feuerlöschwasserpumpen steht an. • Es erfolgt eine akustische Meldung in der Warte. 		Die Meldung beim Anlaufen der Feuerlöschwasserpumpen wird nicht im Handlungsablauf berücksichtigt. Dies entspricht der Modellierung in /KKW 12/, Abschnitt 4.3.3.3.4
	weiter → M-1		

A.2 M-1: Sumpfmeldung / Reaktorschutzmeldung steht an

Zeitpunkt	Ereignis	Personalhandlung	Erläuterungen
t_Sumpf siehe Erläuterung	Die Sümpfe des betroffenen Quadranten sind zum Zeitpunkt t_Sumpf (entweder Quadrant 1 oder 3) vollständig befüllt, die Grenzwerte für die Sumpfmeldungen „L1 hoch“ und „L2 hoch“ wurden kurz hintereinander überschritten		Zeitpunkt t_Sumpf abhängig vom betroffenen Quadranten 1 oder 3 (dV siehe Tabelle zu Eingangsereignis): <ul style="list-style-type: none"> t_Sumpf = 10,2 m³ / (dV/1000) bei Quadrant 1 t_Sumpf = 6,0 m³ / (dV/1000) bei Quadrant 3 Größenordnungen: <ul style="list-style-type: none"> Quadrant 1: zwischen 70 s und 75 s Quadrant 3: zwischen 40 s und 45 s
t_KMA siehe Erläuterung	Der Wasserstand im Ringraum erreicht eine Höhe von 0,26 m. Der Grenzwert für die notstandssichere Verriegelung (KMA-Meldung) wird überschritten.		Zeitpunkt der KMA-Meldung: t_KMA = 480 m ³ / (dV/1000) Größenordnungen: t_KMA zwischen 3.310 s und 3.560 s (ca. 55 min bis 60 min)
T = T_Meldung	Die erste der Meldungen („L1 hoch“ und „L2 hoch“ oder die KMA-Meldung) wird angezeigt. Die Ausfallwahrscheinlichkeit einer Anzeige der Sumpf- oder KMA-Meldungen beträgt 1 E-04, siehe Erläuterung. Hier wird nicht vom Ausfall der Meldung ausgegangen, sondern vom Ausfall der Anzeige der Meldung, da diese eine deutlich größere Ausfallwahrscheinlichkeit hat.		Die Anzeigen sind den Quadranten zugeordnet. Es steht somit eindeutig fest, welcher Quadrant betroffen ist. Ausfallwahrscheinlichkeit für jede Anzeige der Sumpf- bzw. KMA-Meldung ist: <ul style="list-style-type: none"> Verteilungstyp: Lognormal Mittelwert: 1 E-04 1. Verteilungsparameter: 3 Diese entspricht den Parametern „L-JNA.0CL8..-SCHN“ und „L-KTG..CL00.-SCHN“ im PSA-Modell. T_Meldung = min (t_Sumpf, t_KMA) mit <ul style="list-style-type: none"> falls Ausfall Sumpfmeldung: t_Sumpf = 99999 s, sonst wie oben falls Ausfall „KMA“: t_KMA = 99999 s, sonst wie oben

Zeitpunkt	Ereignis	Personalhandlung	Erläuterungen
	Verzweigung <ul style="list-style-type: none"><li data-bbox="414 347 996 411">• T_Meldung = 99999 s (beide Meldungen ausgefallen) → M-2<li data-bbox="414 419 996 483">• sonst (mindestens eine Meldung nicht ausgefallen) → D-1		

A.3 D-1: Diagnose nach Sumpf- oder Reaktorschutzmeldung

Zeitpunkt	Ereignis	Personalhandlung	Erläuterungen
T = Ende(M-1) oder T = Ende(M-2) + U(5,30) s		SL und SLV-1 bemerken die anstehenden Anzeigen und Meldungen und quittieren sie.	Bei Ereignissen hat eine SLV (hier die SLV-1) die Aufgabe, den Zustand der Anlage fortlaufend zu kontrollieren. Sie geht die Pulte und Tafeln ab und kontrolliert die anstehenden Informationen. Sie kann sich irgendwo in der Warte befinden.
+ U(120-150) s		Der SLV-1 kontrolliert die Anzeigen des Sumpfes / Quadranten und stellt fest, dass sich Flüssigkeit im Sumpf bzw. Quadrant befindet. Der SLV-1 kontrolliert die weiteren Anzeigen, die für den Ist-Zustand des Ringraums wichtig sind: Aktivität und Temperatur. Er stellt fest, dass die Flüssigkeit im Sumpf / Ringraum mit einer Störung zu tun haben muss. Er prüft vorsichtshalber Anzeigen, mit denen er ein Leck im Primärkreis ausschließen kann.	Geringe Plausibilität für den Fehler, dass der SLV-1 die Kontrolle unterlässt. Er steht nach dem Quittieren schon vor den Anzeigen und seine Aufmerksamkeit wird durch keine andere Aufgabe abgelenkt.
+ U(60,150) s		Der SLV-1 geht zum SL und meldet dem SL den Ist-Zustand des Ringraums. Evtl. muss der SLV-1 warten, bis der SL seine laufende Tätigkeit beendet hat, so dass er für den SLV-1 frei ist. Die Wartezeit ist im angegebenen Zeitintervall enthalten.	
+ U(2,3) min		SL und SLV-1 beraten über die möglichen Ursachen des Füllstand-Anstiegs. <ul style="list-style-type: none"> • Sie schließen ein Leck im Primärkreis aus. • Sie gehen die Möglichkeiten durch, dem Ringraum eine dem Füllstand entsprechende Quantität an nicht kontaminiertem Wasser zuzuführen. 	Nach den Informationen der Anlage ist der Bruch einer Löschwasserleitung ein häufig geübtes Szenario, das durch eingestreute Fehler erschwert wird. Es könnte daher sein, dass die Annahme, ein Bruch der Löschwasserleitung würde mit gleicher Wahrscheinlichkeit in die Überlegungen einbezogen bzw. nicht einbezogen, als konservativ anzusehen ist.

Zeitpunkt	Ereignis	Personalhandlung	Erläuterungen
		<ul style="list-style-type: none"> • Es ist ungewiss, ob sie das Leck im Feuerlöschsystem in ihre Überlegungen einbeziehen. • Es wird entschieden, dass der SLV-1 jemanden in den Ringraum entsendet, um die Lage vor Ort zu klären. <p>Das Leck im Feuerlöschsystem wird mit gleicher Wahrscheinlichkeit in Betracht gezogen bzw. nicht in Betracht gezogen.</p>	
+ U(60-90) s		<p>SL und SLV-1 erinnern sich, dass Füllstände im Ringraum durch Wasser aus einer gebrochenen Löschwasserleitung des Feuerlöschsystems ansteigen können. Der SLV-1 erhält den Auftrag, die Brandschutztafel im Warten-Nebenraum zu kontrollieren. Die Beauftragung schließt eine Rekapitulation der Informationen ein, die auf der Brandschutztafel zu kontrollieren sind.</p>	
+ U(6,16) s		<p>Der SLV-1 sucht den Warten-Nebenraum auf, begibt sich zu dem Teil der Brandschutztafel, auf dem Anzeigen zum Ringraum und zu Quadrant 1 anstehen.</p>	<p>Verwechslungen mit anderen Anzeigen sind auszuschließen, weil auf der Anlage kein Brand ausgebrochen ist. Alle anderen Meldelampen sind AUS.</p>
+ U(40,60) s		<p>Der SLV-1 erkennt:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Es haben ohne Auslösung des akustischen Alarms Meldeeinrichtungen angesprochen, die sich im Ringraum-Quadranten 1 befinden. • Der Druck in der Löschwasserleitung liegt unter dem Grenzwert G. • Die vier Feuerlöschwasser-Pumpen sind automatisch angelaufen und fördern. 	<p>Die Informationen stehen bereits auf der Brandschutztafel an, wenn der SLV-1 sie kontrolliert:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Der Grenzwert G ist nach 2 – 4 s erreicht. • Der Automatikstart der Pumpen erfolgt mit Erreichen von G. <p>Ablesefehler sind unplausibel:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Der SLV-1 wendet seine volle Aufmerksamkeit der Brandschutztafel zu, die Kontrolle ist seine einzige Aufgabe.

Zeitpunkt	Ereignis	Personalhandlung	Erläuterungen
		Der SLV-1 beobachtet Grenzwertanzeige und Lauf der Pumpen einige Zeit, um sich von der Stabilität des Ist-Zustands zu überzeugen.	<ul style="list-style-type: none"> Die Anzeigen sind übersichtlich angeordnet, nicht zu wechseln und eindeutig. Ein Ausfall der Anzeigen auf der Brandschutztafel wird nicht unterstellt.
+ U(30,60) s		Der SLV-1 kehrt in die Warte zurück und erstattet dem SL Bericht. Beide Personen bewerten die vorhandenen Informationen.	Der SL könnte nicht sofort für die Entgegennahme des Berichts zur Verfügung stehen, weil er seine laufenden Arbeiten unterbrechen bzw. zu einem vorläufigen Abschluss bringen muss. Die Zeitverteilung schließt eine evtl. kurze Wartezeit für den SLV-1 ein. Geringe Plausibilität einer Unterlassung oder eines fehlerhaften Berichts, weil die Aufmerksamkeit des SLV-1 allein auf diese Aufgabe konzentriert ist.
+ U(50,70) min	Verzweigung <ul style="list-style-type: none"> richtige Diagnose → A-1 keine / falsche Diagnose → D-2 	Fehlermöglichkeit in der Diagnose der aktuellen Situation: entweder <ul style="list-style-type: none"> richtige Diagnose: SL und SLV-1 diagnostizieren eine Überflutung des Ringraums durch Bruch der Löschwasserleitung und Ausströmen des Feuerlöschwassers in dem betroffenen Ringraum-Quadranten oder keine / falsche Diagnose: SL und SLV-1 diagnostizieren keine / eine andere Störfallursache, deren nachfolgenden Maßnahmen, den Wasseraustritt in den Ringraum nicht unterbinden Unter erschwerten Randbedingungen wird davon ausgegangen, dass die Diagnose innerhalb von 30 min durchgeführt wird. Daraus ergibt sich eine geänderte Fehlerwahrscheinlichkeit.	Keine bzw. eine falsche Diagnose wird mit einer Wahrscheinlichkeit von <ul style="list-style-type: none"> Verteilungstyp: Lognormal, Mittelwert: 1,7 E-03, Parameter 1: 30, siehe /SWA 83/ (Table 20-16a, item 4; Table 20-3, item 5) angegeben. Die Wahrscheinlichkeit entspricht dem PSA-Modell „OP_S50-DI“ und der Bewertung aus /KKW 12/, Abschnitt 4.5.3.4.1. Die Bewertung basiert auf <ul style="list-style-type: none"> Zeitbedarf für Diagnose: 60 min, Karenzzeit ca. 2,5 h (bei dV und Schädigung der Nachkühlpumpen bei 1.274 m³ ausgetretenem Wasser), kein Recovery Faktor, erhöhtem Stressniveau. Bei erschwerten Randbedingungen basiert die Bewertung auf

Zeitpunkt	Ereignis	Personalhandlung	Erläuterungen
			<ul style="list-style-type: none"> • Zeitbedarf für Diagnose: 30 min, • Karenzzeit ca. 2,5 h (bei dV und Schädigung der Nachkühlpumpen bei 1.274 m³ ausgetretenem Wasser), • kein Recovery Faktor, • erhöhtem Stressniveau. <p>Damit ergibt sich eine Fehlerwahrscheinlichkeit von</p> <ul style="list-style-type: none"> • Verteilungstyp: Lognormal, • Mittelwert: 0,0053, • EF: 10.

A.4 D-2: Diagnose durch Anlagenwärter im Ringraum (wird nicht im PSA-Modell berücksichtigt)

Zeitpunkt	Ereignis	Personalhandlung	Erläuterungen
T = ENDE (D-1) + U(30,60) s		Unabhängig von der Diagnose (falsch, oder keine Diagnose) wird durch SL und SLV-1 festgelegt, dass zur weiteren Klärung zwei ALW (eine Person mit Aufgaben im Strahlenschutz) in den Ringraum geschickt wird.	Zur Vereinfachung wird angenommen, dass zwei ALW in der Warte zur Verfügung stehen und mit der Erkundung beauftragt wird.
+ U(10,40) s		Der SLV-1 prüft, ob zwei ALW in der Warte für die Kontrolle des Ringraums abkömmlich sind.	
+ U(120-180) s		Es erfolgt die Instruktion des ALW durch den SLV-1. Sie umfasst Erläuterungen, worauf der ALW achten soll, und Wiederholen-Lassen der Anweisung.	
+ U((10-15) min		Die ALW machen sich auf den Weg zum Kontrollbereich und durchlaufen die für den Zutritt erforderlichen Schritte (Umkleiden, Einschleusen mit Kontrolle der Dosis, ...).	
+ U(4-5) min		Die ALW legen Schutzausrüstung an (wg. evtl. Strahlenexposition bei Leck im Primärkreis): U(4-5) min. inkl. Weg zum Aufbewahrungsort der Schutzausrüstung und eventuell erforderlicher Hilfe durch einen Mitarbeiter des Strahlenschutzes (vorausgesetzt wird, dass sich die Schutzausrüstung leicht erreichbar im Kontrollbereich befindet).	
+ U(2-3)		Die ALW gehen zum Ringraum (vorausgesetzt: erforderliche Schlüssel sind vorhanden oder einfach zu beschaffen – z. B. auf dem Weg zur Schutzausrüstung).	

Zeitpunkt	Ereignis	Personalhandlung	Erläuterungen
+ U(5-6) min		Die ALW kontrollieren die vier Quadranten des Ringraums. Er entdeckt die Leckage in der Löschwasserleitung im 1 oder 3 Quadranten. Sie brechen die Kontrolle nicht ab, wenn sie die Leckage entdeckt haben, sondern setzen die Kontrolle fort, um zu erkennen, ob es noch eine weitere Leckage gibt.	Der ALW hat vom SLV-1 die Information, in welchem Quadranten (1 <u>oder</u> 3) die Füllstände erhöht sind. Eine umfassende Ursachenklärung erfordert Informationen über den Gesamt-Ist-Zustand des Ringraums. Es könnte sein, dass die Füllstände auf mehrere Ursachen rückführbar sind. Erst auf der Basis eines Gesamtbildes des Istzustands des Ringraums wird in der Warte das weitere Vorgehen festgelegt.
+ U(2-3) min		Der ALW verlässt den Ringraum und veranlasst einen Anruf in der Warte, um den SL über die Leckage in der Löschwasserleitung (Quadrant 1 / Quadrant 3) zu informieren. Vorausgesetzt: in der Schutzausrüstung ist Telefonieren schwer oder sogar untersagt wg. möglicher Kontamination der Handschuhe durch radioaktive Partikel	Die Situation ist aufgrund der Größe der Leckage eindeutig. Es ist keine plausible Fehlerquelle mit der Folge einer falschen Diagnose durch den ALW erkennbar.
	weiter → A-1		

A.5 M-2: Meldung in der Warte nach überflutungsbedingtem Ausfall von SSC

Zeitpunkt	Ereignis	Personalhandlung	Erläuterungen
T = t _{SSC}	Erster Ausfall einer Redundanz der Ringraumabsaugung KLB (erste sicherheitsrelevante SSC) infolge der Ringraum-Überflutung. Es folgen die Ausfälle aller weiteren Redundanzen in kurzer Folge.		Zeitpunkt des Ausfalls der Ringraumabsaugung KLB $t_{SSC} = 645 \text{ m}^3 / (dV/1000)$ Größenordnungen: t _{SSC} zwischen 4.450 s und 4.780 s (ca. 75 min bis 80 min)
	Auf die Ausfälle folgen je eine optische Anzeige und ein akustischer Alarm in der Warte.		
	Weiter → D-1		

A.6 A-1: Absperrung des ersten Streckenschiebers

Das Absperrn übernimmt ein Anlagenwärter (ALW) oder ein Mitglied der Betriebsfeuerwehr (F). Der Einfachheit halber wird angenommen, dass ein ALW in der Warte dafür abkömmlich ist oder, falls nicht, ein Mitglied der Feuerwehr mit Aufenthalt außerhalb der Warte beauftragt wird.
Annahme: der ALW befindet sich in der Warte.

Zeitpunkt	Ereignis	Personalhandlung	Erläuterungen
T = ENDE (D-1 oder D-2 oder D-3)		SL und SLV-1 wissen, dass der entsprechende Streckenschieber STS-11 (Quadrant 1) bzw. STS-21 (Quadrant 3) auf dem Anlagengelände, der die gebrochene Löschwasserleitung absperrt, vor Ort von Hand zu schließen ist.	Geringe Plausibilität des Fehlers, dass Bericht des SLV-1, Feststellung des Ist-Zustands und Schlussfolgerung zum Absperrn des Schiebers unterbleiben oder fehlerhaft sind. Die Aufmerksamkeit vom SL bzw. SLV-1 ist auf diese Aufgaben konzentriert, der Wassereintrag in den Ringraum hat eine zu hohe sicherheitstechnische Bedeutung. Zur korrekten Diagnose gehört auch die Erkenntnis, welche weiteren Schritte die Beseitigung der Störung erfordert.
+ U(30-60) s		Der SLV-1 erhält den Auftrag, die Schließung des Schiebers zu veranlassen. Die ersatzweise Schließung zweier weiterer Schieber in unmittelbarer Nähe wird als Vorgehen festgelegt, wenn der ursprünglich vorgesehene Schieber sich nicht schließen lassen sollte.	
+ U(60-120) s		Der SLV-1 beauftragt zwei ALW und zwei Personen der Feuerwehr FW mit der Schließung des Schiebers vor Ort. Der SLV-1 gibt die Anweisung, bei Bedarf die beiden weiteren Schieber in unmittelbarer Nachbarschaft zu schließen.	Geringe Plausibilität von Fehlern bei dieser Instruktion, da die Tätigkeit gut bekannt, die Lage der zu betätigenden Komponente zur Schließung des Schiebers klar und das Vorgehen zur Schließung vertraut sind. Die restlichen Personen der Feuerwehr begeben sich zum Bereitschaftsplatz vor dem Reaktorgebäude.

Zeitpunkt	Ereignis	Personalhandlung	Erläuterungen
		Der SL schaltet die Feuerlöschwasserpumpen ab	Das Abschalten der Feuerlöschwasserpumpen hat keinen Einfluss auf die Austrittsrate der Leckage. Die Fördermenge der Druckhaltepumpen von 500 m³/h ist abdeckend /KKW 12/, Abschnitt 4.3.3.3.4
+ t_AN		<p>Die ALW und die FW begeben sich zum Streckenschieber, holen das erforderliche Werkzeug vom Aufbewahrungsort gleich neben dem Ort mit dem zu schließenden Schieber, orientiert sich über die Lage des Schiebers, öffnet den Deckel, der ihn abdeckt und schließt den Schieber.</p> <p>Nach der Dauer t_AN erreicht der erste von beiden Trupps (ALW, FW) den benötigten Streckenschieber (STS-11, STS-21).</p> <p>Der zweite Trupp geht trotzdem weiterhin zum Streckenschieber und kann damit bei Handlungsfehlern des ersten Trupps eingreifen.</p>	<p>Geringe Plausibilität von Fehlern, den Schieber nicht aufzusuchen oder nicht zu finden, das erforderliche Werkzeug nicht verfügbar zu haben und den Deckel nicht öffnen zu können.</p> <p>Die Dauer t_AN für das Erreichen des Streckenschiebers hängt sowohl von der betroffenen Redundanz als auch von den beiden Trupps (ALW, FW) ab. Die Gehgeschwindigkeit der Personen ist v. Die benötigten Dauern für die ALW sind:</p> <ul style="list-style-type: none"> • STS-11 für Quadrant 1: $t_{ALW} = (200 \text{ m}) / v$ • STS-21 für Quadrant 3: $t_{ALW} = (400 \text{ m}) / v$ <p>Die benötigte Dauer der FW ist (unabhängig vom Streckenschieber):</p> <ul style="list-style-type: none"> • $t_{FW} = U(100,500) \text{ m} / v$ <p>Damit ergibt sich die Minimale Dauer bis zum Erreichen des Streckenschiebers:</p> <ul style="list-style-type: none"> • $t_{AN} = \min(t_{ALW}, t_{FW})$ <p>Annahme der Gehgeschwindigkeit v:</p> <ul style="list-style-type: none"> • $v = 1,2 \text{ m/s}$ unter normalen Randbedingungen, • $v = U(0,1-0,5) \text{ m/s}$ bei erschwerten Randbedingungen (z. B.: starker Wind, Regen, Glatteis).
+ (100,160) s	Zeitpunkt Absperrung: t_AB	ALW / FW schließen den Streckenschieber.	
	Verzweigung <ul style="list-style-type: none"> • Schließen wird richtig durchge- 	Wahrscheinlichkeit für kein / nicht richtiges Schließen: <ul style="list-style-type: none"> • Verteilungstyp: Lognormal, 	Bewertungsgrundlage: Menschliche Fehlerwahrscheinlichkeit basiert auf PSA-Modell („OP_S50-AR“) /KKW 12/, Abschnitt 4.5.3.4.2:

Zeitpunkt	Ereignis	Personalhandlung	Erläuterungen
	<p>führt → A-2</p> <ul style="list-style-type: none"> Schließen wird nicht oder nicht richtig durchgeführt → E-0 	<ul style="list-style-type: none"> Mittel: 4,8 E-06, Parameter 1: 28. 	<ul style="list-style-type: none"> Maßnahme wird von zwei ALW bzw. der FW durchgeführt, Für das Absperren verbleiben mindestens 1,5 h, Recovery Factor durch Wechselwirkung ALW und FW, erhöhtes Stresslevel. <p>Da in der Bewertung der menschlichen Fehlerwahrscheinlichkeit bereits der Recovery Factor durch die FW berücksichtigt wurde, wird keine weitere Maßnahme zum Absperren der Streckenschieber angenommen. Ein fehlerhaftes Schließen führt dadurch bereits zum Endzustand E-0.</p> <p>Bei der Bewertung der Handmaßnahme kommen in /KKW 12/, Abschnitt 4.5.3.4.2. folgende Tabellen aus /SWA 83/ zum Tragen:</p> <ul style="list-style-type: none"> Tab. 20-7, item 3: Unterlassungsfehler bei kurzer Liste ohne Checkliste, Tab. 20-13, item 2: Fehler bei der Auswahl eines Ventils (klar und eindeutig gekennzeichnet), Tab. 20-15, item 2: „tags are not accounted for individually“, Tab. 20-16a, item 4: Stressfaktor 2, Tab. 16-4, item 2a: geringe Abhängigkeit zwischen ALW und FW. <p>Unter erschwerten Randbedingungen wird von einem hohen Stressfaktor ausgegangen (Tab. 20-16a, item 6: Stressfaktor 5). Dadurch erhöht sich die Wahrscheinlichkeit des Handlungsfehlers um den Faktor 2,5. Die Fehlerwahrscheinlichkeit beträgt somit 2,4 E-05.</p>

A.7 A-2: Kontrolle des ersten Streckenschiebers

Zeitpunkt	Ereignis	Personalhandlung	Erläuterungen
T = ENDE(A-1) + U(60,90) s		ALW / FW halten Rücksprache mit der Warte, ob Durchfluss unterbunden wurde.	
	Verzweigung <ul style="list-style-type: none"> • erster STS geschlossen → E-1 • erster STS nicht geschlossen → A-3 	Ausfallhäufigkeit eines Streckenschiebers: <ul style="list-style-type: none"> • Verteilungstyp: Lognormal, • Mittelwert: 1,35 E-07 /h, • Parameter 1: 3,13. Ausfallwahrscheinlichkeit bei Anforderung: Model Tested, Testintervall: 1 Jahr	Die Ausfallhäufigkeit basiert auf PSA-Modell („A.15.8-4_SN“) und dazugehörigen Basisereignissen.

A.8 A-3: Absperrung der Ringleitung

Zeitpunkt	Ereignis	Personalhandlung	Erläuterungen
T = ENDE(A-2) + U(100,160) s		ALW / FW gehen zum ersten Streckenschieber der Ringleitung STS-12 (Leckage im Quadranten 1) bzw. STS-22 (Leckage im Quadranten 3) und unternehmen den Schließversuch.	Wegen der räumlichen Nähe decken die Handlungszeiten auch die wenigen Schritte vom ersten Streckenschieber ab. Es wird dasselbe Werkzeug genutzt.
+ U(100,160) s	Zeitpunkt Absperrung: t_AB (der Wert von t_AB aus A-1 wird überschrieben)	ALW / FW gehen zum zweiten Streckenschieber der Ringleitung STS-13 (Leckage im Quadranten 1) bzw. STS-23 (Leckage im Quadranten 3) und unternehmen den Schließversuch.	Wegen der räumlichen Nähe decken die Handlungszeiten auch die wenigen Schritte vom schwergängigen Schieber ab. Es wird dasselbe Werkzeug genutzt. Zeitpunkt der Absperrung: t_AB (der Wert für t_AB aus A-1 wird überschrieben)
+ U(60,90) s		Der ALW / FW ruft in der Warte an und meldet den Zustand des Schiebers ZU.	
	Verzweigung <ul style="list-style-type: none"> • beide Streckenschieber der Ringleitung sind geschlossen → E-1 • mindestens ein Streckenschieber der Ringleitung hat nicht vollständig geschlossen → E-0 	Ausfallhäufigkeit eines Streckenschiebers: <ul style="list-style-type: none"> • Verteilungstyp: Lognormal, • Mittelwert: 1,35 E-07 /h, • Parameter 1: 3,13. Ausfallwahrscheinlichkeit p bei Anforderung: Model Tested Ausfallwahrscheinlichkeit für mindestens einen Streckenschieber der Ringleitung $1 - (1 - p)^2 = 2p - p^2$	Die Ausfallhäufigkeit basiert auf PSA-Modell („A.15.8-4_SN“) und dazugehörigen Basisereignissen. Ein GVA der zwei / drei Streckenschieber wurde im PSA-Modell nicht berücksichtigt.

A.9 E-0: Endzustand ohne Erfolg der Absperrung

Die Leckage konnte nicht abgesperrt werden, sodass es zum Ausfall aller sicherheitsrelevanten Komponenten (siehe Tab. 3.1), insbesondere der Nachkühlpumpen, kommt. t_AB aus A-3 wird überschrieben und auf -1 gesetzt (keine Absperrung möglich).

A.10 E-1: Endzustand mit Erfolg der Absperrung

Die Leckage wurde erfolgreich abgesperrt. Ob sicherheitsrelevante Komponenten ausgefallen sind, hängt von den ausgetretenen Wasservolumina in den Ringraum ab. Die ausgetretenen Wasservolumina sind $V_W = t_{AB} \cdot dV$, wobei t_{AB} der Zeitpunkt der Absperrung der Löschwasserleitung ist (siehe A-1 bzw. A-3). Anhand der ausgetretenen Wasservolumina kann mittels Tab. 3.1 bestimmt werden, welche SSC ausgefallen sind.

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

Schwertnergasse 1
50667 Köln

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

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 978-3-910548-81-7