

**Untersuchung
langandauernder
Ereignisse mit komplexen
Schadensbildern
in der PSA der Stufe 1**

**Methodische Erweiterung
bestehender PSA
unter Berücksichtigung
spezieller Anforderungen
aus übergreifenden
Einwirkungen**

**Untersuchung
langandauernder
Ereignisse mit komplexen
Schadensbildern
in der PSA der Stufe 1**

Abschlussbericht zum
Arbeitspaket AP 1

Florian Berchtold
Hristo Goumnerov
Gerhard Mayer
Marina Röwekamp
Christian Strack

Oktober 2021

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) unter dem Förderkennzeichen 4718R01500 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 BMU übereinstimmen.

Deskriptoren

Einwirkungskombinationen, Hazards, Kernkraftwerk, Langandauernde Ereignisse, Methodik, Probabilistische Sicherheitsanalyse (PSA), übergreifende Einwirkungen

Kurzfassung

Im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens 4718R01500 des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) hat die GRS Methoden für eine Berücksichtigung langandauernder Ereignisse, insbesondere infolge übergreifender Einwirkungen und Einwirkungskombinationen, mit komplexen Schadensbildern in probabilistischen Sicherheitsanalysen (PSA) der Stufe 1 entwickelt.

Nach einer Identifizierung und Beschreibung der zu betrachtenden übergreifenden Einwirkungen und Einwirkungskombinationen, welche zu langandauernden Ereignissen mit komplexen Schadensbildern führen können, und einer Ermittlung der spezifischen Randbedingungen für auslösende Ereignisse sowie der für die Beherrschung solcher Ereignisse erforderlichen Maßnahmen wurde das PSA-Anlagenmodell der Stufe 1 entsprechend angepasst.

Zunächst erfolgte mittels des von der GRS entwickelten Screening-Werkzeugs *Hazards Screening Tool* (HST) für eine ausgewählte Referenzanlage in Deutschland eine Identifikation der für den Kraftwerksstandort und den zu analysierenden Reaktorblock relevanten übergreifenden Einwirkungen und Einwirkungskombinationen.

Mittels einer detaillierten Analyse wurde ein langandauerndes Hochwasserereignis untersucht. Bei diesem Ereignis wurde zusätzlich angenommen, dass bei einem solchen Hochwasser die Anlage mit Fahrzeugen nicht erreichbar ist und die Eigenbedarfsversorgung mit Strom ausfällt. Somit sind zur Störfallbeherrschung der Betrieb der Notstromdiesel über einen langen Zeitraum sowie ein kontinuierlicher Personalwechsel erforderlich. Für den kontinuierlichen Betrieb der Notstromdiesel muss nach einer bestimmten Zeitspanne die Versorgung mit weiterem Kraftstoff sichergestellt werden. Für die Versorgung der Anlage mit Personal und Kraftstoff wurden zwei ergänzende Notfallmaßnahmen, die Versorgung über Fährbetrieb mit Amphibienfahrzeugen sowie über Hubschraubertransport, im Detail analysiert. Diese ergänzenden Notfallmaßnahmen sind auch auf Erdbebenereignisse mit einer langanhaltenden Nichterreichbarkeit der Anlage und dem Ausfall der Eigenbedarfsversorgung übertragbar.

Die im Detail untersuchten Maßnahmen wurden in ein bestehendes PSA-Anlagenmodell der Stufe 1 für die Referenzanlage unter Berücksichtigung der ereignisspezifischen Randbedingungen und bestimmter Postulate zum Anlagenzustand implementiert und ausgewertet.

Die Quantifizierung des PSA-Modells zeigt, dass die Sicherstellung der Personalversorgung einen deutlich höheren Beitrag zum Erfolg der Maßnahmen bei dem betrachteten langandauernden Hochwasser als die Sicherstellung der Kraftstoffversorgung leistet. Grund hierfür ist, dass die Zuverlässigkeit von Maßnahmen zur Störfallbeherrschung durch das Personal bei langen Schichtdauern deutlich abnimmt und somit ein regelmäßiger Personalwechsel einen erheblichen Einfluss auf die Störfallbeherrschung hat.

Summary

As part of the research and development project 4718R01500 sponsored by the Federal Ministry of the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU) GRS has developed a methodological approach for considering long-lasting event sequences, in particular resulting from hazards and hazard combinations, with complex damages and failure modes within Level 1 probabilistic safety analyses (PSA).

After the identification and description of hazards and hazard combinations which may result in event sequences of longer durations with highly complex damages and failure modes and determining the specific boundary conditions of initiating events as well as accident mitigation measures needed, the Level 1 PSA plant model of the reference plant has been adapted accordingly.

In a first step, for a selected reference plant in Germany, those hazards and hazard combinations relevant for a selected reference plant site and the reactor unit to be analysed have been identified applying the *Hazards Screening Tool* (HST) developed by GRS.

A long-duration external flooding has been analysed in detail. In this context, it has been assumed in addition that in the event of such an external flooding the plant will not be accessible by road and that there will be a complete loss of offsite power. As a result, the operation of the emergency diesel generators over a long period as well as a continuous replacement of the shift personnel are needed. For continuously running the emergency diesel generators the support with diesel fuel needs to be ensured after at the latest after a given time period. Two supplementary emergency measures ensuring the supply of the plant with personnel and fuel, a ferry service with amphibious vehicles and helicopter transport, have been analysed in detail. These supplementary emergency measures are also applicable after seismic events with long-lasting event sequences and a loss of offsite power.

The measures analysed in detail have been implemented and quantified in an existing Level 1 PSA plant model, taking into account postulated event-specific boundary conditions and plant states.

The quantification of the PSA model demonstrates that in the external flooding event analysed assuring the supply of personnel provides a significantly higher contribution to the success of the mitigation measures than ensuring the fuel supply.

The reason for this is the significant decrease in human reliability due to long shift durations. Hence, a regular staff exchange will significantly affect the success of the event mitigation measures.

Inhaltsverzeichnis

	Kurzfassung	I
	Summary	III
1	Einführung	1
2	Deterministische/phänomenologische Untersuchungen zu den zu unterstellenden Randbedingungen bzw. Schadensbildern sowie ggf. möglichen weiteren Maßnahmen	7
2.1	Identifikation der zu berücksichtigenden übergreifenden Einwirkungen	9
2.2	Einwirkungsscreening für langandauernde Ereignisse	13
2.2.1	Screening der Einwirkungen und Einwirkungskombination.....	16
2.2.2	Ergebnisse des Einzeleinwirkungsscreenings für die Referenzanlage	20
2.3	Zu unterstellende Randbedingungen für die identifizierten übergreifenden Einwirkungen	22
2.3.1	Betriebserfahrung zu hydrologischen Einwirkungen von innen.....	22
2.3.2	Betriebserfahrung zu hydrologischen Einwirkungen von außen	23
2.3.3	Einwirkungen von außen an Fluss- und Küstenstandorten durch Vereisung im Kühlwassereinlaufbauwerk bei extrem niedrigen Umgebungstemperaturen	24
2.3.4	Überflutung durch extremen Anstieg des Meeresspiegels.....	24
2.3.5	Eindringen von Pflanzenresten und Sedimenten in die Kühlwasserversorgung eines Kernkraftwerks	25
2.4	Allgemeine Voraussetzungen zur Beschreibung langandauernder Ereignisse	27
2.4.1	Schutzmaßnahmen in der Referenzanlage und anderen Standort.....	27
2.4.2	Ergänzende Notfallmaßnahmen	42
2.5	Hochwasser mit langandauernden Folgen.....	45
2.5.1	Hochwasserereignisse am Standort der Referenzanlage	45
2.5.2	Angenommenes Hochwasserereignis.....	47
2.5.3	Ergänzende Notfallmaßnahmen	59
2.5.4	Ereigniskombination im angenommenen Hochwasserereignis.....	74

2.5.5	Diskussion von Annahmen.....	78
2.5.6	Schlussfolgerungen.....	80
2.6	Erdbeben mit langandauernden Folgen.....	81
2.6.1	Erdbebenereignisse am Standort der Referenzanlage und weltweit	81
2.6.2	Angenommenes Erdbebenereignis und Ereignisablauf	88
2.6.3	Ereigniskombinationen mit dem angenommenen Erdbebenereignis	90
2.6.4	Ergänzende Notfallmaßnahmen	92
3	Erprobung einer probabilistischen Langzeitbewertung für Hochwasser in einer Referenzanlage.....	95
3.1	Probabilistische Modellierung der Kraftstoff- und Personalversorgung mit ergänzenden Notfallmaßnahmen sowie der Wiederherstellung der externen Stromversorgung.....	96
3.1.1	Modellbeschreibung	96
3.1.2	Ergebnisauswertung und Diskussion	101
3.2	Einbindung der Kraftstoff- und Personalversorgung mit ergänzenden Notfallmaßnahmen sowie Wiederherstellung der externen Stromversorgung im PSA-Anlagenmodell.....	104
3.3	Detailanalysen für langandauernde übergreifende Einwirkungen und Einwirkungskombinationen	108
3.3.1	Umfassende Berücksichtigung langandauernder Einwirkungen von außen und entsprechender Einwirkungskombinationen	108
3.3.2	Erweiterung von Ereignisbäumen des PSA-Anlagenmodells der Referenzanlage für die probabilistische Detailanalyse.....	110
3.3.3	Erweiterung von Fehlerbäumen im PSA-Modell der Referenzanlage für die probabilistische Detailanalyse	117
3.3.4	Einfluss zusätzlichen Anforderungen an Zuverlässigkeitskenngrößen für SSC.....	119
4	Quantifizierung des erweiterten PSA-Anlagenmodells und Ergebnisdiskussion	125
4.1	Zusammenfassende Ergebnisdarstellung der Endzustände.....	125
4.2	Nichtverfügbarkeit der Systemfunktionen	131
4.3	Ergebnisunsicherheiten.....	135

4.4	Importanz- und Sensitivitätsanalysen	138
4.4.1	Endzustände mit Kernschaden	138
4.4.2	Endzustände mit Brennstabschaden	139
4.4.3	Endzustände mit Rekritikalität	139
5	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	141
	Literaturverzeichnis	145
	Abkürzungsverzeichnis	157
	Abbildungsverzeichnis	161
	Tabellenverzeichnis	163

1 Einführung

Probabilistische Sicherheitsanalysen (PSA) sowie die Verwendung der Ergebnisse solcher Analysen sind entsprechend dem Stand von Wissenschaft und Technik bei der Sicherheitsbewertung von Kernkraftwerken durchzuführen. Der gegenwärtige Stand der Anforderungen an die Durchführung von PSA in Deutschland im Rahmen der Sicherheitsüberprüfungen (SÜ) ist im PSA-Leitfaden /BMU 05/ und seinen zugehörigen Fachbänden zu Methoden und Daten für probabilistische Sicherheitsanalysen /FAK 05/, /FAK 05a/ und /FAK 16/ dargestellt. Zudem liegt mittlerweile ein weiteres Dokument /FAK 18/ vor, welches eine Hilfestellung bei der Anwendung von PSA in aufsichtlichen Verfahren außerhalb der Sicherheitsüberprüfung gibt.

Nach den Reaktorunfällen von Fukushima, bei denen eine Kombination übergreifender Einwirkungen (Erdbeben und Tsunami) zu Ereignisketten mit Wasserstoffexplosionen, anlageninternen Bränden sowie anlageninternen Überflutungen etc. führte, haben weltweit intensive Analysen, auch probabilistischer Natur, zur Ermittlung des Risikobeitrags übergreifender Einwirkungen in kerntechnischen Anlagen, u. a. im Rahmen der „Stress-tests“ stattgefunden. Diese Untersuchungen haben (siehe auch /WIE 17/) dazu geführt, dass aktuell unterschiedliche Aktivitäten zur Bereitstellung allgemein akzeptierter Methoden für eine umfassende und systematische Berücksichtigung solcher Einwirkungen und Einwirkungskombinationen erfolgen. Dies zeigen u. a. /NEA 13/ sowie der von der Working Group on Risk Assessment (WGRISK) der Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD) im Jahr 2013 durchgeführte Workshop on PSA of Natural External Hazards Including Earthquake /NEA 14/, ebenso wie der „Workshop on Fire PSA“ /NEA 15/ oder auch die aktuelle Aktivität (Task) der WGRISK „Human Reliability Analysis in External Events PSA – Survey of Methods and Practice“ /NEA 21/. Da übergreifende Einwirkungen international teilweise bereits in größerem Umfang in der PSA berücksichtigt werden, erfolgen seitens der GRS derzeit entsprechende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in unterschiedlichen Forschungs- und Entwicklungsvorhaben des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) und des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU). Im Rahmen der BMWi-Vorhaben RS1539 und RS1556 wurden insbesondere die Methoden zu übergreifenden Einwirkungen mit Überflutungspotenzial vervollständigt, da sich dies aufgrund der Ergebnisse der o. g. internationalen Aktivitäten als eine vorrangig durchzuführende Aufgabe herauskristallisiert hat.

Aus den Diskussionen auf internationaler Ebene und den in Folge der Reaktorunfälle von Fukushima durchgeführten Stresstests für Kernkraftwerke, insbesondere auf europäischer Ebene, hat sich zudem die Notwendigkeit für methodische Anpassungen und Weiterentwicklungen und für eine Fortschreibung der Anforderungen an die Durchführung von PSA ergeben. Dementsprechend wurde es seitens des Bundesumweltministeriums u. a. für erforderlich erachtet, im Rahmen des Vorhabens 4718R01500 solche methodischen Erweiterungen in Bezug auf Risikoanalysen für langandauernde Ereignisse vorzunehmen.

Das Arbeitspaket AP 1 des BMU-Vorhabens 4718R01500 zur beispielhaften Untersuchung langandauernder Ereignisse mit komplexen Schadensbildern in der PSA der Stufe 1 für ein im kommerziellen Betrieb befindliches Kernkraftwerk mit Druckwasserreaktor (DWR) in Deutschland hatte dementsprechend die nachfolgend aufgeführten Ziele:

- Identifikation der zu betrachtenden übergreifenden Einwirkungen, die langandauernde Ereignisse mit komplexen Schadensbildern auslösen können
 - Aufstellung einer Liste der zu betrachtenden übergreifenden Einwirkungen und Einwirkungskombinationen (siehe Abschnitt 2.1):

Es sind diejenigen übergreifenden Einwirkungen und Einwirkungskombinationen zu identifizieren, welche die Eigenschaft haben, dass sich daraus langandauernde Ereignisse mit komplexen Schadensbildern ergeben können. Zunächst ist eine generische Liste möglicher derartiger Einzeleinwirkungen zu erarbeiten. Diese wird dann unter Nutzung des im Vorhaben 4715R01575 erarbeiteten Informationstools *Hazards Library /SPE 18/* für eine deutsche Referenzanlage im Detail spezifiziert und zunächst einem Einwirkungsscreening für Einzeleinwirkungen unterzogen. Für die nach dem qualitativen Screening verbliebenen einzelnen Einwirkungen werden dann Einwirkungskombinationen entsprechend dem Vorgehen in 4715R01575 gebildet und ebenfalls einem qualitativen und quantitativen Screening unterzogen (siehe Abschnitt 2.2).
 - Beschreibung der zu unterstellenden Randbedingungen am Standort für die identifizierten übergreifenden Einwirkungen und Einwirkungskombinationen:

Die im ersten Arbeitsschritt identifizierten langandauernden Einwirkungen und Einwirkungskombinationen werden im Detail charakterisiert und dokumentiert (siehe Abschnitt 2.3).

- Identifikation und Beschreibung der von den Einwirkungen und Einwirkungskombinationen ausgelösten langandauernden Ereignisse bzw. Ereigniskombinationen:
Die aus den übergreifenden Einwirkungen und Einwirkungskombinationen resultierenden langandauernden Ereignisse bzw. Ereigniskombinationen werden im Detail charakterisiert und dokumentiert (siehe Abschnitt 2.4).
- Identifikation der für die langfristige Beherrschung der zuvor identifizierten langandauernden Ereignisse und Ereigniskombinationen benötigten Systemfunktionen bzw. von zusätzlichen Anforderungen an diese:
Beschreibung der zur Beherrschung der zuvor identifizierten Ereignisse erforderlichen baulichen Anlagenteile, Systeme und Komponenten (SSC). Die Funktionen der zur Beherrschung der im vorangegangenen Arbeitsschritt identifizierten langandauernden Ereignisse bzw. Ereigniskombinationen erforderlichen baulichen Anlagenteile, Systeme und Komponenten (SSC) werden detailliert beschrieben. Dies schließt auch die Brennelementbeckenkühlung mit ein (siehe Abschnitt 2.5).

Des Weiteren war eine Erprobung einer probabilistischen Langzeitbewertung für ausgewählte Ereignisse in einer Referenzanlage vorgesehen. Dabei war die Aufgabenstellung wie folgt:

- Identifikation der für eine probabilistische Langzeitbewertung relevanten auslösenden Ereignisse und Ereignisabläufe (z. B. Transienten, Leckstörfälle) für eine Referenzanlage durch quantitatives Screening:
In einem ersten Schritt werden für die in der Referenzanlage möglichen langandauernden Ereignisse infolge übergreifender Einwirkungen und Einwirkungskombinationen aus allen auslösenden Ereignissen (Englisch: initiating events, IE), wie Transienten oder Leckstörfälle, mittels eines quantitativen Screenings diejenigen IE identifiziert, die zu Ereignisabläufen führen, die für eine probabilistische Langzeitbewertung relevant sind (siehe Abschnitt 3.1).
- Detailanalyse für die im quantitativen Screening ermittelten langandauernden Ereignisse (siehe Abschnitt 3.2). Die Detailanalyse besteht aus den folgenden Arbeitsschritten:
 - Erweiterung von ausgewählten Ereignisbäumen des PSA-Modells der Referenzanlage basierend auf den Ergebnissen der vorangegangenen deterministischen/phänomenologischen Untersuchungen:

Basierend auf den im vorangegangenen Arbeitsschritt identifizierten auslösenden Ereignissen und Ereignisabläufen werden die entsprechenden Ereignisbäume im PSA-Modell der Referenzanlage unter Nutzung der vorher durchgeführten deterministischen/phänomenologischen Untersuchungen erweitert.

- Erweiterung von Fehlerbäumen des PSA-Modells der Referenzanlage basierend auf den Ergebnissen der vorangegangenen deterministischen bzw. phänomenologischen Untersuchungen. Damit kann der Einfluss von langandauernden Ereignissen auf die Nichtverfügbarkeit von benötigten Systemfunktionen probabilistisch modelliert werden:

In einem weiteren Arbeitsschritt erfolgt dann, entsprechend dem in /ROE 17/ und /ROE 18/ für übergreifende Einwirkungen dargestellten Vorgehen für eine Erweiterung der PSA der Stufe 1 um übergreifende Einwirkungen, die zugehörige Erweiterung der Fehlerbäume im PSA-Anlagenmodell der Stufe 1 für die Referenzanlage, welche erneut auf den Ergebnissen der vorher durchgeführten deterministischen/phänomenologischen Untersuchungen basiert.

- Beschreibung des Einflusses zusätzlicher Anforderungen an SSC auf deren Zuverlässigkeitskenngrößen und ggf. Berücksichtigung dadurch beeinflusster Nichtverfügbarkeiten der SSC im PSA-Modell der Referenzanlage:

Dieser Arbeitsschritt beinhaltet die detaillierte Beschreibung, welchen Einfluss die zusätzlichen Anforderungen an relevante SCC bei langandauernden Ereignissen infolge übergreifender Einwirkungen oder Einwirkungskombinationen auf die Zuverlässigkeitskenngrößen dieser SSC haben. Dazu sind neben Ausfallraten auch die Bezugszeiten (Missionszeiten, Reparaturzeiten etc.) in Betracht zu ziehen. Die geänderten Nichtverfügbarkeiten der SSC werden dann im PSA-Anlagenmodell der Referenzanlage implementiert.

- Quantifizierung der ausgewählten Ereignisse im erweiterten PSA-Modell der Referenzanlage und Analyse der erzielten Ergebnisse für die ausgewählten Ereignisabläufe (siehe Kapitel 4):

Die vorher identifizierten relevanten Ereignisse werden beispielhaft einer Analyse der erzielten Ergebnisse für ausgewählte Ereignisabläufe unterzogen und dann im PSA-Anlagenmodell der Stufe 1 der Referenzanlage quantifiziert. Dies umfasst

- die Berechnung der Minimalschnitte (Punktwerte),
- die Berechnung der Häufigkeit der einzelnen Pfade der Ereignisabläufe,

- die Durchführung von Unsicherheitsanalysen sowie
- die Durchführung von Importanz- und Sensitivitätsanalysen.

2 Deterministische/phänomenologische Untersuchungen zu den zu unterstellenden Randbedingungen bzw. Schadensbildern sowie ggf. möglichen weiteren Maßnahmen

Der Umfang probabilistischer Sicherheitsanalysen nach internationalem Stand von Wissenschaft und Technik umfasst grundsätzlich PSA der Stufen 1 bis 3 für alle Anlagenbetriebszustände, d. h. sowohl des Leistungs- wie des Nichtleistungsbetriebs einschließlich der Nachbetriebsphase, für anlageninterne Ereignisse sowie für Einwirkungen von innen und außen.

Anerkannte Methoden stehen mittlerweile grundsätzlich für einen Großteil des Gesamtumfangs der PSA aus Untersuchungen, die für verschiedene Anlagenbetriebszustände von Einzelanlagen durchgeführt wurden, zur Verfügung. Diese methodischen Vorgehensweisen sind generell auf eine PSA für einen gesamten Kraftwerksstandort (als Standort-PSA oder international als Site-Level PSA bezeichnet) übertragbar, allerdings sind diverse methodische Weiterentwicklungen derzeit noch nicht ausreichend validiert. In Bezug auf eine Standort-PSA fehlen noch allgemein akzeptierte Risikomaße und Methoden zur Ermittlung des Risikos für den gesamten Standort mit ggf. mehr als einem Reaktorblock und weiteren radioaktiven Quellen. Dazu finden gegenwärtig Aktivitäten sowohl bei der International Atomic Energy Agency (IAEA) als auch bei der WGRISK des OECD NEA (Nuclear Energy Agency) Committee on the Safety of Nuclear Installations (CSNI) statt. Sobald diese entsprechend fortgeschritten sind, können Erkenntnisse aus diesen Aktivitäten auch im Hinblick auf eine systematische und vollständige Berücksichtigung übergreifender Einwirkungen und Einwirkungskombinationen in der PSA ebenso wie gemeinsam von mehreren Reaktoren und anderen kerntechnischen Anlagen an einem gegebenen Kraftwerksstandort genutzter technischer wie menschlicher Ressourcen dazu genutzt werden, die Methoden für PSA der Stufen 1 und 2 auf den Gesamtstandort hin zu vervollständigen und standortabhängige, relevante Aspekte bei der methodischen Weiterentwicklung zu berücksichtigen. Ein erster Ansatz dazu wurde im Arbeitspaket AP 3 des Vorhabens 4718R01500 erarbeitet und findet sich in /HAG 21/.

Ein Aspekt, der bislang in den anlagenspezifischen PSA für deutsche Kernkraftwerke bei der Bewertung übergreifender Einwirkungen zumeist nur unzureichend berücksichtigt wurde, sind langandauernde Ereignisse und Ereigniskombinationen übergreifender Einwirkungen von innen wie außen. Wohlbekannte Folgeereignisse wie erdbebenbe-

dingte Folgebrände wurden zwar bereits in den meisten seismischen PSA mit betrachtet, eine systematische methodische Behandlung langandauernder Ereigniskombinationen erfolgte aber bislang nicht.

Anzumerken ist in diesem Zusammenhang, dass für die ausgewählte Referenzanlage in Deutschland nach den Ereignissen in Fukushima im Jahr 2011 solche Einwirkungen stärker deterministisch untersucht und daraus entsprechende anlagenspezifische Maßnahmen abgeleitet wurden.

International wird aufgrund von Untersuchungen nach den Reaktorunfällen von Fukushima Daiichi in Bezug auf übergreifende Einwirkungen und deren Berücksichtigung in Sicherheitsbewertungen kerntechnischer Einrichtungen seitens der IAEA, wie in vielen nationalen Regelwerken, eine Berücksichtigung derartiger Ereigniskombinationen bei der Auslegung ebenso wie im Rahmen von sicherheitstechnischen Bewertungen deterministischer wie probabilistischer Art gefordert. Es mangelt derzeit jedoch noch an einer systematischen methodischen Berücksichtigung langandauernder Ereignisse infolge übergreifender Einwirkungen, insbesondere bei probabilistischen Risikobetrachtungen von Ereigniskombinationen während eines langandauernden Ereignisablaufs.

Ein wesentlicher Punkt in diesem Zusammenhang ist, dass somit alle Arten von Ereigniskombinationen während eines langandauernden Ereignisablaufs identifiziert und entsprechend ihrer standort- und anlagenspezifischen Bedeutung entweder von jeglicher weiteren Betrachtung im Rahmen eines Screeningverfahrens ausgeschlossen, vereinfacht und ganz grob analysiert oder detailliert in der PSA modelliert werden müssen. Bei den Ereigniskombinationen sind entsprechend IAEA Safety Guide SSG-64 /IAE 21/ folgende Kategorien von Ereigniskombinationen übergreifender Einwirkungen zu unterscheiden:

- kausal als Folgeereignisse verknüpfte Ereignisse,
- durch eine gemeinsame Ursache hervorgerufene, als korrelierte Ereignisse bezeichnet, sowie
- unabhängig voneinander, quasi gleichzeitig auftretende Ereignisse.

Diese methodische Lücke versucht die GRS nun für Risikobewertungen nach und nach zu schließen und die methodischen Weiterentwicklungen in einer PSA, insbesondere in Bezug auf langandauernde Ereignisse und Ereigniskombinationen, für eine Referenzan-

lage an einem deutschen Kernkraftwerksstandort umzusetzen. Hierzu ist ein klar strukturierter, nachvollziehbarer methodischer Ansatz erforderlich.

In Bezug auf die durchgeführten Analysen ist anzumerken, dass zur Durchführung der methodischen Weiterentwicklungen und deren Erprobung teilweise Postulate und Randbedingungen zugrunde gelegt wurden, die nicht vollständig dem aktuellen Nachweisstand der Referenzanlage entsprechen. Als ein Beispiel wurde für die Referenzanlage nachgewiesen, dass die Versorgung der Notstromdieselaggregate mit Kraftstoff ohne externe Unterstützung für eine Zeitspanne von bis zu sieben Tagen sichergestellt ist.

2.1 Identifikation der zu berücksichtigenden übergreifenden Einwirkungen

Bei übergreifenden Einwirkungen handelt es sich definitionsgemäß um Einwirkungen von innen oder außen mit dem Potenzial für redundanzübergreifende Ausfälle betrieblicher Einrichtungen oder Einrichtungen des Sicherheitssystems. Einwirkungen von innen resultieren aus Ereignissen auf dem Anlagengelände, innerhalb oder außerhalb von Gebäuden, wie z. B. Brände oder anlageninterne Überflutungen. Eine Auflistung und grobe Charakterisierung dieser Einwirkungen findet sich in /SPE 18/ und /STR 20/.

Durch übergreifende Einwirkungen von innen können mehrere Reaktorblöcke bzw. unterschiedliche radioaktive Quellen am Standort redundanzübergreifend beeinträchtigt werden. Sind Einrichtungen verschiedener Reaktorblöcke bzw. unterschiedlicher Radionuklidquellen in einem Gebäude untergebracht, so können beispielsweise ein Brand oder eine anlageninterne Überflutung in diesem Gebäude ggf. sicherheitstechnisch relevante Einrichtungen mehrerer nuklearer Anlagen am Standort beeinträchtigen. Dies gilt auch für übergreifende Einwirkungen von außen. Diese haben ihre Ursache allerdings außerhalb des Anlagengeländes, also außerhalb der Zuständigkeit des Kraftwerksbetreibers, hervorgerufen durch Umgebungsbedingungen, Naturereignisse oder auch zivilisatorisch bedingte Ereignisse. Bei den Einwirkungen von außen unterscheidet man naturbedingte Einwirkungen, die durch Naturereignisse hervorgerufen werden, und zivilisatorische Einwirkungen, welche unfallbedingt durch zivilisationsbedingte Einflüsse außerhalb des Anlagengeländes verursacht sind.

Für die im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten methodischen Erweiterungen und Ergänzungen der PSA stellen die Festlegungen im deutschen Regelwerk zur Durchfüh-

rung von PSA, d. h. dem PSA-Leitfaden /BMU 05/ mit seinen Fachbänden zu PSA-Methoden und -Daten /FAK 05/, /FAK 05a/ und /FAK 16/ die Grundlage dar. Demnach sind Einwirkungen von innen oder außen (Englisch: Hazards), die ein Potenzial für redundanzübergreifende Ausfälle haben, zunächst einleitende Ereignisse, die allein oder in Kombination mit weiteren Einwirkungen bzw. Komponentenausfällen zu auslösenden Ereignissen führen können. Der Methodenband zum PSA-Leitfaden /FAK 05/ definiert einleitende Ereignisse allgemein als *„Störungen an Komponenten und Anlagenteilen, die sich aufgrund der Anlagendynamik oder aufgrund von weiteren Störungen zu einem auslösenden Ereignis entwickeln können ..., z. B. EVI und EVA Ereignisse“*. Der Methodenband zum PSA-Leitfaden /FAK 05/ definiert auslösende Ereignisse verallgemeinert folgendermaßen: *„Für den Leistungsbetrieb werden Störungen und Schäden an Komponenten und Anlagenteilen, die eine Anforderung von Sicherheitssystemen auslösen, als "auslösende Ereignisse" bezeichnet. Im Nichtleistungsbetrieb werden solche Ereignisse als „auslösend“ bezeichnet, bei denen die Systemfunktionen zur Brennelementkühlung nicht im erforderlichen Umfang verfügbar bzw. bei denen die Systemfunktionen zur Reaktivitätskontrolle nicht ausreichend wirksam sind.“*

Mittels des im Vorhaben 4715R01575 von der GRS entwickelten Informationstools in Bezug auf übergreifende Einwirkungen, der *Hazards Library* /SPE 18/ wurden umfassende generische wie anlagenspezifische Informationen zu übergreifenden Einwirkungen von innen wie außen, ebenso wie zu möglichen Einwirkungskombinationen, für eine Nutzung im Rahmen sicherheitstechnischer Bewertungen und insbesondere der PSA bereitgestellt. Diese bibliotheksartig aufbereitete Informationssammlung beinhaltet u. a. detaillierte Informationen zu den unterschiedlichen übergreifenden Einzeleinwirkungen wie ggf. möglichen Einwirkungskombinationen sowie zu einer der standort- und anlagentypbezogenen Festlegung des Spektrums der zu analysierenden übergreifenden Einwirkungen.

Für die verschiedenen, am Standort einer zu untersuchenden Anlage möglichen langandauernden übergreifenden Einwirkungen und Ereigniskombinationen ist zunächst zu ermitteln, zu welchen Auswirkungen diese führen können. Unter Auswirkungen ist hier zu verstehen, welche auslösenden Ereignisse hervorgerufen und welche geforderten Funktionen sicherheitstechnisch relevanter Einrichtungen durch übergreifende Einwirkungen und Einwirkungskombinationen unzulässig beeinträchtigt werden können. So führt beispielsweise das einleitende Ereignis Hochwasser mit Wassereintrag in das Maschinenhaus einer Referenzanlage mit Druckwasserreaktor (DWR) durch die Überflutung der

auf der untersten Gebäudeebene angeordneten Kondensatpumpen während des Betriebszustandes 'Leistungsbetrieb' zum auslösenden Ereignis 'Ausfall Hauptwärmesenke'. Bei verschiedenen Betriebszuständen des Nichtleistungsbetriebs können hingegen bei einem Wassereintrag ins Maschinenhaus, abhängig vom jeweils vorliegenden Betriebszustand, verschiedene Auswirkungen auftreten. Bei einer PSA für übergreifende Einwirkungen (international auch als Hazards PSA bezeichnet) ist daher zu beachten, dass die Auswirkungen in den verschiedenen Anlagenbetriebszuständen unterschiedlich sein können.

Für die zu analysierende Referenzanlage werden für die anlagenspezifisch möglichen Einwirkungen die daraus resultierenden Auswirkungen diskutiert. Diese finden sich beispielhaft in einer Tabelle der erweiterten *Hazards Library* /SPE 18/. Hinsichtlich der Auswirkungen wird unterschieden, ob sich die Intensität einer Einwirkung im Rahmen der Anlagenauslegung bewegt oder ob diese die Anlagenauslegung überschreitet. Auslegungsüberschreitende Zustände können auch eintreten, wenn sich die Einwirkungsintensität im Rahmen der Anlagenauslegung bewegt, aber gleichzeitig Vorkehrungen versagen. Dies könnte beispielsweise der Fall sein, wenn bei einem Bemessungshochwasser Hochwasserschutzmaßnahmen versagen und es dadurch zum Ausfall sicherheitstechnisch relevanter Einrichtungen kommt.

Eine Hazards PSA unterscheidet sich von einer PSA für anlageninterne Ereignisse dadurch, dass sie darüber hinaus alle standort- und anlagenspezifisch relevanten übergreifenden Einwirkungen von innen wie außen sowie Ereigniskombinationen mit solchen Einwirkungen (siehe /MAY 20/, /ROE 17/, /ROE 17a/, /ROE 17b/, /SPE 18/, /STR 20/ und /UTS 19/) systematisch und umfassend berücksichtigt.

Bisher liegen ausgereifte Methoden für detaillierte probabilistische Bewertungen übergreifender Einwirkungen nur für ausgewählte Einwirkungen und Einwirkungskombinationen vor. Dabei handelt es sich entsprechend Methodenband /FAK 05/ zum PSA-Leitfaden für deutsche Anlagen insbesondere um die Einwirkungen von innen 'anlageninterner Brand' und 'anlageninterne Überflutung', die naturbedingten Einwirkungen von außen 'Erdbeben', 'Hochwasser durch Schneeschmelze' und 'Hochwasser durch extreme Niederschläge außerhalb des Anlagengeländes' sowie die zivilisatorischen Einwirkungen von außen 'Unfallbedingte industrielle Explosion' bzw. 'Explosionsdruckwelle' und 'unfallbedingter Flugzeugabsturz in Flugverkehrskorridoren oder Flugzonen', für die teilweise auch Einwirkungskombinationen wie 'Erdbeben mit Folgebrand' mit betrachtet

werden. Für alle anderen Einwirkungen gibt es bisher keine Vorgaben in den Fachbänden zu PSA-Methoden /FAK 05/ und /FAK 16/.

Mit dem Ziel, übergreifende Einwirkungen und Einwirkungskombinationen umfassend und systematisch zu behandeln, wurden von der GRS zunächst im Vorhaben RS1539 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) systematische Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zur methodischen Erweiterung von PSA der Stufe 1 anhand hydrologischer Einwirkungen mit Überflutungspotenzial durchgeführt /ROE 17a/. Im Vorhaben RS1556 des BMWi wurde dann das vollständige Spektrum übergreifender Einwirkungen und Einwirkungskombinationen für eine deutsche Referenzanlage untersucht /MAY 20/.

Für diese Untersuchungen wurde zunächst für den Standort der Referenzanlage ein möglichst umfassendes Spektrum von Ereignissen und Ereigniskombinationen übergreifender Einwirkungen von innen und außen auf Basis des von der GRS entwickelten Informationstools für Untersuchungen übergreifender Einwirkungen *Hazards Library* /ROE 17/, /ROE 17a/, /SPE 18/ ermittelt.

In einem weiteren Schritt erfolgte die Entwicklung eines systematischen, größtenteils automatisierten Screening-Verfahrens und Erarbeitung eines entsprechenden Analysewerkzeugs, dem sogenannten *Hazards Screening Tool* (HST) /STR 20/ zur Reduzierung des ermittelten Ereignisspektrums sowohl von einzelnen übergreifenden Einwirkungen von innen und außen als auch von Einwirkungskombinationen der verschiedenen Kategorien (entsprechend /IAE 21/) auf die für eine Standort-PSA relevanten Ereignisse, die sowohl aufgrund ihrer Eintrittshäufigkeit als auch bezüglich der Auswirkungen auf die Anlage (Kern- und Brennstabschäden, Freisetzung von Radionukliden) nicht zu vernachlässigen sind. Dieses Verfahren und das zugehörige Screeningwerkzeug HST wurden im Vorhaben RS1556 umfassend für einen deutschen Kernkraftwerksstandort mit einem noch im kommerziellen Betrieb befindlichen Reaktorblock, einem Reaktorblock im Rückbau sowie weiteren größeren Quellen von Radioaktivität erprobt.

Die methodischen Aspekte, die für eine PSA für einen Kernkraftwerksstandort mit mehreren Reaktorblöcken sowie zusätzlichen radioaktiven Quellen (z. B. Standortzwischenlager) relevant sind, wurden im Vorhaben 4715R01575 des BMU entwickelt und erprobt /ROE 18/.

Bei der Durchführung einer solchen Site-Level PSA ist u. a. zu beachten, dass bestimmte übergreifende Einwirkungen gleichzeitig in mehreren Reaktorblöcken und anderen Radionuklidquellen an einem Kernkraftwerksstandort zu auslösenden Ereignissen führen können. Bei diesen übergreifenden Einwirkungen kann zwischen solchen unterschieden werden, die immer mehrere Reaktorblöcke und andere Radionuklidquellen unmittelbar betreffen (sogenannte Definite Events) und solchen, bei denen ein auslösendes Ereignis nur unter bestimmten Umständen eintritt (Conditional Events).

- Zu den Definite Events gehören Ereignisse aufgrund übergreifender Einwirkungen, wie z. B. Erdbeben oder weitere Einwirkungen von außen, die zu einer Beeinträchtigung des Kühlwassereinlaufes führen können.
- Unter Conditional Events versteht man Störungen an einem Reaktorblock oder auch an gemeinsam von mehreren Reaktorblöcken oder auch anderen Anlagen am Standort genutzten Einrichtungen, welche sich auch auf benachbarte Blöcke bzw. weitere Radionuklidquellen (d. h. Reaktor oder andere Quellen) am Standort auswirken.

2.2 Einwirkungsscreening für langandauernde Ereignisse

Das Screening für langandauernde Ereignisse infolge übergreifender Einwirkungen unterscheidet sich nicht grundlegend von einem allgemeinen Screening für Einwirkungen, da a priori oftmals nicht klar ist, welche Ereignisse langandauernde Folgen haben. Das von der GRS entwickelte Screeningverfahren wurde im Vorhaben RS1556 für den Referenzkraftwerksstandort bereits in voller Detailtiefe angewendet /MAY 20/. Nachfolgend werden daher nur kurz die Grundzüge des Screeningverfahrens dargestellt und die Anwendung des zur Erleichterung des Screenings entwickelten teilautomatisierten HST /STR 20/ demonstriert.

Das in Abb. 2.1 dargestellte Screeningverfahren umfasst mehrere Schritte des Screenings von Einzeleinwirkungen und Einwirkungskombinationen:

- Identifikationsschritt: Alle prinzipiell am Standort mögliche Einwirkungen werden auf Grundlage sehr übergeordneter Standorteigenschaften, wie z. B., ob der Standort an einer Küste liegt oder nicht, in den Bergen oder im Flachland, identifiziert.
- Qualitatives Screening für Einzeleinwirkungen: Beim qualitativen Screening werden auf Grund lokaler Eigenschaften in der Umgebung des Kraftwerksstandorts weitere

Einwirkungen auf Grund einer detaillierteren Argumentation ausgeschlossen. Dies kann beispielsweise der Ausschluss von Bahntransportunfällen und deren assoziierten Effekten sein, wenn die nächstgelegene Bahnstrecke in zu großer Entfernung zum Standort liegt.

- Quantitatives Screening für Einzeleinwirkungen: Beim quantitativen Screening werden auf Grund quantitativer Kriterien, wie z. B. geringer Eintrittshäufigkeit oder geringer Schadenswahrscheinlichkeit, weitere Einzeleinwirkungen von der Betrachtung ausgeschlossen. Zudem wird nach nur grob und nach detailliert zu untersuchenden Einwirkungen unterschieden.

Aus den nach dem quantitativen Screening der Einzeleinwirkungen verbleibenden Einzeleinwirkungen werden Ereigniskombinationen der nachfolgend genannten drei Kategorien gebildet:

- *Kombinationen kausal verknüpfter Einwirkungen*: Die Folgeeinwirkungen treten unmittelbar als Folge der Ursprungseinwirkungen auf.
 - *Kombinationen korrelierter Einwirkungen*: Die Einwirkungen sind auf Grund einer gemeinsamen Ursache korreliert und treten zusammen auf.
 - *Kombinationen unabhängiger Ereignisse*: Die beteiligten Einwirkungen treten unabhängig voneinander innerhalb einer Zeitspanne, in der sich die Auswirkungen dieser Einwirkungen überlappen, auf.
- Qualitatives und quantitatives Screening von Einwirkungskombinationen: Das Vorgehen erfolgt analog zum Vorgehen beim Screening von Einzeleinwirkungen separat für jede der drei Kategorien von Einwirkungskombinationen.

Als Ergebnis des Einwirkungsscreenings ergeben sich, analog zum Vorgehen in /ROE 18/ und /UTS 19/, dann die folgenden Gruppen von Einwirkungen und Einwirkungskombinationen:

- **L₀**: Liste der von der weiteren Betrachtung in der PSA auszuschließenden Einwirkungen und Einwirkungskombinationen,
- **L_{grob}**: Liste der in der PSA nur grob zu analysierenden Einwirkungen und Einwirkungskombinationen,
- **L_{Detail}**: Liste der in der PSA im Detail zu analysierenden Einwirkungen und Einwirkungskombinationen.

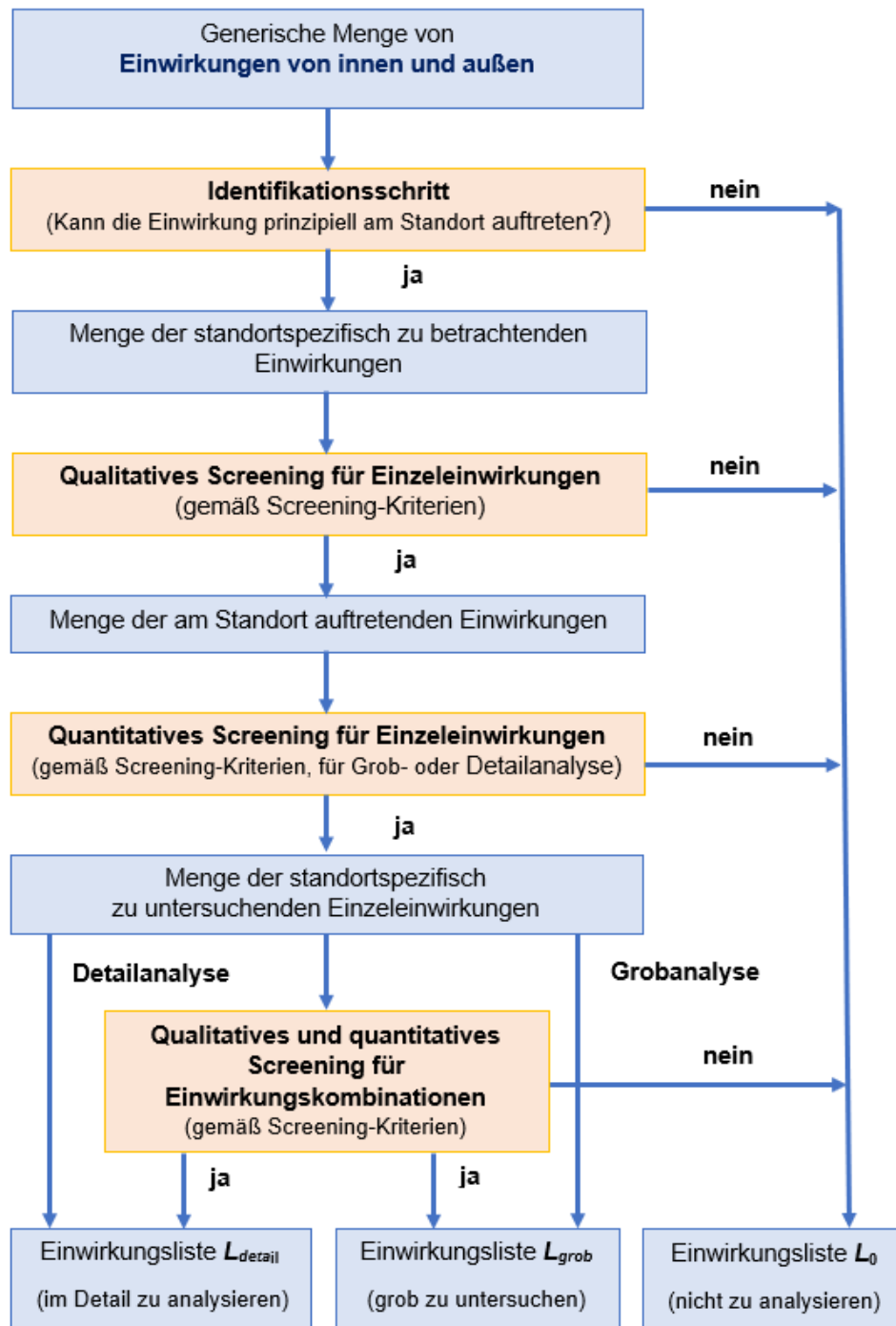


Abb. 2.1 Schematische Darstellung des qualitativen und quantitativen Screeningverfahrens für übergreifende Einwirkungen und Einwirkungskombinationen /MAY 20/

2.2.1 Screening der Einwirkungen und Einwirkungskombination

Das von der GRS entwickelte HST /STR 20/ unterstützt den Anwender beim Screening der Einzeleinwirkungen und Einwirkungskombinationen in systematischer und konsistenter Weise. Mit der Verwendung des HST wird der Nutzer systematisch durch alle Schritte des Screenings geführt und dabei unterstützt. Screening-Protokolle für die einzelnen Schritte werden automatisiert erstellt. Das rechnerunterstützte Screening mindert die Fehleranfälligkeit des Screenings und erzwingt ein systematisches Vorgehen.

Nachfolgend finden sich in den Abbildungen Abb. 2.2 bis Abb. 2.4 beispielhafte Anwendungen des HST.

Durch Verwendung des HST werden Screening-Entscheidungen automatisiert protokolliert und eine Begründung erzwungen. Dies fördert die Nachvollziehbarkeit des Screening-Prozesses und erleichtert die Dokumentation erheblich.

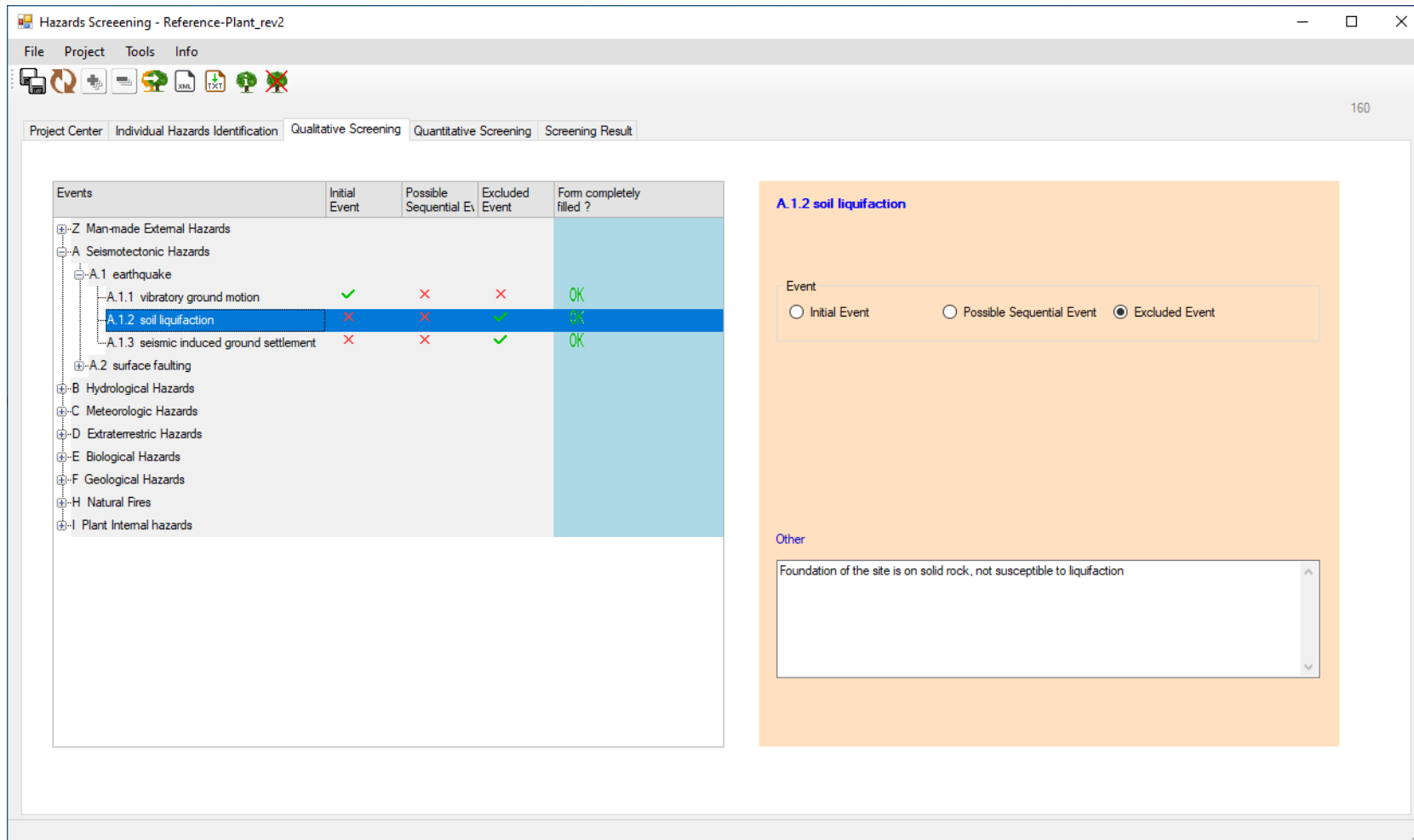


Abb. 2.2 HST – vom Ersteller der Analyse eingegebene Begründung für den Ausschluss einer Einwirkung im qualitativen Screening

Hazards Screening - Reference-Plant_rev2

File Project Tools Info

Project Center Individual Hazards Identification Qualitative Screening Quantitative Screening Screening Result

Events	Detailed Analysis	Rough Analysis	Quantitative excluded	Form completed?
[-] Z Man-made External Hazards				
[-] A Seismotectonic Hazards				
[-] B Hydrological Hazards				
[-] B.1 flooding				
[-] B.1.1 rapid development				
[-] B.1.1.1 flash flood	×	×	✓	OK
[-] B.1.1.3 Ice flood	×	×	✓	OK
[-] B.1.1.4 failure of water-retaining struct.	×	×	✓	OK
[-] B.1.1.5 blockage of rivers downstream	×	×	✓	OK
[-] B.1.2 slow development (forecast possible)				
[-] B.1.2.2 riverine flood	✓	×	×	OK
[-] B.3 local precipitation				
[-] C Meteorologic Hazards				
[-] D Extraterrestrial Hazards				
[-] E Biological Hazards				
[-] F Geological Hazards				
[-] I Plant Internal hazards				

B.1.1.5 blockage of rivers downstream
Blockage of rivers by flotsam or floating ice

☐ Detailed Analysis
 ☐ Rough Analysis
 ☒ Quantitative Excluded

☐ Hazard Occurrence Frequency threshold value $\leq 1E-6$
☐ Core Damage Frequency threshold value $\leq 1E-8$
☐ Fuel Damage Frequency threshold value $\leq 1E-7$

Justification

The river is regulated by locks. The locks are regularly checked for flotsam and floating ice. Massive ingress of floating material to block the river is practically excluded.

Abb. 2.3 HST – Beispielhafte Begründung für einen Ausschluss einer Einwirkung im quantitativen Screening

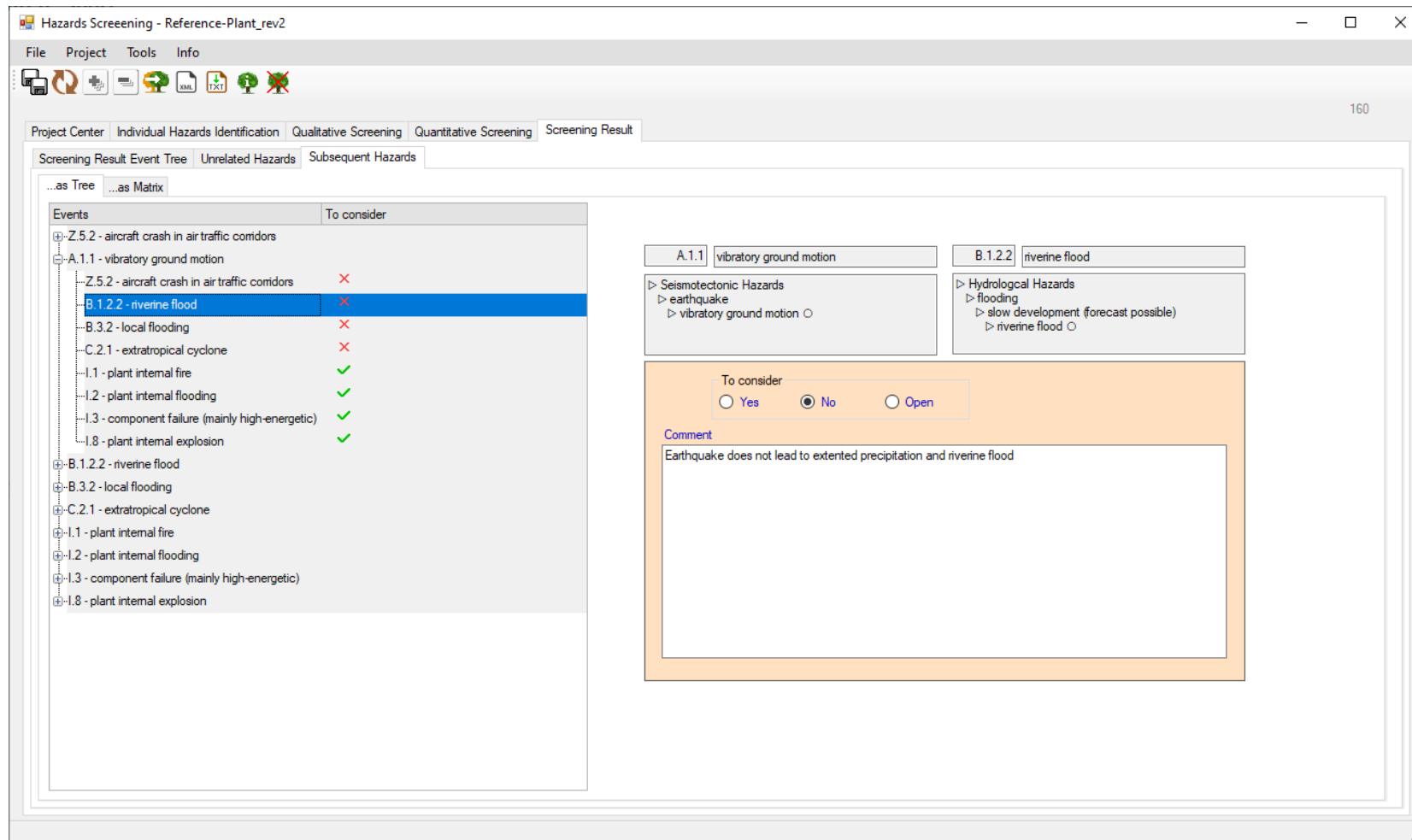


Abb. 2.4 HST – beispielhafte Begründung für den Ausschluss von Kombinationen kausal abhängiger Einwirkungen von der weiteren Betrachtung

2.2.2 Ergebnisse des Einzeleinwirkungsscreenings für die Referenzanlage

Für die zu untersuchende Referenzanlage und deren Standort verbleiben gemäß /MAY 20/ nach dem quantitativen Screening der Einzeleinwirkungen die folgenden Einzeleinwirkungen für eine weitere Detail- oder Grobanalyse:

- Detailanalyse für ‘Bodenerschütterung durch Erdbeben’ (A.1.1):
Die Referenzanlage ist gegen Erdbeben ausgelegt. Bodenerschütterungen durch auslegungsüberschreitende Erdbeben können jedoch schwerwiegende und langandauernde Folgen für die Anlage haben und sind dementsprechend detailliert zu analysieren.
- Detailanalyse für ‘Flusshochwasser’ (B.1.2.2):
Ein Flusshochwasser kann durch Schneeschmelze oder Regenfälle verursacht werden. Die Referenzanlage ist gegen ein Bemessungshochwasser ausgelegt. Bei auslegungsüberschreitenden Ereignissen sind jedoch einige zusätzliche Einwirkungspfade und längere Zeitdauern zu unterstellen. Die Einwirkung ist daher detailliert zu analysieren.
- Grobanalyse für ‘lokale Überflutung’ (B.3.2):
Extreme Niederschlagsereignisse haben am Referenzstandort ein deutlich geringeres Schadenspotenzial als die andere, nach dem Screening verbliebene hydrologische Einwirkung B.1.2.2 (Flusshochwasser), eine grobe probabilistische Abschätzung ist dementsprechend ausreichend.
- Grobanalyse für ‘Sturmtief’ (C.2.1):
Die Referenzanlage verfügt über eine robuste Auslegung gegen Starkwindereignisse und ein Konzept zur Ergreifung präventiver Maßnahmen bei entsprechenden Starkwindwarnungen durch den Deutschen Wetterdienst (DWD). Aufgrund des zwar nicht vollständig zu vernachlässigenden, jedoch immer noch vergleichsweise geringen Schadenspotenzials ist eine grobe probabilistische Abschätzung ausreichend.
- Grobanalyse für ‘Flugzeugabsturz aus Flugkorridor’ (Z.5.2):
Unfallbedingte Flugzeugabstürze sind aufgrund der mittlerweile nahezu nicht mehr vorhandenen festen Flugkorridore und der hohen Verkehrsdichte ziviler Flüge nicht vollständig auszuschließen. Eine entsprechend robuste Auslegung der Anlage ist dementsprechend erforderlich. Im Rahmen des nationalen Stresstests wurden für den Standort der Referenzanlage grobe probabilistische Abschätzungen für derartige Szenarien durchgeführt, die (vgl. /SPE 18/) aufzeigen, dass deren Beiträge zur

Häufigkeit von Kern- oder Brennstabschäden so gering sind, dass eine detaillierte probabilistische Analyse nicht erforderlich ist.

– Detailanalyse für ‘anlageninternen Brand’ (I.1):

Die Referenzanlage ist grundsätzlich gegen anlageninterne Brände entsprechend KTA2101.1 /KTA 15/ ausgelegt. Aufgrund des potenziellen Schadensausmaßes, der nicht zu vernachlässigenden Häufigkeit von Entstehungsbränden und den potenziell langandauernden Folgen insbesondere auslegungsüberschreitender Brandszenarien längerer Dauer ist diese Einwirkung jedoch nicht auszuschließen und dementsprechend detaillierte probabilistische Brandanalysen nach /FAK 05/ und /FAK 16/ durchzuführen.

– Detailanalyse für ‘anlageninterne Überflutung’ (I.2):

Die Referenzanlage ist grundsätzlich ebenso wie gegen anlageninterne Brände auch gegen anlageninterne Überflutungen ausgelegt. Aufgrund des potenziellen Schadensausmaßes, der nicht zu vernachlässigenden Häufigkeit anlageninterner Überflutungen und den potenziell langandauernden Folgen insbesondere auslegungsüberschreitender Überflutungsszenarien längerer Dauer ist diese Einwirkung jedoch nicht auszuschließen. Dementsprechend sind detaillierte probabilistische Analysen für anlageninterne Überflutungen nach /FAK 05/ und /FAK 16/ durchzuführen.

– Grobanalysen für ‘Komponentenversagen (auch hochenergetisch)’ (I.3) und ‘anlageninterne Explosion’ (I.8):

Für die Einwirkungen I.3 ‘Komponentenversagen (auch hochenergetisch)’ und I.8 ‘anlageninterne Explosion’ zeigen probabilistische Grenzabschätzungen, dass diese in der Referenzanlage aufgrund der Auslegung der Anlage und damit auch der Komponenten nach geltendem kerntechnischen Regelwerk (u. a. KTA 2103 /KTA 15a) zwar nicht aufgrund ihrer Eintrittshäufigkeit auszuschließen sind, grobe probabilistische Analysen aber bereits ausreichen, um die geringen Schadenshäufigkeiten zu quantifizieren. Detaillierte Ereignisablauf- und Fehlerbaumanalysen sind somit nicht erforderlich.

Aus diesen Einwirkungen wurden im Folgenden langandauernde Ereignisse aufgrund von zwei Einzeleinwirkungen – Erdbeben und Hochwasser – sowie langandauernde Ereigniskombinationen, die diese Einwirkungen beinhalten, einer näheren Betrachtung unterzogen.

2.3 Zu unterstellende Randbedingungen für die identifizierten übergreifenden Einwirkungen

Die Betriebserfahrung ist kennzeichnend für den Betriebsablauf technischer Einrichtungen und vermittelt einen wesentlichen Erfahrungsrückfluss zur Beurteilung und Bewertung des Anlagenverhaltens als Reaktion auf betriebliche Störungen und im Betrieb aufgetretene Ereignisse aufgrund übergreifender Einwirkungen.

Bei probabilistischen Analysen ist als eine Informationsquelle für die sicherheitstechnische Bewertung die Betriebserfahrung heranzuziehen. Die gesamte deutsche Betriebserfahrung mit meldepflichtigen Ereignissen in Kernkraftwerken ist in der Datenbank VERA der GRS dokumentiert, internationale Ereignisse sind im Incident Reporting System (IRS) der IAEA /IAE 17/ erfasst. Im Folgenden wird beispielhaft auf Ereignisse mit Überflutungspotenzial von Einrichtungen des Standorts aufgrund von hydrologischen Einwirkungen (von innen wie außen) eingegangen, anhand derer die Notwendigkeit zur Durchführung einer Standort-PSA zur Abschätzung des Standort-Risikos bedingt durch übergreifende Einwirkungen von innen oder außen aufgezeigt wird.

Nachfolgend sind Beispiele aus der Betriebserfahrung zu langandauernden übergreifenden Einwirkungen von innen wie außen aufgeführt. Dabei wurde Bezug zu hydrologischen Einwirkungen von innen, also anlageninterne Überflutungen, sowie zu hydrologischen Einwirkungen von außen mit Überflutungspotenzial genommen, da anhand dieser Einwirkungen detaillierte Erweiterungen einer Standort-PSA für einen Referenzstandort erprobt werden sollten. Informationen zu anderen übergreifenden Einwirkungen finden sich im Anhang zu dem im Vorhaben RS1556 erstellten Fachbericht /MAY 20/ sowie dem Handbuch für das HST /STR 20/.

2.3.1 Betriebserfahrung zu hydrologischen Einwirkungen von innen

Die Betriebserfahrung aus Kernkraftwerken belegt, dass anlageninterne Überflutungen bei allen Anlagenbetriebszuständen und aufgrund verschiedenster Ursachen auftreten können. Die Berücksichtigung von Erfahrungen mit solchen Ereignissen aus dem Betrieb kerntechnischer Anlagen ist aus sicherheitstechnischer Sicht wesentlich, da durch die Auswertung der nationalen und internationalen Betriebserfahrung sichergestellt wird, dass die generische Bedeutung konkreter Befunde und Vorkommnisse bewertet und ggf. entsprechende Überprüfungen und Abhilfemaßnahmen anlagenspezifisch veranlasst werden.

Anlageninterne Überflutungen in Kernkraftwerken können durch Eigenversagen oder einwirkungsbedingtes Folgeversagen von Rohrleitungen wasserführender Systeme oder durch Freisetzungen des verfügbaren Wasserinventars, das für die jeweiligen Anforderungsfälle systemintern verfügbar ist, verursacht werden. Des Weiteren können Fehlbedienungen von Systemkomponenten bzw. Systemen oder deren Fehlfunktion anlageninterne Überflutungen bedingen. Bedeutend im Hinblick auf anlageninterne Überflutungen sind dabei jene Ereignisse, bei denen aufgrund anlagenspezifischer Sachverhalte Anlagegebäude mit Komponenten von Sicherheitssystemen überflutet werden und wo bei Freisetzung großer Wassermengen ein redundanzübergreifender Verlust von Systemfunktionen grundsätzlich möglich ist. Weiterhin sind auch diejenigen Ereignisse von Bedeutung, die aufgrund fehlender Überflutungsschutzmaßnahmen oder durch Wassereinträge mit Systembeeinträchtigungen zu auslösenden Ereignissen führen können.

Allerdings ist anzumerken, dass sich übergreifende anlageninterne Einwirkungen meist auf den Ort ihres Entstehens auswirken und somit in den meisten Fällen keine Beeinträchtigung der weiteren Anlagen des Standorts darstellen. Beispielhaft werden nachfolgend einige Ereignisse mit langandauernden übergreifenden anlageninternen Einwirkungen zusammenfassend dargestellt, wodurch mehrere Anlagen am Standort betroffen waren. Derartige Ereignisse sind insbesondere dann möglich, wenn Systemkomponenten und Systeme von mehreren Anlagen gemeinsam genutzt werden.

2.3.2 Betriebserfahrung zu hydrologischen Einwirkungen von außen

Die bei der Auswertung der Betriebserfahrung aus Kernkraftwerken ermittelten, nachfolgend aufgeführten hydrologischen Ereignisse und Ereigniskombinationen zeigen die Notwendigkeit auf, spezielle Sicherheitsbewertungen, insbesondere probabilistische Analysen unter Berücksichtigung möglicher Kombinationen externer Naturgefahren mit anderen zu unterstellenden Ereignissen, darunter Einwirkungen von außen mit möglichen Auswirkungen auf sicherheitstechnisch relevante SSC durchzuführen. Ein typisches Beispiel für eine derartige, im Detail zu analysierende Ereigniskombination ist ein durch Kurzschluss ausgelöster Brand, der aufgrund von eindringendem Wasser in die Räume mit elektrischen Systemkomponenten bei einer Anlagenüberflutung eintreten kann. Auch werden durch die Untersuchung solcher Ereignisse exemplarisch spezifische Schwächen in der Anlagenauslegung, Mängel in der ereignisorientierten Betriebsführung und in der Instandhaltungspraxis aufgezeigt. Außerdem waren bei einigen Er-

eignissen umfangreichere Überschwemmungen des Anlagengeländes und von Anlagegebäuden möglich, die auch zur langandauernden Nichtverfügbarkeit von Sicherheitssystemen führen können. Solche Szenarien sollten daher im Hinblick auf ggf. zusätzliche Beiträge zum Risiko in der PSA für übergreifende Einwirkungen berücksichtigt werden.

2.3.3 Einwirkungen von außen an Fluss- und Küstenstandorten durch Vereisung im Kühlwassereinlaufbauwerk bei extrem niedrigen Umgebungstemperaturen

Die Betriebserfahrung aus Kernkraftwerken belegt, dass es an verschiedenen Standorten an Flussläufen und Küstenstandorten in Folge extrem niedriger Umgebungstemperaturen zur Vereisung in den Kühlwassereinlaufbauwerken gekommen ist. So kam es bei einigen Ereignissen durch Eisbildung im Kühlwasser trotz ergriffener Gegenmaßnahmen zur teilweisen Verblockung im Kühlwassereinlaufbauwerk, was zu einem fallenden Füllstand auf der Pumpen-Saugseite (zunehmenden Differenz zwischen Flusswasserstand und Wasserstand im Pumpenstation-Einlauf) und in Folge zur Abschaltung der Pumpen führte. Daraus resultierte ein Druckanstieg im Kondensator mit nachfolgender Turbinenschnellabschaltung (TUSA) und Verblockung der Umleitstation, was zum Ausfall der Hauptwärmesenke und einer Reaktorschnellabschaltung (RESA) führte. Bei vergleichbaren Ereignissen in Anlagen anderer Standorte konnten durch ergriffene Gegenmaßnahmen zur Eisbeseitigung Pumpenabschaltungen vermieden werden (potenzieller Ausfall der Hauptwärmesenke). Derartige Ereignisse können lang andauernd sein, wenn die Umgebungstemperaturen lange Zeit extrem niedrig sind.

2.3.4 Überflutung durch extremen Anstieg des Meeresspiegels

Erfahrungen mit Überflutungen infolge eines extremen Meeresspiegelanstiegs treffen insbesondere auf Küstenstandorte zu. So kam es zum Beispiel in skandinavischen Anlagen durch das Zusammenwirken meteorologischer und ozeanographischer Einwirkungen zu einem extremen Anstieg des Meeresspiegels auf Rekordhöhen. An einem der Standorte kam es dabei infolge einer Sturmflut in Verbindung mit einem zusätzlichen Fehler im Drainagesystem eines Reaktorblocks und den konstruktiven Gegebenheiten zum Wassereintrag ins Reaktorgebäude. Dadurch bedingt wurde automatisch die Reaktorschnellabschaltung und der Durchdringungsabschluss ausgelöst, damit lag der Ausfall der Hauptwärmesenke vor. Des Weiteren war ein Potenzial sowohl für redundanz-

übergreifende Ausfälle (GVA) als auch für eine Beeinträchtigung von Sicherheitssystemen im Anforderungsfall gegeben.

An einem anderen skandinavischen Küstenstandort wurde durch eine Reihe zufällig gleichzeitig aufgetretener meteorologischer und ozeanographisch bedingter Einflüsse wie Wind, Luftdruckschwankungen, Gesamtwasservolumen in der Ostsee und Seiche (stehende Wasserwellen im Meer, Buchten, Golfen, Seen oder Flüssen, die entstehen, wenn von Ufer, Dämmen usw. reflektierte Wellen in Resonanz mit ankommenden Wellen liegen) ein außergewöhnlicher Anstieg des Meeresspiegels hervorgerufen. An dem betroffenen Anlagenstandort wurden daraufhin präventive Maßnahmen ergriffen, die diesem Risiko Rechnung tragen, so dass sich Überflutungen und Wassereinträge in die Anlagengebäude am Standort vermeiden lassen. Der Meeresspiegel an der Anlage erreichte + 1,73 m. Entsprechend Betriebshandbuch wäre bei + 1,75 m ein Notstandsfall zu erklären gewesen, die Blöcke des Standorts hätten abgefahren werden müssen. Unter Umständen kann es durch die Überflutung eines Anlagengeländes zu langandauernden Ereignissen kommen, beispielsweise zu einem Notstromfall.

Aus den Ereignissen ist ersichtlich, dass insbesondere Kombinationen verschiedener Einwirkungen von außen oder Kombinationen solcher Einwirkungen von außen mit zusätzlichen anlagenspezifischen Fehlern eine nicht zu vernachlässigende Bedeutung im Hinblick auf das Risiko durch dadurch verursachte langandauernde auslösende Ereignisse zukommen kann, die in einer PSA für langandauernde Ereignisse berücksichtigt werden sollten.

2.3.5 Eindringen von Pflanzenresten und Sedimenten in die Kühlwasserversorgung eines Kernkraftwerks

Im Frühjahr 2009 führten ungünstige Kühlwasserbedingungen mit schlechter Kühlwasserqualität in einer französischen Mehrblockanlage mit je zwei Doppelblock-Druckwasserreaktoren (DWR) zu einer Reihe von Pumpenabschaltungen im CWS (circulating water system). Die Abschaltungen der CWS-Pumpen wurden durch das Signal 'Druckverlust über die Siebtrommeln hoch' ausgelöst. Der hohe Druckverlust wurde durch die Verstopfung der Siebtrommeln in Folge des massiven Eindringens von biologischen Ablagerungen und Sedimenten aus dem Fluss verursacht /IAE 17/. Das Kernkraftwerk befindet sich an einer Flussmündung an der Atlantikküste, die vier DWR-Blöcke von je

900 MW_e werden über einen offenen Kühlkreislauf mit dem Fluss als Hauptwärmesenke rückgekühlt.

In drei Fällen verursachte die Abschaltung der Pumpen die Reaktorschnellabschaltung, die Turbinenschnellabschaltung und den Verlust des Kondensators (Ausfall der Hauptwärmesenke). Die Verstopfungen der Siebtrommeln waren ursächlich auf das Eindringen von biologischen Ablagerungen (Pflanzen, verwesenden Blättern usw.) und Sedimenten aus dem Fluss zurückzuführen, die im Flusswasser mitgeführt und in die Kühlwasserversorgung des Kernkraftwerks eingebracht wurden. Größere Mengen an Pflanzenresten und Sedimenten in der Mündung des Flusses sind im frühen Frühjahr keine Seltenheit. Eine Ausnahmesituation im Jahr 2009 bestand jedoch darin, dass eine Kombination aus mehreren Ereignissen im gleichen Zeitraum zu Bedingungen führte, die mit den vorhandenen Betriebsabläufen nicht beherrschbar waren. Die Ereignisse im Vorfeld, die zu diesen Bedingungen geführt haben, waren wie folgt:

- Überflutungen an zwei vom Kernkraftwerksstandort flussaufwärts gelegenen Nebenflüssen Anfang des Jahres 2009, wobei Sedimente freigesetzt und mitgetragen wurden, die sich seit der letzten Flut im Jahr 2004 dort akkumuliert hatten;
- Ein schwerer Sturm und eine Flut mit einer Höhe von 6,50 m (normales Niveau: 6,00 m) im Februar 2009, wobei das Ufer überschwemmt wurde. Dabei kam es zu erheblichen Wiederfreisetzungen von dort angesammelten biologischen Ablagerungen und Sedimenten, so dass mit dem Flusswasser mehr Vegetationsbestandteile und Treibgut als üblich in die Pumpstation des Kernkraftwerks verbracht wurde.
- Nicht wie vorgesehen durchgeführte Ausbagger-Arbeiten des Flussbettes in der Umgebung um das Wasser-Einlaufbauwerk des Kernkraftwerks.

Die Ereignisabläufe nach den Reaktorschnellabschaltungen verliefen auslegungsgemäß. Es ist allerdings festzuhalten, dass die Verstopfung der Siebtrommeln, die zu den Reaktorschnellabschaltungen geführt haben, auch zu einem Totalausfall der Hauptwärmesenke hätten führen können, ggf. auch für lange Zeiträume. Dies hätte zu einer Erhöhung des Risikos für Kernschäden in einem oder mehreren Blöcken des Kernkraftwerks führen können.

Die Ereignisse zeigen, dass es sinnvoll und zielführend sein kann, in PSA langandauernde naturbedingte Einwirkungen in Kombinationen mit deren potenziellen Auswir-

kungen auf die Sicherheitssysteme von Kernkraftwerken in die Risikobetrachtungen mit einzubeziehen.

2.4 Allgemeine Voraussetzungen zur Beschreibung langandauernder Ereignisse

2.4.1 Schutzmaßnahmen in der Referenzanlage und anderen Standort

Eine schematische Skizze des Standorts des Referenzkernkraftwerks und dessen direkten Umgebung findet sich in der nachfolgenden Abb. 2.5. Die für die Analyse wesentlichen Gebäude und Einrichtungen sind entsprechend ihrer Lage gekennzeichnet und farblich markiert. Bei dem Referenzstandort handelt es sich um einen Standort mit zwei Reaktorblöcken, von denen ein Block im kommerziellen Betrieb ist, während sich der zweite Reaktorblock bereits im Rückbau befindet. Weiterhin befinden sich am Standort noch weitere größere Radionuklidquellen, wie ein Standortzwischenlager und eine nukleare Abfallbehandlungsanlage. In der Abbildung ist jedoch nur der zu untersuchende, in Betrieb befindliche Reaktorblock dargestellt.

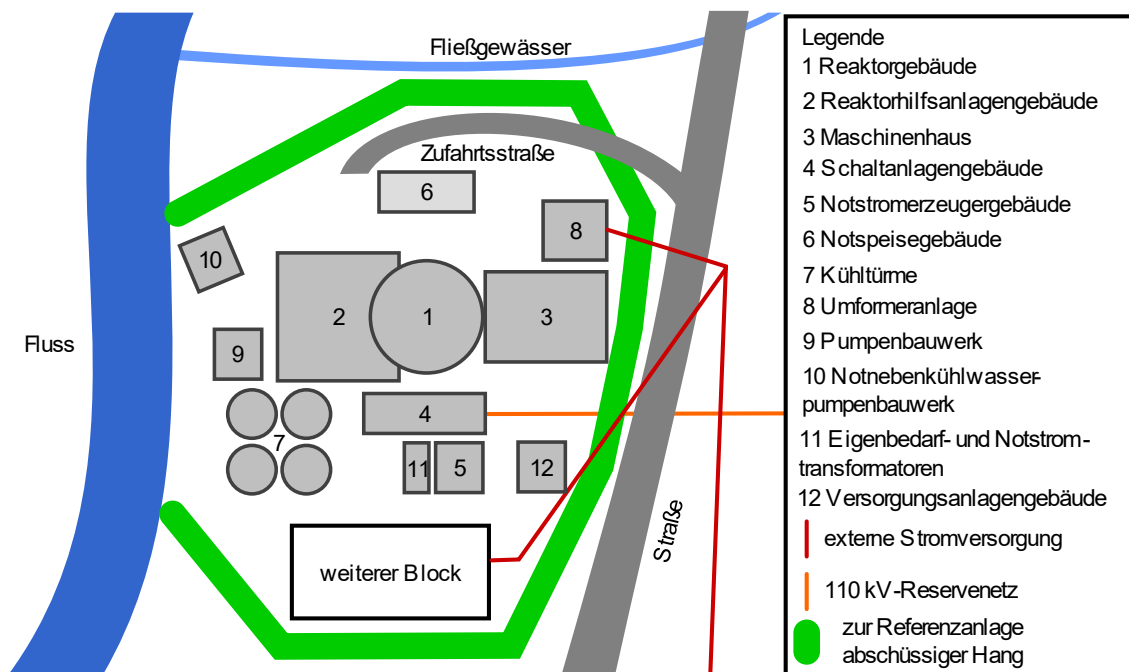


Abb. 2.5 Schematische Skizze des Referenzkraftwerksblocks und seiner direkten Umgebung

Nachfolgend wird anstelle des realen Wasserstandes (Angabe in m über Normal-Null (üNN)) ein relativer Wert (die sogenannte Höhenkote) zum normalen Wasserstand (Flusspegel) am Einlaufbauwerk der Referenzanlage verwendet, welcher den zusätzlichen Anstieg über den „Normalwasserstand“ des Flusses hinaus repräsentiert. Dieser Wert ist nicht mit der Überflutungshöhe über dem sogenannten Kraftwerks-Null, d. h. dem Wasserstand oberhalb des Kraftwerksgeländes gleichzusetzen.

Am Standort besteht ein nicht unerhebliches Gefälle des Geländes in Richtung des Referenzkraftwerksblocks.

Bei Leistungsbetrieb der Anlage befinden sich in der Warte mindestens fünf Personen pro Schicht (ein Schichtleiter, zwei Schichtleiter-Stellvertreter, und zwei Reaktorfahrer).

Typisch für Kernkraftwerke in Deutschland gibt es eine professionelle Werkfeuerwehr am Anlagenstandort. Bei der Referenzanlage besteht diese aus einer ständigen Löschgruppe von neun Personen sowie ca. 40 weiteren Personen im Tagdienst bzw. Personen, die per Sammelalarm abrufbereit sind (siehe dazu /ROE 17a/, S. 204 und /BHB 19a/, S. 9) und sich an der Brandbekämpfung beteiligen können.

Die Stromversorgung der Referenzanlage wird im Normalbetrieb über eine doppelte Anbindung an das externe Netz mittels einer 400 kV-Freiluftschaltanlage sichergestellt. Bei deren Ausfall wird die Stromversorgung über einen 110 kV-Reservenetzanschluss mit Reservetransformator (vgl. /KKW 12/, S. 2 – 18) gewährleistet. Beim Letzterem erfolgt die Einspeisung vorrangig über eine Kabelverbindung oder als dritte Netzeinspeisung über eine Freileitung zu einer in der Nähe befindlichen 110 kV-Sammelschiene.

In Bezug auf die Einwirkung von außen ‘Flusshochwasser’ sind Hochwasserschutzmaßnahmen, die Notstromversorgung sowie die organisatorische Unterstützung der betrieblichen Führung vorgesehen.

2.4.1.1 Vorgesehene Schutzmaßnahmen bei Hochwasser

Die in Tab. 2.1 aufgeführten Gebäude der Referenzanlage sind entsprechend /KKW 09a/, Kap. 5.3.3 bis zur Schutzhöhe bei einem Wasserstand von 3,50 m durch permanente bauliche bzw. temporäre Maßnahmen (z. B. Hochwasserschotte, s. u.) gegen externe Hochwasser geschützt. Die Schutzmaßnahmen, auch das Anbringen von Hochwasserschotten als temporären Schutz, sind (siehe Tab. 2.2) im Betriebshandbuch

(BHB) zusammengefasst /BHB 19/. Die für den Schutz des viersträngigen D1-Notstromerzeugergebäudes vorhandenen schwenkbaren Hochwasserschotte an den Eingangs-türen der räumlich voneinander getrennten Redundanzen lassen sich in der Referenz-anlage auch ohne Unterstützung der Werkfeuerwehr innerhalb kürzester Zeit (d. h. innerhalb weniger Minuten) durch Schichtpersonal verschließen. Für das Anbringen sämtlicher Hochwasserschotte benötigt die Werkfeuerwehr insgesamt etwa drei Stun-den /ROE 18/. Dazu muss das Personal auf dem Anlagengelände bewegungsfähig sein, dies ist bis zu einer Überflutungshöhe von 1,00 m möglich. Aufgrund der anzunehmen-den langsamen Entwicklung eines Hochwassers verbleibt eine ausreichende Zeit-spanne, um die Schutzmaßnahmen durchzuführen. Nach der Schutzmaßnahme „Abfah-ren der Anlage“ bei einem über 2,00 m erhöhten Flusswasserstand befindet sich die Referenzanlage entweder im Anlagenzustand ‘unterkritisch, heiß’ oder ‘unterkritisch, kalt’ mit einer Nachkühlung über die Sekundärseite bzw. über das Nachkühlsystem. Für die Nachkühlung sind die in Tab. 2.3 aufgelisteten Systeme erforderlich. Bis zu einem 3,50 m erhöhten Flusswasserstand ist nicht vom Verlust der D1-Notstromversorgung auszugehen, da sowohl die Notstromerzeugergebäude als auch die Transformatoranla-gen des D1-Netzes ausreichend geschützt sind.

Tab. 2.1 Schutz von Gebäuden vor Hochwasser

Bauliche Anlagenteile	Bauliche Maß-nahmen	Temporäre Schutzmaßnahmen
Reaktorgebäude	x	
Reaktorhilfsanlagegebäude	x	x
Schaltanlagegebäude	x	
Notstromerzeugergebäude	x	x
Notspeisegebäude	x	
Notnebenkühlwasserpumpenbauwerk	x	
Zellenkühler 1 – 4 (Nebenkühlwasser)	x	
Pumpenbauwerk 1 – 4 (Nebenkühlwasser)	x	
Kanäle zwischen Notspeise- und Reaktorge-bäude	x	
Kanäle zwischen Notstromerzeuger- und Schalt-anlagegebäude	x	
Lager für radioaktive Abfälle		x
400 kV-Schaltheis		x
110 kV-Schaltheis		x
Maschinenhaus	–	–
Versorgungsanlagegebäude	–	–

Bauliche Anlagenteile	Bauliche Maßnahmen	Temporäre Schutzmaßnahmen
Eigenbedarfstransformatoren (außerhalb Notstromerzeugergebäude)	x	
Notstromtransformatoren (außerhalb Notstromerzeugergebäude)	x	

Tab. 2.2 Maßnahmen bei Hochwasser laut Betriebshandbuch der Referenzanlage

Wasserstand Pegel	Maßnahmen
0,00 m	Kontakt mit Schichtleiter des Referenzkraftwerksblocks halten
	Zugspindelschieber in der Regenwasserpumpengrube schließen
1,00 m	Betriebsbereitschaft aller Notstrom- und Notspeisediesel herstellen
	Revisionsarbeiten unterbrechen
	alle transportablen Pumpen in der Werkstatt bereit stellen
	Pumpensümpfe regelmäßig kontrollieren
2,00 m	Abfahren der Anlage auf Zustand 'unterkritisch kalt'
	Nachkühlbetrieb / Notnachkühlbetrieb /KKW 11b/, S. 89
	Anbringen der Hochwasserschotte durch die Feuerwehr bzw. das Schichtpersonal: - LKW-Schleuse im Reaktorhilfsanlagengebäude - Türen und Tor des Lagers für radioaktive Abfälle - Türen des 400 kV-Schalthauses - Türen des 110 kV-Schalthauses - Türen im Notstromerzeugergebäude (durch Schichtpersonal) - Sicherung des Doku-Raums im Büro- und Sozialtrakt

Tab. 2.3 Für die Notnachkühlkette erforderliche Systeme in der Referenzanlage

System	Gebäude	Redundanz	Höhenkote
Notnachkühlsystem	Reaktorgebäude-Ringraum	10/40	4,50 m
Notzwischenkühlsystem	Reaktorgebäude-Ringraum	10/40	4,50 m
gesichertes Notnebenkühlwassersystem	Notnebenkühlwasserpumpenbauwerk	50/80	4,00 m
Notspeisenotstromversorgung	Notspeisegebäude	50/80	5,60 m

Für extrem unwahrscheinliche, aber dennoch denkbare, auslegungsüberschreitende Hochwasserereignisse (mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit von $< E-05$ pro Jahr) und einem Wasserstand von bis zu 4,00 m über dem „Normalwasserstand“ des Flusses, was einer Überflutungshöhe von 0,50 m über der Schutzhöhe der Referenzanlage entspricht,

sind weitere Schutzmaßnahmen vorgesehen, wie sie im Bericht zur Sicherheitsüberprüfung der Referenzanlage nach Fukushima beschrieben werden. Bei solchen Hochwasserereignissen ist ebenfalls von ausreichender Vorwarnzeit auszugehen. Entsprechend wird die Notsteuerstelle rechtzeitig mit Personal besetzt. Das Reaktorgebäude sowie das Notspeisegebäude bleiben verfügbar. Allerdings dringt Wasser in das D1-Notstromdieselgebäude ein, was zu einem Ausfall der D1-Notstromversorgung führt. Die D2-Notstromdiesel werden nicht beeinträchtigt und stellen die Stromversorgung für sicherheitstechnisch relevante Systeme und damit für die vitalen Funktionen der Anlage sicher. Bei der Analyse des Hochwasserereignisses durch den Betreiber der Referenzanlage wurden außerdem folgende Feststellungen getroffen:

- *„...Notwendige Schalthandlungen können über die Notsteuerstelle vorgenommen werden.*
- *Handmaßnahmen zur Verbindung von Notspeisebecken oder zum Stoppen und Starten von D2-Dieseln können ebenfalls vorgenommen werden.*
- *Die Deionatvorräte reichen in diesem Zustand für mehr als 40 h, die Kraftstoffvorräte noch deutlich darüber hinaus, sodass ein Nachtanken nicht erforderlich ist. ...“.*

Ein Hochwasser mit einem Wasserstand von bis zu 4,00 m wird somit beherrscht, sofern ausreichende Deionatvorräte und Kraftstoffvorräte verfügbar sind.

Weiterhin ist nach Aussage des Betreibers (in /KKW 09a/, S. 5 – 6) bei einer unterstellten Überflutung des Schaltanlagegebäudes die Nachwärmeabfuhr aus dem Reaktorkern durch die Dampferzeuger-Notbespeisung mit Deionat unter Einsatz einer mobilen Feuerlöschpumpe für einen langen Zeitraum möglich.

2.4.1.2 Vorgesehene Schutzmaßnahmen bei einem Erdbeben

Die in Tab. 2.4 dargestellten Gebäude der Referenzanlage sind bis zu einer maximalen Bodenbeschleunigung (peak ground acceleration, PGA) von 170 cm/s², bzw. einer Erdbebenintensität nach EMS¹-Skala von I > VIII durch bauliche Maßnahmen gegen Erdbe-

¹ In Mitteleuropa wurde für die Erdbeben-Intensität historisch meist die MSK-Skala verwendet. Diese wurde inzwischen durch die EMS-Skala ersetzt. Die beiden Skalen unterscheiden sich im Detail hinsichtlich der Kriterien, anhand derer eine Intensitätsstufe festgelegt wird. Für alle praktischen Zwecke sind die resultierenden Intensitätsstufen jedoch identisch. Daher wird in diesem Bericht durchgehend die aktuelle EMS-Skala verwendet.

ben geschützt. Zusätzlich wurden die Dauer der größten Bodenbeschleunigung mit 8 s und die größte anzunehmende Oberflächenwellenmagnitude $M_S = 5,6$ angegeben. Für die Vertikalbeschleunigungen wurde festgelegt, dass diese 50 % der Werte der Horizontalbeschleunigungen betragen /KKW 11c/.

Tab. 2.4 Gegen ein Bemessungserdbeben ausgelegte SSC /KKW 20/

Bauliche Anlagenteile oder Komponenten
Schaltanlagengebäude
Notstromerzeugergebäude und Kaltwasserzentrale
Kabelbrücken Schaltanlagengebäude / Reaktorgebäude
Kabel- und Rohrkanal – Schaltanlagengebäude / Notstromerzeugergebäude und Kaltwasserzentrale
Reaktorgebäude-Innenraum (Sicherheitsbehälter, SB)
Reaktorgebäude-Ringraum (RR)
Frischdampf (FD)- und Speisewasser-Armaturen-kammer
Materialschleusenumbauung
Reaktorhilfsanlagengebäude
Notspeisegebäude
Rohr- und Kabelkanäle – Notspeisegebäude / Reaktorgebäude
Nebenkühlwassersammelbauwerk
Kühlturmbauwerke-Nebenkühlwasser
Fortluftkamin

Eine Beschreibung in Bezug auf Erdbebenintensität und -magnitude ist in Tab 2.5 zusammengefasst. Die Beschreibung der Schäden beziehen sich hierbei allerdings auf allgemeine, nicht gegen Erdbeben ausgelegte Gebäude. Die Festlegung einer Bemessungsintensität von VIII beinhaltet nach heutigen Bewertungsmaßstäben einen Sicherheitszuschlag einer Intensitätsstufe, da nach aktuellem Vorgehen gemäß KTA 2201.1 /KTA 11/ für die geforderte jährliche Überschreitenswahrscheinlichkeit von 10^{-5} pro Jahr (unter Verwendung der Median-Werte für die seismischen Einwirkungen) eine Bemessungsintensität von $I = VII$ ermittelt wird /KKW 11b/.

Tab. 2.5 Vergleich von Erdbebenintensität und -magnitude

Intensität (EMS)	Definition	Magnitude (Richter)	Freifeld-beschleunigung [cm/s ²] /TRI 75/
I	nicht fühlbar	~ 2,0	2,0
II	kaum bemerkbar	~ 2,5	3,9
III	schwach	~ 3,0	7,8
IV	deutlich	3,5 – 4,0	16,7
V	stark	4,0 – 4,5	32,4
VI	leichte Gebäudeschäden	4,5 – 5,0	64,7
VII	Gebäudeschäden	~ 5,5	130,5
Auslegung der Referenzanlage			170,0
VIII	schwere Gebäudeschäden	6,0 – 6,5	259,0
IX	zerstörend	6,5 – 7,0	518,0
X	sehr zerstörend	~ 7,5	1.033,0
XI	verwüstend	7,5 – 8,0	2.061,1
XII	vollständig verwüstend	~ 8,5	4.111,4

Sicherheitstechnisch nicht relevante Gebäude sind nicht gegen Erdbeben ausgelegt. Die automatischen Schutzmaßnahmen sind in Tab. 2.6 zusammengefasst /BHB 20/. Zur Beherrschung eines Störfalls aufgrund von Erdbeben sind keine speziellen Auslösekriterien notwendig, da die ohnehin vom Reaktorschutz für die auslösenden Ereignisse vorgesehenen Maßnahmen ausreichen. Die unterstellte Zerstörung des Maschinenhauses mit Schäden am Speisewasser-Dampfkreislauf führt zur Einleitung der Maßnahmen, wie sie auch bei anlageninternen Störfällen mit vergleichbaren Auswirkungen im Speisewasser-Dampfkreislauf, wie z. B. Brüche von Frischdampfleitungen, auftreten. Danach werden Frischdampfleitungen durch die Frischdampfabschlussarmaturen abgesperrt. Nach der Reaktorschnellabschaltung erfolgt die Wärmeabfuhr aus dem Primärkreis zunächst über die Dampferzeuger (Einspeisen von Notspeisewasser mit den Notspeisepumpen in die Dampferzeuger und Abblasen von Dampf über Dach), bis Druck und Temperatur auf solche Werte abgesenkt sind, dass das Nachkühlsystem die weitere Nachwärmeabfuhr übernehmen kann /KWU 81/.

Tab. 2.6 Automatische Maßnahmen bei der naturbedingten Einwirkung von außen
'Erdbeben' /KKW 20/

Automatische Maßnahme
Die Zerstörung der Trafostation führt zum Ausfall der Eigenbedarfsversorgung, zum Start der D1-Notstromdiesel sowie zum Abschalten der Hauptkühlmittelpumpe (HKMP) und darüber hinaus zu RESA/TUSA.
Der Abriss der FD-Leitung hinter der FD-Abschlussarmatur führt über das Kriterium 'DAF > max 1' zu RESA/TUSA und Sekundärkreisabschluss.
Der FD-Druck steigt auf > 85 bar, löst dadurch RESA/TUSA und Teilabfahren über FD-Abblasestationen auf 74 bar aus.
Ein FD-Druckanstieg auf > 87,3 bar führt zum Öffnen der FD-Sicherheitsventile.
Fallen die Dampferzeuger (DE)-Füllstände infolge Ausfalls der betrieblichen Speisewasserversorgung < 9 m, erfolgt RESA/TUSA und bei weiterem Abfall bis < 5 m wird in den betroffenen Dampferzeugern das zugeordnete Notspeisesystem zur DE-Bespeisung gestartet.
Bei Unterschreiten des Druckhalter-Füllstandes von 2,28 m werden RESA, Primärkreisabschluss und das Zuschalten des viersträngigen Zusatzboriersystems ausgelöst.
Lecks im Betriebskomponentenkühlsystem führen zum Ausfall des Volumenregelsystems infolge Ansprechens von Aggregateschutzkriterien.
Bei Überschreiten von Temperaturgrenzwerten im nuklearen Probenahmesystem, Volumenregelsystem oder bei HD-Leckagen der Hauptkühlmittelpumpen infolge von Lecks oder nicht gekühlten Kühlstellen sprechen „notstandsichere Verriegelungen“ an und sperren den entsprechenden Systemabschnitt ab.
Sollten die automatischen Maßnahmen nicht ausreichen, um die Anlage in einen sicheren Zustand zu bringen, kann das Personal Handmaßnahmen einleiten. Diese sind für einen Erdbebenstörfall in der Referenzanlage in Tab. 2.7 aufgelistet.

Tab. 2.7 Vorgesehene Handmaßnahmen bei Erdbeben /BHB 20/

Handmaßnahme
Leckstellen absperren (falls vorhanden)
Primärsystem aufborieren
DE-Bespeisung mit Notspeisesystem sicherstellen
Dauerbetrieb der Notstrom-/Notspeisediesel überwachen
Abhängig vom Schadensumfang Systeme wieder in Betrieb nehmen
Anlage mit 50 K/h über FD-Abblasestationen abfahren bis zur Übernahme der Nachzerfallswärmeabfuhr durch das Nachkühlsystem

Handmaßnahme
Bei verfügbarem Volumenregelsystem gemäß 'Notstromfall' abfahren
Bei nicht verfügbarem Volumenregelsystem unter Berücksichtigung der Randbedingungen mit dem Zusatzboriersystem abfahren
Nachkühlsysteme in Betrieb nehmen
Brennelement-Beckenkühlung in Betrieb nehmen

Mit diesen Maßnahmen werden entsprechend /BHB 20/ folgende sicherheitstechnische Ziele angestrebt:

- Sicherstellung der Funktion wichtiger Systeme,
- Überführung der Anlage in den Zustand 'Wärmeabfuhr durch das Nachkühlsystem',
- Überführung der Anlage in den Zustand 'unterkritisch kalt, drucklos'.

Die zur erfolgreichen Störfallbeherrschung je nach Schadensbild erforderlichen Systeme sind in Tab. 2.8 dargestellt. Die Referenzanlage ist gegen das Bemessungserdbeben ausgelegt und verfügt darüber hinaus über Reserven für auslegungsüberschreitende Ereignisse. Die zur Störfallbeherrschung erforderlichen baulichen Anlagenteile, Systeme und Komponenten (Englisch: structures, systems, and components, SSC) sind dementsprechend ebenfalls gegen das Bemessungserdbeben ausgelegt und robust gegenüber einem auslegungsüberschreitenden Erdbeben. Eine Einschränkung der Verfügbarkeit für das notwendige Personal und der Versorgungseinrichtungen bei unterstellten Schäden auf dem Kraftwerksgelände und außerhalb des Kraftwerks ist nicht in unzulässigem Maße gegeben /KKW 11b/.

Die Bewertung anhand der dargestellten Reserven ergibt, dass auch bei einer unterstellten Überschreitung des Bemessungserdbebens um eine Intensitätsstufe (d. h. $I = IX$) kein globaler Verlust der sicherheitstechnisch relevanten Vitalfunktionen zu erwarten ist. Erst ab einer Intensitätsstufe von $I = X$ (Häufigkeit $< E-08$) sind relevante erdbebenbedingte Versagen der Sicherheitssysteme nicht auszuschließen, aber aufgrund der geologischen und tektonischen Randbedingungen sowie der geringen Seismizität am Standort sind Erdbeben solcher Intensitäten praktisch ausgeschlossen /KKW 11b/.

Unterstellt man einen durch ein Erdbeben verursachten, plötzlichen Bruch einer flussaufwärts gelegenen Stauanlage, so ist eine 8 km entfernte Schleuse aufgrund ihrer Höhe

abdeckend für alle flussaufwärts liegenden Stauanlagen, und es kann sich dementsprechend keine Überflutung ergeben, die einen Einfluss auf die Sicherheit der Anlage haben könnte /KKW 11b/.

Tab. 2.8 Erforderliche Systemfunktionen zur Beherrschung eines Bemessungserdbebens /KKW 11b/

Erforderliche Systemfunktionen
Reaktorschnellabschaltung
Notstromversorgung D1 (mit Dieselskühlung)
Bespeisung mit Notspeisepumpen
Niederdruckeinspeisung
Einspeisung Volumenregelsystem
Absperren Dampferzeuger-Abschlämmung
Absperrung Nebenkühlwasser-Leck im Ringraum
Absperrung Deionatversorgung im Ringraum
Absperrung Brunnenwasser im Ringraum
Betriebliches Abfahren über Frischdampf-Abblaseregelventile
Schließen Druckhalter-Abblaseabsperrentil
Abblasen Druckhalter-Sicherheitsventil
Primärkreisabschluss
Nachkühlbetrieb
Nukleare Nachkühlkette
Brennelement-Lagerbeckenkühlung
Lüftung Notstromdieselgebäude
Lüftung Schaltanlagegebäude

Gibt es nach einem Bemessungserdbeben weiteren Bedarf an Schutzmaßnahmen, sind Notfallmaßnahmen (NFM) vorgesehen. Diese sind in Tab. 2.9 mit der jeweiligen Notfallanordnung aufgelistet.

Tab. 2.9 Notfallmaßnahmen und -einrichtungen /KKW 11c/

Notfallmaßnahmen	Notfalleinrichtungen und deren Auslegung
Sekundärseitiges Druckentlasten und Bespeisen aus dem Notspeisegebäude	Die mobile Feuerlöschpumpe zur Notbespeisung der Dampferzeuger ist im erdbebengeschützten Notspeisegebäude so gelagert und befestigt, dass mögliche Beschädigungen durch das Bemessungserdbeben ausgeschlossen werden. Die leittechnische Ansteuerung befindet sich im gegen Erdbeben gesicherten Notspeisegebäude.
Primärseitiges Druckentlasten und Bespeisen	Die Steuerventile für das Druckhalter (DH)-Abblaseventil und für die DH-Sicherheitsventile sind gemäß Auslegungsdatenblatt gegen das Bemessungserdbeben ausgelegt. Die leittechnische Ansteuerung befindet sich im gegen Erdbeben gesicherten Notspeisegebäude.
Verbindungsleitung HD-Sumpfansaugung	Der Systemabschnitt mit den zugehörigen Komponenten ist bereits mit der Errichtung der Anlage gegen das Bemessungserdbeben ausgelegt.
Hochsetzen DE-Druckabsicherung	Die Ansteuerung und Ausführung erfolgt an der Reaktorschutttafel im gegen Erdbeben gesicherten Schaltanlagegebäude.
Gefilterte Druckentlastung des Sicherheitsbehälters (SB) in die Atmosphäre	Der Venturiwäscher befindet sich in einer gegen Erdbeben gesicherten Umhausung und ist auf dem Dach des Reaktorhilfsanlagegebäudes aufgestellt. Die angrenzenden Systemabschnitte sind gegen das Bemessungserdbeben ausgelegt.
Zuluftfilterung Hauptwarte Überdruckhaltung	Die mobile Zuluftfilteranlage ist im erdbebengeschützten Schaltanlagegebäude gelagert und gesichert, so dass mögliche Beschädigungen durch das Bemessungserdbeben ausgeschlossen werden können.
Rückspülen der JN-Sumpfsiebe	Die JN-Sumpfsiebe und zugehörige Systemabschnitte sind gegen das Bemessungserdbeben ausgelegt.
Passive H ₂ -Rekombinatoren	Die Auslegung der Aufstellung und Halterung der Rekombinatoren erfolgte auch für den Lastfall Bemessungserdbeben.

2.4.1.3 Vorgesehene Schutzmaßnahmen bei einem Notstromfall

Als Folge eines Hochwassers bzw. Erdbebens muss mit einem Notstromfall, d. h. mit dem Ausfall der Eigenbedarfsversorgung, gerechnet werden. Ein Notstromfall tritt in der Referenzanlage beispielsweise ein, wenn die 400 kV-Schaltanlage sowie das 110 kV-Reservenetz ausfallen (siehe /BHB 19/, S. 2-4.4-2.1/1f). Der Notstromfall führt zum Ausfall der Hauptkühlmittelpumpen, was eine Reaktorschnellabschaltung (RESA) und Turbinenschnellabschaltung (TUSA) unmittelbar zur Folge hat. Auch die Hauptspeisewasserpumpen, die Hauptkühlwasserpumpen sowie die Hauptkondensatpumpen sind unverfügbar, die Hauptwärmesenke fällt damit aus. Die Wärmeabfuhr erfolgt durch Frischdampfabgabe über die FSA-Station(en). Die Stromversorgung wird über die Notstromsysteme D1 bzw. D2 bereitgestellt. Bei einem Ausfall der Notstromversorgungen D1 und D2 steht zusätzlich eine batteriegepufferte 220 V-Gleichstromanlage zur Verfü-

gung. Die Gleichstromanlage ist für eine Betriebsdauer von zehn Stunden ausgelegt, dient aber nicht zur Kernkühlung (vgl. /KKW 11/, S. 129). Zur Erhöhung der Robustheit der Referenzanlage bei einem Station Blackout wurden zwei zusätzliche mobile Netzersatzanlagen beschafft (siehe /KKW 12b/, S. 74). Mit diesen mobilen Netzersatzanlagen kann beim Ausfall der D1- und D2-Notstromversorgung eine Notnachkühlkette mit Strom versorgt werden. Die Einspeisung erfolgt (siehe /BMU 17/, S. 23, S. 25) über Einspeisepunkte außerhalb des Notspeisegebäudes.

Nachdem sowohl die Hauptspeisewasserpumpen als auch die Hauptkondensatpumpen bei einem Notstromfall nicht verfügbar sind, werden die Dampferzeuger mit dem An- und Abfahrssystem (LAH) oder dem Notspeisesystem (LAR) bespeist. Da das Maschinenhaus nicht gegen Hochwasser und Erdbeben vollumfänglich geschützt ist, wird vom Ausfall der An- und Abfahrpumpen ausgegangen. Bei *„gesichertem Deionatvorrat kann die Wärme wesentlich länger als 10 h über die Dampferzeuger abgeführt werden“* /KKW 09/, S. 3.2.6-3. Bei einem länger andauernden Notstromfall müssen somit

- der Dauerbetrieb der Notstromerzeugeranlagen 1 und 2 sowie
- die Deionatversorgung

sichergestellt werden.

Betrieb der Notstromerzeugeranlage 1

Die Notstromerzeugeranlage 1 befindet sich im Notstromerzeugergebäude (siehe Systembeschreibung). Sie ist viersträngig aufgebaut, die einzelnen Stränge sind räumlich voneinander getrennt. Die Notstromerzeugeranlage hat die Aufgabe, im Notstromfall die Notstromverbraucher von Notstromnetz 1 und vom Notstromnetz 2 mit elektrischer Energie zu versorgen. Insgesamt sind vier Notstromdieselaggregate in die Notstromerzeugeranlage 1 integriert. Für deren Versorgung werden Betriebsstoffe (Kraftstoff, Schmiermittel sowie Kühlwasser) benötigt.

Für die Kraftstoffversorgung können die Vorratsbehälter mittels Tankwagen über eine Füllleitung befüllt werden. Vom Vorratsbehälter wird Kraftstoff in den Betriebsbehälter gepumpt, beim Ausfall der Pumpe erfolgt der Aufbau einer Reservepumpe. Jedes der vier Notstromdieselaggregate hat einen Vorrattank mit einem Fassungsvermögen von 79,7 m³ und einen Betriebsbehälter mit einem Volumen von 2,82 m³.

In der Referenzanlage sind in den Kraftstoffbetriebs- und Kraftstoffvorratsbehältern der D1-Notstromdieselaggregate insgesamt ca. 344 m³ Dieseldieselkraftstoff gelagert. Damit ist der auf der Anlage vorhandene Kraftstoffvorrat für einen langandauernden Notstromfall über eine geforderte Zeitdauer von sieben Tagen ausreichend bemessen. Abweichend vom aktuellen Nachweisstand der Anlage wird für die in diesem Vorhaben durchgeführten methodischen Erweiterungen unterstellt, dass eine Nachspeisung bereits nach einem kürzeren Zeitraum erforderlich ist.

Der Kraftstoffverbrauch dV pro Notstromdiesel-Aggregat beträgt mit einem spezifischen Verbrauch von 275 g/kWh, einer Dichte von Diesel mit 860 kg/m³ sowie einer Nennleistung von 5.000 kW und dem Lastfaktor 0,7:

$$dV = \frac{0,275 \frac{kg}{kWh}}{\frac{860 kg}{m^3}} \cdot 5000 kW \cdot 0,7 = 1,12 \frac{m^3}{h}. \quad (2.1)$$

Insgesamt benötigen die vier Notstromdieselaggregate also ungefähr 4,5 m³/h Kraftstoff. Diese Abschätzung ist konservativ, da die Leistung der Aggregate im Betrieb nicht dauerhaft 5.000 kW beträgt. Schmierölpumpen versorgen die Komponenten der Notstromdieselaggregate mit Schmiermittel. Das Schmiermittel wird durch Ölnachfüllpumpen aus einem Vorratsbehälter nachgefüllt, wobei als Ersatz eine Handpumpe dient. Die Umwälzung des Kühlwassers erfolgt über direkt angetriebene Kreislumpen. Die Betriebsstoffe der Notstromerzeugeranlage 1 und deren Hilfsanlagen sind entsprechend der Systembeschreibung für mindestens 72 h Dauerbetrieb ausreichend. Die Mengen von Schmiermittel und Kühlwasser, welche während des Betriebs nachgefüllt werden müssen, sind im Vergleich zum Kraftstoff vernachlässigbar.

Für einen langandauernden Notstromfall wird im Rahmen dieser Untersuchung folgendes Vorgehen angenommen, welches nicht dem aktuellen Vorgehen in der Referenzanlage entspricht: Im langandauernden Notstromfall werden zwei von vier Generatoren frühzeitig außer Betrieb genommen, wodurch sich eine Halbierung des Kraftstoffverbrauches auf ca. 2,25 m³/h und eine Verdoppelung der Betriebszeit auf ca. 144 h ergibt. Die zusätzliche Kraftstoffnutzung von 42,5 m³ Notspeisenotstromdiesel aus der Notstromerzeugeranlage 2 führt zu einer Verlängerung der Betriebsdauer um 19 h auf insgesamt 162 h. Weiterhin enthalten die Vorratsbehälter aufgrund der regelmäßigen Betankung nach Wiederkehrenden Prüfungen zusätzlich jeweils 9.000 l. Unter den genannten Annahmen kann somit eine Betriebszeit von deutlich mehr als sieben Tagen realisiert werden.

Betrieb der Notstromerzeugeranlage 2

Die Notstromerzeugeranlage 2 ist im Notspeisegebäude untergebracht und versorgt direkt die Notspeisepumpen mit der nötigen Energie. Die viersträngige Anlage wird automatisch gestartet, sollte die Notstromerzeugeranlage 1 bei einem Notstromfall nicht verfügbar sein. Die vier Dieselmotoren haben für die Dieselversorgung zusammen einen Vorratsbehälter mit einem nutzbaren Volumen von 48,3 m³. Jeder Dieselmotor hat eine Leistung von jeweils 950 kW, einen spezifischen Kraftstoffverbrauch von 220 g/kWh und damit einen Verbrauch von 0,17 m³/h. Die Versorgungsdauer aus dem Vorratsbehälter beträgt somit etwa 71 h (vgl. Notstromerzeugeranlage 1). Die Versorgung mit Schmiermittel und Kühlwasser ist in ausreichendem Maße sichergestellt und muss, analog zur Notstromerzeugeranlage 1, wegen der geringen Verbrauchsmengen nicht weiter betrachtet werden.

Keine Berücksichtigung der mobilen Netzersatzanlagen

Zusätzliche mobile Netzersatzanlagen, wie sie nach den Reaktorunfällen von Fukushima Daiichi in der Referenzanlage vorgehalten werden, sind in den vorangehenden Abschätzungen für die Notstromerzeugeranlagen 1 und 2 nicht berücksichtigt. Aufgrund der konservativen Annahmen werden diese auch nicht weiter berücksichtigt.

Deionatversorgung im Notstromfall

Bei einem Notstromfall wird Frischdampf über die FSA-Station(en) abgegeben. Deshalb muss der Speisewasserbehälter kontinuierlich mit Deionat nachgespeist werden, bis das nukleare Nachkühlsystem die Nachwärmeabfuhr aus dem Reaktorkühlkreis übernimmt. Das Deionat-Versorgungssystem GHC stellt die betriebliche Versorgung mit Deionat sicher. Eine weitere Aufgabe ist die Kühlung der An- und Abfahrpumpen mittels Deionat (für Einwirkungen von außen ist dies nicht relevant, da die An- und Abfahrpumpen für diese Einwirkungen nicht ausgelegt sind). Für diese Aufgaben stehen zwei Deionatbehälter auf dem Freigelände mit einem nutzbaren Volumen von je 1.000 m³ zur Verfügung. Jeweils zwei Deionat-Betriebspumpen sowie zwei notstromgesicherte (D1) Deionat-Nachfüllpumpen sind im Keller des Versorgungsanlagegebäudes angeordnet und verfügen über eine Fördermenge von je 20 kg/s bzw. 45 kg/s. Der Deionatvorrat aus den betrieblichen Deionatbehältern reicht für mehr als 40 h (siehe /KKW 11a/, S. 90).

Bei Ausfall der betrieblichen Deionatförderung erfolgt die Deionatversorgung zur Bespeisung der Dampferzeuger mittels gesicherter, viersträngiger Notspeisepumpen aus dem Notspeisegebäude (siehe /KKW 11a/, S. 59). Bei einem Ausfall aller Notspeisepumpen ist im Rahmen von Notfallmaßnahmen auch das Einspeisen von Deionat in die Dampferzeuger mit Hilfe einer vor Ort befindlichen, benzinbetriebenen Feuerlöschpumpe möglich. Zur Einspeisung ist eine sekundärseitige Druckabsenkung des zu bespeisenden Dampferzeugers über das zugeordnete FD-Abblaseventil bzw. FD-Sicherheitsventil notwendig. Nach Aussage des Betreibers der Referenzanlage sind die *„in den Notspeisebecken gelagerten Deionatvorräte für das Abfahren der Anlage ausgelegt und können bei Bedarf gemäß BHB/NHB-Vorgabe aus verschiedenen Wasserquellen über mobile Einrichtungen durch die Werkfeuerwehr aus dem Feuerlöschsystem SG, dem gesicherten Notnebenkühlwassersystem bzw. direkt mit Flusswasser nachgespeist werden“* /KKW 11a/, S. 99.

2.4.1.4 Einrichtung eines Notfallstabs

Ein Notfallstab wird einberufen, wenn z. B. Voraussetzungen für den Voralarm bzw. den Katastrophenalarm erfüllt sind. Gemäß Notfallhandbuch ist ein Notfall ein *„Ereignisablauf in der Anlage, zu dessen Beherrschung Maßnahmen erforderlich werden, die über die im Betriebshandbuch geforderten hinausgehen“*.

Der Notfallstab ist ausschließlich Beratungsgremium für den Leiter der Anlage (LdA) und die Führungslinie Betrieb des betroffenen Blockes sowie Koordinationsgremium bei einer radiologischen Notstandssituation. Bei dem hier angenommenen Hochwasserereignis koordiniert der Notfallstab zusätzlich die ergänzenden Notfallmaßnahmen, die durch die lange Ereignisdauer erforderlich werden. Darüber hinaus informiert und berät der Notfallstab den Katastrophenschutzstab (KatS-Stab) des Regierungspräsidiums (RP).

Insgesamt besteht der Notfallstab aus 15 Mitgliedern, die im Mehrschichtbetrieb arbeiten. Der Notfallstab hält über eine Verbindungsperson direkten Kontakt zum KatS-Stab. Weiterhin steht der Notfallstab mit dem Krisenstab des Herstellers der Anlage direkt in Verbindung. Zur Durchführung von Maßnahmen verfügt der Notfallstab über Ersteinsatzpersonal in ausreichender Menge unter Berücksichtigung erforderlicher Reserven.

Dem Notfallstab stehen Räumlichkeiten in dem gegen Erdbeben ausgelegten Schaltanlagegebäude zur Verfügung. Als Ausweichort kann ein aufgrund seiner Lage hoch-

wassergeschütztes Gebäude außerhalb der Referenzanlage genutzt werden. An beiden Orten ist die Versorgung der Mitglieder über mehrere Tage sichergestellt.

2.4.2 Ergänzende Notfallmaßnahmen

Neben den oben beschriebenen vorgeplanten Maßnahmen zur Beherrschung von auslösenden Ereignissen sind bei langandauernden Ereignissen auch ergänzende Notfallmaßnahmen in Betracht zu ziehen, die vom Notfallstab ausgewählt und veranlasst werden. Da es sich um lageabhängige, weitergehende Maßnahmen handelt, werden hierfür keine gesetzlichen Vorgaben gemacht. Generell sind jedoch bei der Planung ergänzender Notfallmaßnahmen folgende Faktoren zu berücksichtigen (siehe /EC 17/, Kap. 6.4.2):

- Standort der Notfall-Einsatzkräfte,
- Art und Anzahl von spezieller Ausrüstung,
- Möglichkeit vorhandener Hindernisse auf den Transportwegen,
- Berücksichtigung der erforderlichen Vorlaufzeiten,
- Trainingszustand der Einsatzkräfte,
- zeitlicher Ablauf des Szenarios sowie
- der Bedarf der Einsatzkräfte in anderen Reaktorblöcken (sogenannte Multi-Unit-Aspekte) am Standort.

Dazu werden zunächst die bestehenden Organisationen und deren Strukturen beschrieben und bewertet.

Organisation der ergänzenden Notfallmaßnahmen

Bei einem Störfall in einem Kernkraftwerk in Deutschland stehen zahlreiche Organisationen und deren Strukturen bereit, die im Bedarfsfall auf der administrativ-organisatorischen Ebene (Einsatzorganisation) sowie auf der operativ-taktischen Ebene (Einsatzabarbeitung) tätig werden.

Auf der administrativ-organisatorischen Ebene liegt der Schwerpunkt der Arbeiten auf der Informationsbeschaffung und Einsatzführung. Durch die Einbindung spezialisierter

Verbindungspersonen ist davon auszugehen, dass das Ausbildungsniveau für die Aufgaben ausreichend ist. In den Organisationen der operativ-taktischen Ebene erfolgen regelmäßige Übungen mit den zur Verfügung stehenden Mitteln. Auch hier ist von einer ausreichenden Ausbildung auszugehen.

Der Notfallstab der Referenzanlage (siehe Abschnitt 2.4.1.4) hält auf der administrativ-organisatorischen Ebene engen Kontakt zu anderen Stäben. Er informiert und berät beispielsweise den Katastrophenschutzstab KatS-Stab des Regierungspräsidiums (vgl. /KKW 19/, Kap. 1.1 – 7.1), welcher in örtlich von der Referenzanlage getrennten Räumen untergebracht ist. Aufgrund der frühzeitigen Alarmierung bei dem hier angenommenen Hochwasserereignis sind keine Hindernisse während der Einberufung und Arbeitsaufnahme des Katastrophenschutzstabs abzusehen. Daher ist auch die Eingriffszeit nicht relevant. Der Krisenstab des Herstellers der Anlage steht der Referenzanlage nach erfolgter Alarmierung zur Verfügung und unterstützt den Notfallstab vom einige hundert Kilometer entfernten Firmensitz aus. Aufgrund der frühzeitigen Alarmierung ist auch hier die Vorlaufzeit vernachlässigbar.

Auf der operativ-taktischen Ebene bestehen Vereinbarungen zur Zusammenarbeit mit anderen deutschen Kernkraftwerken (siehe /KKW 19/, Kap. 1.1-7.5) in bis zu 100 km Entfernung an unterschiedlichen Flüssen. Diese Kernkraftwerke sind mittlerweile nicht mehr im kommerziellen Betrieb. Ein Kernkraftwerk liegt am gleichen Fluss wie die Referenzanlage und wird deshalb nicht weiter berücksichtigt, da es ebenfalls durch das angenommene Hochwasser betroffen sein kann. Zwei Kernkraftwerke können jedoch Mess- und Laboreinrichtungen zur Verfügung stellen. Sie sind mit einem Hubschrauber eines Hilfsdienstes (z. B. Rettungsdienste, Polizei) innerhalb von zwei Stunden einsetzbar.

Weiterhin gibt es spezielle Firmen, die auf die Unterstützung bei radiologischen Notfällen spezialisiert sind (z. B. Kerntechnischer Hilfsdienst GmbH (KHG)). Es wird angenommen, dass die direkte Straßenverbindung zur Referenzanlage über den Fluss an der Referenzanlage durch die Einwirkung von außen nicht nutzbar ist. Dementsprechend muss bei einer Anforderung ein Lufttransport organisiert werden, wofür eine Vorlaufzeit von einem halben bis zu einem Tag angenommen wird. Der KHG kann folgende Mittel zur Verfügung stellen:

- Infrastruktur zur Planung und Führung von Einsätzen,
- Ausrüstung zum Strahlenschutz (Strahlenmessgeräte),

- Ausrüstung zum Personenschutz (Einsatzkräfte) und zur Dekontamination,
- Materialien zur Reinigung von Personen und Ausrüstung sowie
- ferngesteuerte Fahrzeuge mit Videokameras und Werkzeugmaschinen.

Damit kann er bei der Durchführung von Strahlenmessungen innerhalb und außerhalb der Referenzanlage sowie bei der Durchführung von Maßnahmen in kontaminierten Bereichen unterstützen. Neben der KHG gibt es weitere Firmen, die entsprechend unterstützen könnten, aber wesentlich weiter entfernt angesiedelt sind und deshalb nicht weiter betrachtet werden.

Die oben aufgeführten operativ-taktischen arbeitenden Organisationen (Personal von nahegelegenen Kernkraftwerken oder der KHG) sind eher für die Unterstützung von Maßnahmen nach einer radiologischen Freisetzung ausgestattet. Diese Maßnahmen sind jedoch zu Beginn eines Hochwasserereignisses nicht erforderlich. Allerdings können im Laufe des Ereignisses solche Maßnahmen durch die übergeordneten Stäbe organisiert und vorbereitet werden. Im Rahmen einer PSA der Stufe 1 werden diese Organisationen jedoch nicht berücksichtigt.

Für ein Hochwasserereignis sind in erster Linie zahlreiche nicht kerntechnisch-spezialisierte Organisationen, wie die regionalen Feuerwehren, das Technische Hilfswerk (THW) sowie das Militär zuständig. Diese können im Rahmen eines Katastrophenfalls Unterstützung leiten und werden bei der Beschreibung der ergänzenden Notfallmaßnahmen berücksichtigt.

Vorhandene Mittel der Bundeswehr

Die Bundeswehr verfügt über unterschiedliche Mittel, mit deren Hilfe alternative Versorgungswege bei Hochwasserereignissen realisiert werden können. Aufgrund der Randbedingungen bei dem angenommenen Hochwasserereignis (variabler, zeitweise niedriger Wasserstand, enge örtliche Verhältnisse, schwer zu transportierende Lasten) lag der Schwerpunkt der Untersuchungen auf geländegängigen Amphibienfahrzeuge sowie dem Lufttransport, jedoch nicht auf dem Einsatz von Booten.

Ein Hubschraubergeschwader der Bundeswehr befindet sich mehr als 100 km von der Referenzanlage entfernt. Dort sind u. a. alle etwa 60 Transporthubschrauber vom Typ Sikorsky CH-53 (kurz CH-53) stationiert. Der CH-53 hat eine Kapazität für den Transport

von 36 Passagieren und kann eine Außenlast von 7 t befördern. Bei freien Kapazitäten kann er auf Anfrage der Bundesländer im Rahmen nationaler Katastrophenlagen eingesetzt werden.

Ein etwa 300 bis 400 km von der Referenzanlage entfernt stationiertes Panzerpionierbataillon verfügt über etwa 30 Schwimmschnellbrücken vom Typ Amphibie M3 (kurz Amphibie M3). Die Amphibie M3 kann sich sowohl auf Land fahrend als auch auf Wasser schwimmend fortbewegen und ist auch für den Fährbetrieb einzeln wie auch gekoppelt geeignet. Sie hat eine Länge von 13 m und einen Wendekreis von 7 m bei ausgefahrenen Schwimmkörpern. Der Wendekreis beträgt 23 m. Die Geschwindigkeit beträgt an Land 80 km/h bzw. auf dem Wasser 14 km/h. Die Nutzlast beim Fährbetrieb beträgt 20 t bei einer Nutzfläche von mehr als 50 m².

Sowohl der CH-53 als auch die Amphibie M3 sind somit für den Aufbau von alternativen Versorgungswegen über die Luftbrücke bzw. im Fährbetrieb geeignet und werden hier für die ergänzenden Notfallmaßnahmen vorgesehen.

2.5 Hochwasser mit langandauernden Folgen

2.5.1 Hochwasserereignisse am Standort der Referenzanlage

Der Standort der Referenzanlage liegt direkt an einem Binnenfluss sowie an einem kleineren Fließgewässer mit einer Länge von etwa 6 km. Das Einzugsgebiet des Binnenflusses kann für Deutschland als groß, das andere als klein angesehen werden. Der relevante Pegel für den Wasserstand an der Referenzanlage liegt ca. 125 km oberhalb der Mündung des Flusses, aus dem auch das Kühlwasser entnommen wird /LUB 20/. An diesem Pegel kam es in der Vergangenheit zu mehreren beobachteten Hochwassern, von denen die zehn größten der vergangenen 65 Jahre in Tab. 2.10 zusammengefasst sind.

Tab. 2.10 Zehn größte Hochwasserereignisse am Pegel der Referenzanlage (visuelle Ablesung der Daten, Unsicherheit ca. +1 Tag /BFG 20/)

Jahr	Maximaler Durchfluss	Dauer mit Abflüssen > 600 m ³ /s
1956	1150 m ³ /s	3 d
1978	1520 m ³ /s	3 d

Jahr	Maximaler Durchfluss	Dauer mit Abflüssen > 600 m³/s
1983	1100 m³/s	2 d
1988	1150 m³/s	6 d
1988	987 m³/s	4 d
1990	1110 m³/s	3 d
1993	1110 m³/s	3 d
1994	1010 m³/s	3 d
2004	977 m³/s	2 d
2013	1140 m³/s	3 d

Aus den Klimadaten und dem Verlauf von Flusshochwassern ergeben sich die in Tab. 2.11 dargestellten, für die Referenzanlage relevanten Hochwasserkennwerte. Die Nullmeterkote der Referenzanlage (das sogenannte Kraftwerks-Null) wird mit einem Wasserstand von 2,50 m (relativer Wasserstand) erreicht. Bei höheren Wasserständen wird das Anlagengelände überflutet. Ein 1.000-jährliches Hochwasserereignis führt demnach nicht zu einer Überflutung des Anlagengeländes. Die Schutzhöhe der Referenzanlage liegt auf einer Höhe von 3,50 m. Bis zu einem entsprechenden Wasserstand sind die sicherheitstechnisch relevanten Anlagenbereiche vor anlagenexternen Überflutungen geschützt. Der Begriff „Überflutungshöhe“ bezeichnet die Höhe des Wassers über dem Kraftwerks-Null der Anlage (entspricht dem Wasserstand abzüglich der 2,50 m zum Kraftwerks-Null) bzw. über einem anderen Ort.

Tab. 2.11 Hochwasserkennwerte für einen Vergleichspegel am Kraftwerksstandort

Wiederkehr- periode	Maximaler Durchfluss /LUB 20/	Relativer Wasser- stand über Pegel- stand Null /LUB 20/	Wasserstand /KKW 09a/, Tab. 5-2
2 a	670 m³/s	5,15 m	- 0,52 m
10 a	1.210 m³/s	6,17 m	0,50 m
20 a	1.415 m³/s	6,69 m	
50 a	1.679 m³/s	7,34 m	0,95 m
100 a	1.877 m³/s	7,74 m	1,25 m (höchstes dokumentiertes Hochwasser)
1.000 a	2.400 m³/s	8,43 m	1,94 m
–	–	–	2,50 m (Nullmeterkote)
10.000 a	3.000 m³/s	9,15 m	2,66 m (Bemessungshochwasser)

Wiederkehr- periode	Maximaler Durchfluss /LUB 20/	Relativer Wasser- stand über Pegel- stand Null /LUB 20/	Wasserstand /KKW 09a/, Tab. 5-2
100.000 a	3.400 m ³ /s /KKW 11a/, S. 87	9,99 m	3,50 m (Schutzhöhe)
1.000.000 a			4,10 m /KKW 11a/, S. 90

Die Referenzanlage ist gegen das Bemessungshochwasser mit einem Wasserstand von 2,66 m, einem maximalen Durchfluss von 3.000 m³/s bzw. einer Wiederkehrperiode von 10.000 Jahren ausgelegt (vgl. dazu /ROE 18/ und /SPE 18/). Die Dauer der Hochwasserspitze, definiert durch Abflüsse von mehr als 90 % des maximalen Durchflusses, beträgt etwa 6 h. Zur Herleitung dieser Dauer wurde angenommen, dass das Bemessungshochwasser eine ähnliche Dauer hat wie das beobachtete Hochwasser von 1978 mit einem etwa halb so großen maximalen Durchfluss.

Das Bemessungshochwasser bezieht damit die maßgeblichen Einflussgrößen für Hochwasser, Niederschlag und Schneeschmelze ein. Ein entsprechender Wasserstand führt weder zu anlageninternen Einschränkungen noch zu Schäden an der anlagenexternen Infrastruktur /KKW 11/. Insbesondere sind das Anlagengelände und sicherheitstechnisch wichtige Gebäudeteile wie die Warte im Schaltanlagegebäude oder die Notsteuerstelle im Notspeisegebäude dauerhaft zugänglich. Die Stromversorgung, die Versorgung mit Betriebsstoffen sowie die Werkfeuerwehr sind uneingeschränkt verfügbar.

2.5.2 Angenommenes Hochwasserereignis

Eine Kombination aus starkem Niederschlag und Schneeschmelze können zu höheren als den bisher beobachteten Wasserständen an der Referenzanlage führen (vgl. /KKW 09a/, Kap. 5.3.1). Der Eintritt eines solch unwahrscheinlichen Hochwasserszenarios wird nachfolgend am Standort der Referenzanlage postuliert.

Das angenommene Einzugsgebiet für Niederschlag und die Schneeschmelze hat eine überregionale Ausdehnung und erstreckt sich über ca. 8.000 km². Im Bereich der Referenzanlage kommt es zu einem Hochwasserereignis mit Wasserständen bis knapp unter die Schutzhöhe der Referenzanlage, was einem 100.000-jährlichen Hochwasserereignis entspricht. Der Niederschlag oder andere Einflüsse in der Umgebung der Referenzanlage führen nicht zu einem sprunghaften Anstieg des Wasserstandes. Daher wird eine

Vorwarnzeit von 36 Stunden für das Personal in der Referenzanlage, vom Zeitpunkt der Erkenntnis, dass ein Hochwasser zu erwarten ist, bis zur Durchflussspitze angenommen.

Trotz des Hochwassers stehen mehrere, höher gelegene Zufahrtsstraßen zur Referenzanlage zur Verfügung. Allerdings ist das Gelände der Referenzanlage selbst überflutet und deshalb nur eingeschränkt befahrbar.

Während des Hochwasserereignisses kommt es aufgrund der Wetterverhältnisse zum Versagen des 400 kV-Hauptnetzes sowie des 110 kV-Reservenetzes und somit zum Notstromfall (siehe /KKW 09a/, Kap. 5.4.1). Nach dem Erreichen der Hochwasserspitze sinkt der Wasserstand wieder ab. Die Analyse wird bis zu dem Zeitpunkt durchgeführt, zu welchem sich die Anlage entweder in einem sicheren Zustand befindet oder ein Kernschaden eingetreten ist.

Ein solches 100.000-jährliches Hochwasserereignis mit einer Eintrittshäufigkeit von 1 E-

05/a überschreitet das Bemessungshochwasser und wird zusammen mit einem darauffolgenden Notstromfall häufig auch in der PSA im Rahmen der Sicherheitsüberprüfung, z. B. in /KKW 09a/, als konservativ abdeckendes Ereignis angenommen. Bei dem hier beschriebenen Hochwasserereignis wird jedoch von einer Überflutungsdauer des Anlagengeländes von mehreren Tagen ausgegangen. Die untersuchte Ereignisdauer ist damit wesentlich länger als die in der PSA üblicherweise unterstellte Dauer von 24 h bzw. 72 h für Einwirkungen von außen (siehe /IAE 10/, S. 32).

2.5.2.1 Modellierung der Überflutungsdauer

Die Überflutungsdauer wird hier über die Dauer des Ereignisses mit Wasserständen über dem Wasserstand des Bemessungshochwassers definiert. Um die Überflutungsdauer zu modellieren, werden die Dauern der beobachteten Hochwasserereignisse in Tab. 2.10 als Datengrundlage verwendet. Die Daten in dieser Tabelle basieren auf Hochwasserereignissen mit Wiederkehrperioden von zwei bis maximal 50 Jahren entsprechend der Kennwerte in Tab. 2.11. Weiterhin ist kein Zusammenhang zwischen der Hochwasserdauer und dem Hochwasserstand der beobachteten Hochwasser in Tab. 2.10 erkennbar. Die beobachteten Hochwasser haben weitgehend lineare Zunahmen bzw. Abnahmen des Durchflusses.

Aus dem Verlauf der beobachteten Hochwasser lässt sich die Annahme ableiten, dass die Dauer für eine bestimmte Zunahme bzw. Abnahme des Durchflusses unabhängig vom maximalen Durchfluss des Hochwasserereignisses ist. Diese Annahme ist in Abb. 2.6 bildlich dargestellt und ist vergleichbar mit der Annahme für das Bemessungshochwasser in Abschnitt 2.5.1. Sie erscheint plausibel, da aufgrund der örtlichen Gegebenheiten keine diskreten Effekte wie ein Dammbruch bzw. der Wasseransammlung im Anlagengelände zu erwarten sind.

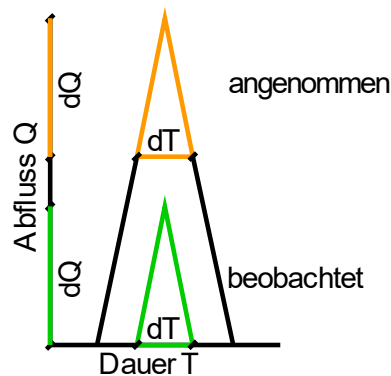


Abb. 2.6 Hochwasserverläufe von beobachtetem (grün) und angenommenem Hochwasser (orange); bei gleicher Durchflussdifferenz dQ sind auch die Dauern dT etwa gleich und unabhängig vom Spitzendurchfluss

Die Durchflussdifferenz zwischen 600 m³/s und maximalem Durchfluss der beobachteten Hochwasser in Tab. 2.10 beträgt zwischen 370 m³/s (im Jahr 2004) und 920 m³/s (im Jahr 1978) und wird hier mit $dQ_{\text{beobachtet}} = 500 \text{ m}^3/\text{s}$ angenommen, was etwa dem Modalwert der gezeigten zehn Hochwasserereignisse entspricht. Bei dem hier angenommenen Hochwasser mit einer Wiederkehrperiode von 100.000 Jahren beträgt der maximale Durchfluss etwa 3.400 m³/s (siehe Tab. 2.11). Die Differenz zum Durchfluss des Bemessungshochwassers (untere Grenze der angenommenen Überflutungsdauer) mit 3.000 m³/s beträgt somit etwa $dQ_{\text{angenommen}} = 400 \text{ m}^3/\text{s}$. Unter Berücksichtigung der Annahmen und Unsicherheiten ist die Durchflussdifferenz von beobachteten Hochwassern und angenommenem Hochwasser etwa gleich etwa $dQ_{\text{angenommen}} \approx dQ_{\text{beobachtet}}$. Die Dauern der beobachteten Hochwasser in Tab. 2.10 lassen sich, basierend auf der Annahme in Abb. 2.6, auf das angenommene Hochwasser mit höherem Wasserstand übertragen.

Um die Überflutungsdauer für das angenommene Hochwasserereignis zu modellieren, werden Wahrscheinlichkeitsverteilungen an die beobachteten Dauern der Hochwasser in Tab. 2.11 angepasst. Um die Unsicherheiten in den empirischen Hochwasserdauern

von etwa einem Tag zu berücksichtigen, werden insgesamt 1.000 Simulationen mit den beobachteten Dauern in Tab. 2.11 mit einer Unsicherheit von einem Tag gemacht. Weiterhin werden vier unterschiedliche Wahrscheinlichkeitsverteilungen, die Exponential-, Lognormal-, Gumbel- und Weibull-Verteilung verwendet, um aufgrund der geringen Anzahl von Daten Modellunsicherheiten bei der Modellierung von Überflutungsdauern einzuschließen. Jede der vier Wahrscheinlichkeitsverteilungen wird an jede der 1.000 Simulationen der beobachteten Dauern angepasst. Anschließend wird die an die Nullhypothese „angepasste“ Verteilung (passt zu beobachteter Verteilung der Dauern in Tab. 2.11 ohne Unsicherheiten) mit dem Kolmogorow-Smirnow-Anpassungstest mit einem Vertrauensintervall von 10 % überprüft. Aufgrund der vorliegenden Daten wird die Nullhypothese der Weibull-Verteilung am häufigsten, die Nullhypothese der Gumbel-Verteilung am seltensten verworfen.

Aus den angepassten Verteilungen (vier Verteilungstypen, 1.000 Ziehungen der beobachteten Überflutungsdauern) werden je 100 Realisationen gezogen. In den insgesamt 400.000 Realisationen werden Werte von mehr als 18 Tagen (dreifache beobachtete Dauer) nicht weiter berücksichtigt, um statistische Ausreißer zu verhindern, was zu etwa $|\Omega| = 380.000$ verbleibenden Realisationen führt. Die Kombination aller berücksichtigten, modellierten Hochwasserdauern ΔT_{FD} ist in Abb. 2.7 dargestellt und hat folgende charakteristische Werte: $p(\Delta T_{FD} > 3 \text{ d}) = 45 \%$; $p(\Delta T_{FD} > 6 \text{ d}) = 5 \%$ (maximale beobachtete Überflutungsdauer); und $p(\Delta T_{FD} > 9 \text{ d}) = 1 \%$.

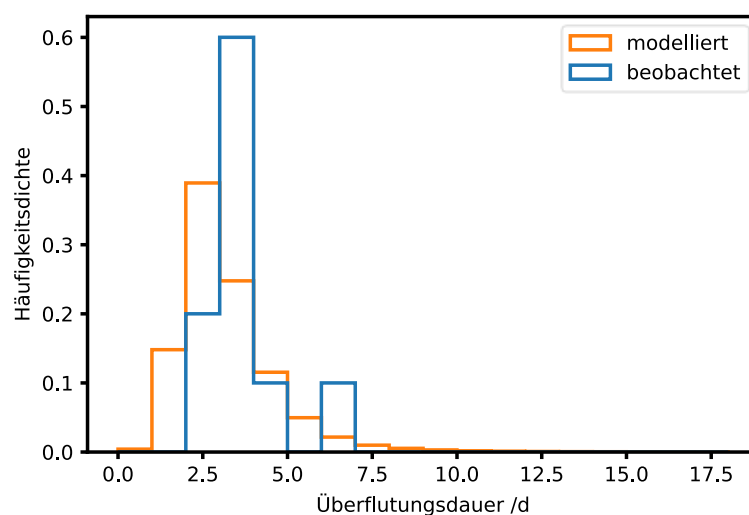


Abb. 2.7 Beobachtete Dauern aus Tab. 2.11 und modellierte, qualitative Häufigkeitsverteilungen von Überflutungsdauern $\Delta T_{FD} = p(\Omega)$ aus vier Verteilungstypen

Diese modellierte Verteilung der Hochwasserdauer wird im angenommenen Hochwasserereignis als stochastisch verteilte Überflutungsdauer ΔT_{FD} verwendet. Aufgrund der hier beschriebenen Annahmen, insbesondere in Bezug auf Abb. 2.6, ist die Häufigkeitsverteilung als qualitativer Anhaltspunkt für mögliche Überflutungsdauern zu sehen und nicht zur quantitativen Auswertung gedacht.

2.5.2.2 Ereignisverlauf

Die Betrachtung des Ereignisses beginnt mit dem Erreichen des Wasserstandes des Bemessungshochwassers von 2,66 m, da ab hier mit ersten Einschränkungen von Systemen auf der Referenzanlage zu rechnen ist. Die Zeitangaben t zum Ereignisverlauf werden relativ zur modellierten Überflutungsdauer ΔT_{FD} angegeben und sind wie folgt definiert

$$t = \frac{T}{\Delta T_{FD}} \quad (2.2)$$

wobei T die absolute Ereignisdauer seit dem Beginn der Ereignisbetrachtung ist. Der Verlauf der Überflutungshöhe ist in Abb. 2.8 dargestellt. Die Überflutungshöhe entspricht dem Wasserstand abzüglich 2,50 m. Die Betrachtung endet entweder mit dem Erreichen eines sicheren Zustandes der Anlage oder mit dem Eintritt eines Kernschadens, und nicht mit dem Ende der Überflutung. Insofern kann die relative Ereignisdauer $t > 1$ sein.

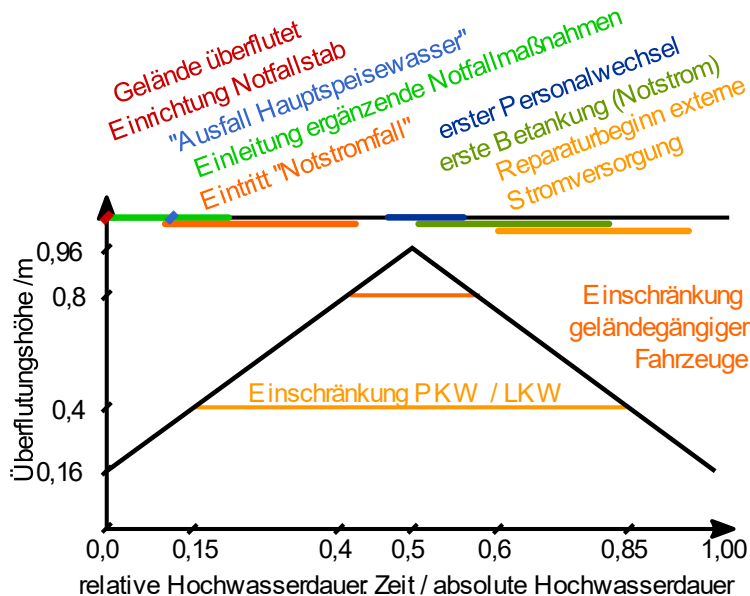


Abb. 2.8 Verlauf der Überflutungshöhe zum relativen Zeitpunkt t (dimensionslose Zeitangabe relativ zur gesamten Überflutungsdauer)

Einige Schutzmaßnahmen werden schon vor dem Beginn der Ereignisbetrachtung ab einem Wasserstand von 2,00 m durchgeführt. Eine Maßnahme ist das kontrollierte Abfahren der Anlage gemäß BHB der Referenzanlage auf den Zustand 'unterkritisch, kalt'. Aufgrund der geographischen Gegebenheiten und dem angenommenen Hochwasserereignis ist davon auszugehen, dass es länger als 30 h dauert, bis der Wasserstand die Nullmeterkote der Referenzanlage erreicht. Die Untersuchungen zum Nichtleistungsbetrieb der Anlage (siehe auch /BAB 03/, S. 4.1-6) haben ergeben, dass die mittlere Zeitdauer des Abfahrens bis zum Zustand 'unterkritisch kalt' ca. 22 h beträgt. Somit würde das Abfahren der Anlage rechtzeitig durchgeführt werden. Für die in diesem Vorhaben durchgeführten Untersuchungen wird postuliert, dass zu Beginn der Ereignisbetrachtung der Anlagenzustand 'unterkritisch, heiß' vorliegt. Diese Annahme entspricht der Herangehensweise in anderen PSA (vgl. /KKW 09/, Kap. 5.4.1), ist jedoch sehr konservativ.

Weiterhin werden die Hochwasserschotte bei einem Wasserstand von 2,00 m geschlossen bzw. angebracht. Als Dauer für die Durchführung dieser Schutzmaßnahme durch das Schichtpersonal bzw. die Werkfeuerwehr wurde im Vorhaben RS1539 (siehe /ROE 17/, S. 207) ein Wert von etwa 30 min ermittelt. Somit kann auch diese Maßnahme rechtzeitig abgeschlossen werden.

Die Werkfeuerwehr bleibt etwa bis zu einem Wasserstand von 3,00 m uneingeschränkt einsatzfähig (vgl. /KKW 11a/, S. 92). Während des Hochwasserereignisses ist jedoch mit Bewegungseinschränkungen von Personen und Fahrzeugen auszugehen. Die Einschränkungen hängen dabei maßgeblich von der Wattiefe ab, die in Tab. 2.12 dargestellt sind.

Tab. 2.12 Wattiefen von Personen (Annahme für normale Bewegung; für wichtige Aufgaben aus /KKW 11a/, S. 101 und für Fahrzeuge u. a. entnommen aus allgemeinen Fahrzeugbeschreibungen im Internet)

	Wattiefe	Anmerkung
Personen	< 0,4 m	normale Bewegung, darüber hinaus eingeschränkt
Personen	< 1,0 m	für wichtigen Aufgaben /KKW 11b/, S. 101/
Fahrzeuge, allgemein	< 0,4 m	PKW, LKW, Feuerwehrfahrzeuge
Fahrzeuge, geländegängig	< 0,8 m	z. B. einige Fahrzeuge der Feuerwehr, THW
Spezialfahrzeuge	> 1,0 m	z. B. der Bundeswehr

Anstieg des Wasserstands über das Bemessungshochwasser

In der ersten Phase wird der Anstieg des Hochwassers zwischen den relativen Zeitpunkten $t = 0$ und $t = 0,4$ betrachtet. Die Überflutungshöhe über dem Kraftwerks-Null (Nullmeterkote) während dieser Phase liegt also zwischen 0,16 m und 0,80 m. Die Bewegung mit Fahrzeugen ist entsprechend der Tab. 2.12 zu weiten Teilen eingeschränkt. Auch die Bewegung zu Fuß ist eingeschränkt, jedoch für wichtige Aufgaben möglich.

Allerdings kann ein Personalwechsel auf dem Anlagengelände aufgrund der eingeschränkten Bewegungsmöglichkeiten (Index: eB) ab dem relativen Zeitpunkt $t_{eB} = U(0,05;0,25)$ nicht mehr gewährleistet werden, wobei die angenommene Gleichverteilung U Unsicherheiten im Verlauf des Hochwassers um den Mittelwert 0,15 bzw. einer Überflutungshöhe von 0,40 m widerspiegelt. Der Personalwechsel wird nach einer Schichtdauer (Index: SD) von $\Delta T_{SD} = U(12;48)$ h notwendig, da ansonsten die Fehleranfälligkeit des Personals zu groß wird. Die hier angenommene Gleichverteilung gibt die Erfahrungen aus anderen Katastrophenlagen wieder, dass Arbeiten auch nach den üblichen 12 Stunden fehlerfrei ausgeführt werden können, zumal auch ohne Personalwechsel Ruhephasen möglich sind. Zudem kann ab einer Überflutungshöhe von 0,40 m bzw. dem relativen Zeitpunkt $t = 0,15$ ein anlagenintern vorhandenes Boot eingesetzt werden (siehe /KKW 11a/, S. 93). Das Boot befindet sich im Gebäude der Feuerwehr und kann während des Hochwasserereignisses rechtzeitig in Betrieb genommen werden.

Da ein weiterer Anstieg des Wasserstandes voraussehbar ist, wird bei diesem Hochwasserereignis unterstellt, dass der Notfallstab zum relativen Zeitpunkt $t = 0,0$ eingerichtet wird (vgl. /KKW 11a/, S. 101). Es wird angenommen, dass der Notfallstab in die externe Ausweichstelle einberufen wird, da eine erschwerte Zugänglichkeit zum Anlagengelände absehbar ist. Der Notfallstab leitet frühzeitig unter Annahme einer Gleichverteilung zum zufälligen Zeitpunkt $t_{NFM} = U(0,0;0,2)$ ergänzende Notfallmaßnahmen ein (Index: NFM).

Am Anfang der Ereignisbetrachtung zum relativen Zeitpunkt $t = 0,1$, entsprechend einer Überflutungshöhe von 0,32 m, wird angenommen, dass Gebäude ohne besonderen Hochwasserschutz wie das Maschinenhaus (nach /KKW 09/, Kap. 5.4.3.2) und das Versorgungsanlagegebäude (entsprechend /KKW 09/, Kap. 5.4.3.2) sowie deren Systeme nicht mehr verfügbar sind. Im Maschinenhaus fallen das An- und Abfahrpumpensystem LAJ sowie die Speisewasserpumpenanlage LAC aus, weshalb es zur Transiente 'Ausfall Hauptspeisewasser' und dem Beginn der Notbespeisung kommt (siehe /BHB 19/,

Kap. 2-4.8.2.3-4b). Die Notspeisepumpen befinden sich im Notspeisegebäude und werden deshalb nicht durch das Hochwasser beeinträchtigt. Der Betrieb der Notspeisepumpen, der über die Notstromerzeugeranlage 2 erfolgt, ist bis zur 'Übernahme durch die Notnackkühlkette' entsprechend /KKW 11a/, S. 99 erforderlich.

Gemäß Notfallhandbuch sind für die Notfallmaßnahme 'Sekundärseitiges Druckentlasten und Bespeisen' (SDE) u. a. Handmaßnahmen für die Bespeisung aus dem Speisewasserbehälter im Maschinenhaus vorgesehen. Da das Maschinenhaus nicht verfügbar ist, entfällt diese zusätzliche Maßnahme. Es verbleibt jedoch die vorgesehene Haupt-Bespeisungsmöglichkeit mittels mobiler Feuerlöschpumpe vom Notspeisegebäude aus. Sollte auch diese Maßnahme komplett ausfallen, ist gemäß Notfallhandbuch die Notfallmaßnahme 'Primärseitiges Druckentlasten und Bespeisen' (PDE) durchzuführen. Dies ist auch bei dem angenommenen, sehr unwahrscheinlichen Hochwasserereignis möglich.

Zum gleichen relativen Zeitpunkt $t = 0,1$ wie die Nichtverfügbarkeit des Maschinenhauses und des Versorgungsanlagegebäudes ist zudem die Überflutung des Notstromdieselgebäudes zu verhindern (vgl. /KKW 09/, Kap. 5.4.3.1). Das Gebäude wird bei Hochwasserereignissen durch das Schließen schwenkbarer Hochwasserschotten geschützt, ein geringer Wassereintritt lässt sich über die Sumpfpumpen bzw. die mobilen Pumpen abführen. Ein Ausfall dieser Hochwasserschutzmaßnahmen ist jedoch theoretisch möglich. Hierfür wird eine Ausfallwahrscheinlichkeit von $8,5 \cdot 10^{-5}$ pro Anforderung berücksichtigt (vgl. /KKW 09/, Kap. 5.4.3.1).

Der Notstromfall (Index: NSF) tritt gleichverteilt zum relativen Zeitpunkt $t_{NSF} = U(0,0;0,4)$ ein. Für die nachfolgende Ausfallannahme wird darauf hingewiesen, dass die dargestellte Situation nicht die aktuelle Situation in der Referenzanlage widerspiegelt. Es wird konservativ angenommen, dass die Ursache für den Notstromfall ein überflutungsbedingtes Versagen des Netzschanlagegebäudes (400 kV-Schaltanlage) ist. In diesem Fall wird die Notstromerzeugeranlage 1 angefordert. Aufgrund der oben erläuterten Annahmen in Bezug auf die Kraftstoffreserven beider Notstromerzeugeranlagen 1 und 2 wird hier von einer Dreiecksverteilung der Kraftstoffreserven (Index: KSR) für eine Betriebsdauer von drei (Systemauslegung) bis sieben Tagen (realistische Abschätzung im Rahmen des Stresstests) $\Delta T_{KSR} = T(3,3,7)$ d ausgegangen, die aber nicht den aktuellen Nachweisstand der Referenzanlage wiedergeben. Der Modalwert der Dreiecksverteilung liegt beim Minimum, da zum einen die Reserve durch den Gesetzgeber mindestens vorgegeben ist und zum anderen der eventuell vorzeitige Betrieb der Notstromerzeugeran-

lage 2 berücksichtigt wird. Die zusätzliche Betriebsdauer der Notstromerzeugeranlage 1 durch den Kraftstoff der Notstromerzeugeranlage 2 liegt bei 19 Stunden (siehe Abschnitt 2.4.1.3).

Die mobilen Netzersatzanlagen werden nicht zusätzlich berücksichtigt, da in /KKW 12b/, S. 74 sowie /BMU 17/, S. 23 und S. 25 keine Angaben zu den betrachteten Dauern eines langanhaltenden Notstromfalls gemacht werden und der Kraftstoffbedarf von ca. 0,15 m³/h (siehe Abschnitt 2.4.1.3) ebenfalls nicht ohne zusätzliche Maßnahmen sichergestellt werden kann. Bei einem kausalen bzw. zufälligen Systemausfall der Notstromerzeugeranlage 1 wird die Notstromerzeugeranlage 2 in Betrieb genommen. Sollte der Kraftstoff für den Betrieb der Notstromerzeugeranlage 1 nicht ausreichen, kann auch die Notstromerzeugeranlage 2 nicht weiter betrieben werden, da deren Kraftstoff schon für den Betrieb der Notstromerzeugeranlage 1 berücksichtigt wurde. Danach ist eine Kühlung des Kerns nur noch über Notfallmaßnahmen möglich.

Phase der Hochwasserspitze: Wasserstand bis knapp unter 3,50 m (Schutzhöhe)

An die Anstiegsphase schließt sich die Hochwasserspitze an. Diese Phase beginnt zum relativen Zeitpunkt $t = 0,4$ bei einer Überflutungshöhe von 0,80 m, erreicht den höchsten Wasserstand mit einer Überflutungshöhe von 0,96 m zum relativen Zeitpunkt $t = 0,5$ und endet bei $t = 0,6$ mit gleichem Wasserstand wie zu Beginn der Phase. Während der gesamten Phase sind Personenbewegungen außerhalb der geschützten Gebäude nur eingeschränkt möglich. Außerdem ist entsprechend der Wattiefen in Tab. 2.12 die Werkfeuerwehr nach Aussage des Betreibers in /KKW 11a/, S. 92 nur eingeschränkt einsatzfähig. So können beispielsweise geländegängige Feuerwehrfahrzeuge ab einer Überflutungshöhe von 0,80 m nicht mehr bewegt werden. Allerdings können das anlageneigene Boot eingesetzt und tragbare Geräte damit transportiert werden.

Phase des Hochwasserrückgangs: Wasserstand auf 2,66 m

Nach der Hochwasserspitze folgt ab dem relativen Zeitpunkt $t \geq 0,6$ die dritte Phase mit dem Rückgang des Wasserstandes bis zum Bemessungshochwasser zum relativen Zeitpunkt $t = 1,0$. Ab hier können wieder geländegängige Fahrzeuge mit Wattiefen von 0,8 m das Anlagengelände befahren. Die Einschränkungen in den Bewegungsmöglichkeiten von Personen und Fahrzeugen sind identisch zur ersten Phase, somit ist ab dem relativen Zeitpunkt $t = 0,85$ (Überflutungshöhe 0,40 m) bzw. einschließlich von Unsicher-

heiten im Hochwasserverlauf $t_{UB} = U(0,75;0,95)$ wieder eine uneingeschränkte Bewegung (Index: uB) möglich.

Ab dem relativen Zeitpunkt $t_{RESV} = U(0,55;0,65)$, wobei der Index RESV für die Reparatur der externen Stromversorgung steht, um den Mittelwert 0,6 (Überflutungshöhe 0,40 m) kann auch mit den Reparatur- und Aufräumarbeiten begonnen werden, da geländegängige Fahrzeuge eingesetzt werden können. Erste Priorität hat die Wiederherstellung der externen Stromversorgung. Mögliche Behinderungen der Arbeiten durch Verschmutzungen nach der Überflutung werden als gering eingeschätzt, da diese mit ausreichend zur Verfügung stehenden Mitteln schnell beseitigt werden können. Daher wird angenommen, dass die Reparaturdauer der externen Stromversorgung $\Delta T_{RESV} = U(0;3)$ d beträgt, wobei auch zu vernachlässigende Reparaturdauern bei sehr geringen Schäden betrachtet werden. Sobald die Reparatur abgeschlossen ist, ist ein Betrieb der Notstromerzeugeranlagen und deren Versorgung mit Betriebsstoffen und Ersatzteilen nicht mehr erforderlich.

Zusammenfassung

Abschließend werden nochmal alle Einschränkungen, auslösenden Ereignisse und Maßnahmen in Tab. 2.13 zusammengefasst. Die Annahme einer Gleichverteilung zwischen Minimum und Maximum ist durch die beiden Grenzwerte gekennzeichnet.

Maßgeblich für einen möglichen Kernschaden sind die beiden auslösenden Ereignisse 'Ausfall Hauptspeisewasser' zum relativen Zeitpunkt $t = 0,1$ und 'Notstromfall' zum relativen Zeitpunkt t_{NSF} . Um einen Kernschaden zu verhindern, müssen daher die Bespeisung über die Notspeisepumpen, die Deionatversorgung sowie die Stromversorgung sichergestellt werden. Aufgrund des Schutzniveaus des Notspeisegebäudes sowie der Möglichkeiten zur Deionat- bzw. Wasserversorgung wird nur die Stromversorgung D1 als kritisch betrachtet.

Tab. 2.13 Zusammenfassung des Ereignisverlaufes Hochwasser

Relative Zeit t ; Überflutungshöhe	Ereignis	Ursache
0,00; 0,16 m	Beginn der Anstiegsphase mit der Überflutung des Anlagengeländes (Höhe des Bemessungshochwassers)	
0,00	Einrichtung Notfallstab	

Relative Zeit t ; Überflutungshöhe	Ereignis	Ursache
0,10; 0,32 m	Transiente 'Ausfall Hauptspeisewasser'	Maschinenhaus nicht mehr verfügbar
0,10	Ausfall Deionatpumpen (Deionatversorgung des Speisewasserbehälters)	Versorgungsanlagengebäude ausgefallen
0,10	Sekundärseitige Druckentlastung und Bespeisung nicht möglich	Maschinenhaus nicht mehr verfügbar
0,10	Primärseitige Druckentlastung und Bespeisung	Ausfall sekundärseitige Druckentlastung und Bespeisung
$t_{NFM} = U(0,0;0,2)$	Einleitung ergänzender Notfallmaßnahmen	Systemausfälle und absehbare, langandauernde Hochwasserlage
$t_{NFM} + \Delta T_{LB}/\Delta T_{FD}$	Ergänzende Notfallmaßnahme 'Versorgung über Luftbrücke' (eingeschränkt) verfügbar	Einleitung ergänzender Notfallmaßnahmen
$t_{NFM} + \Delta t_{LB}$	Ergänzende Notfallmaßnahme 'Versorgung über Fährbetrieb' (eingeschränkt) verfügbar	Einleitung ergänzender Notfallmaßnahmen
0,10	Möglicher Ausfall der 10 kV-Notstromhauptverteilungen	mögliche Überflutung Notstromerzeugergebäude (nur bei Versagen der Schotte)
$t_{NSF} = U(0,0;0,4)$	Auslösendes Ereignis 'Notstromfall'	hochwasserbedingt (Postulat)
t_{NSF}	Betrieb der Notstromversorgung D1	Notstromfall
$t_{KSV} = \Delta T_{KSR}/\Delta T_{FD}$	Kraftstoffversorgung der Notstromerzeugeranlagen 1 und 2 erforderlich	
$t_{NSF} + \Delta t_{KSR}$	Ereignis 'Ausfall der Notstromerzeugeranlagen 1 und 2 durch Kraftstoffmangel'	Betankung der Notstromerzeugeranlagen 1 und 2 nicht möglich
t_{NSF}	Ereignis 'Kausaler Ausfall der Niederspannungs-Notstromversorgung D1'	bis zum Systemausfall unbemerktes Eindringen von Wasser in das Schaltanlagengebäude (Postulat, siehe Abschnitt 2.5.4)
t_{NSF}	Betrieb der Notstromversorgung D2	Ausfall der Notstromversorgung D1 durch Ausfall der Niederspannungsversorgung
0,15; 0,40 m	Anlageninternes Boot kann eingesetzt werden	
$t_{eB} = U(0,05;0,25)$	Personenbewegung nur eingeschränkt möglich	Überflutungshöhe

Relative Zeit t ; Überflutungshöhe	Ereignis	Ursache
t_{eB}	Bewegung auf Anlagengelände mit Fahrzeugen nicht möglich	Überflutungshöhe
$t_{PW} = t_{eB} + \Delta T_{SD} / \Delta T_{FD}$	Personalwechsel erforderlich	
0,40; 0,80 m	Beginn der Hochwasserspitze	
0,40	Geländegängige Feuerwehr-Fahrzeuge nicht mehr bewegungsfähig	
0,50; 0,96 m	Maximale Überflutungshöhe	
0,60; 0,80 m	Ende der Hochwasserspitze	
0,60	Geländegängige Fahrzeuge auf dem Anlagengelände wieder bewegungsfähig	
$t_{RESV} = U(0,55;0,65)$	Beginn der Reparatur der externen Stromversorgung	
$t_{ESV} = t_{RESV} + \Delta T_{RESV} / \Delta T_{FD}$	Erfolgreiche Reparatur der externen Stromversorgung	
0,85; 0,40 m	Anlageninternes Boot kann nicht mehr eingesetzt werden (Überflutungshöhe < 0,40 m)	
$t_{uB} = U(0,75;0,25)$	Fahrzeugen auf Anlagengelände wieder bewegungsfähig	
t_{uB}	Personenbewegung uneingeschränkt möglich	
1,00; 0,16 m	Ende der Überflutung des Anlagengeländes (Höhe des Bemessungshochwassers)	

Die Stromversorgung erfolgt über die Notstromerzeugeranlage 1. Die dafür nötigen Ressourcen sind in Tab. 2.14 zusammengefasst (entnommen aus der Systembeschreibung und /KKW 11/, S. 126). Aufgrund der Überflutungshöhe von mehr als 0,40 m des Anlagengeländes ist während der Zeitspanne zwischen t_{eB} und t_{uB} eine Versorgung der Notstromerzeugeranlagen mit Tankwagen nicht möglich. Wenn zwischen dem Eintritt des Notstromfalls zum relativen Zeitpunkt t_{NSF} und dem Zeitpunkt t_{uB} eine Kraftstoff-Betankung nötig wird, also ab einer modellierten Überflutungsdauer von vier Tagen (Eintritt Notstromfall zum relativen Zeitpunkt $t_{NSF} = 0,1$, $\Delta T_{KSR} = 3$ d) bis zu 16 Tagen (Eintritt Notstromfall zum relativen Zeitpunkt $t_{NSF} = 0,4$, $\Delta T_{KSR} = 7$ d) in Tab. 2.14, werden beide Notstromerzeugeranlagen 1 und 2 ausfallen.

Weiterhin können Komponenten der Notstromerzeugeranlage während des Betriebs ausfallen. Ersatzteile können nicht über normale LKW zur Referenzanlage gebracht wer-

den. Hier sind insbesondere Ausfälle aus gemeinsamer Ursache (GVA) bei der längeren Betrachtungsdauer zu berücksichtigen.

Tab. 2.14 Benötigte Ressourcen für den Betrieb der Notstromerzeugeranlage 1

Maßnahme	Anforderung	Ressourcen	Dauer
Kraftstoff-Betankung mit Tankwagen	nach 3 d bis 7 d (ΔT_{KSR})	1 Person Tankwagen mit Fahrer	1,0 h für Befüllung
Kraftstoffverbrauch	kontinuierlich	4,5 m ³ /h = 3,85 t/h bzw. 2,25 m ³ /h bei zwei Aggregaten	
Aufbau Kraftstoffreservepumpe zwischen Vorratsbehälter und Betriebsbehälter	Ausfall der Kraftstoffpumpe	2 Personen Kraftstoff-Reservepumpe	2,0 h
Nachfüllung mit Schmiermittel	Ausfall der Schmiermittelpumpe	1 Person Handpumpe für Schmiermittel	0,5 h

Zusätzlich ist während der relativen Zeitspanne zwischen t_{eB} und t_{uB} (Überflutungshöhe mehr als 0,40 m) ein Personalwechsel auf dem Anlagengelände nicht möglich, da die Bewegung von Personen eingeschränkt ist. Bei verlängerten Arbeitszeiten von über, $\Delta T_{SD} = U(12;48)$ h ist unter den ungewohnten Arbeitsbedingungen während des Hochwasserereignisses von einer erhöhten Fehleranfälligkeit auszugehen.

2.5.3 Ergänzende Notfallmaßnahmen

Um bei langandauernden Überflutungen einen Ausfall der Notstromversorgung zu vermeiden und den Personalwechsel sicherzustellen, werden im Folgenden ergänzende Notfallmaßnahmen zur Ressourcenversorgung betrachtet. Die Entwicklung und Berücksichtigung ergänzender Notfallmaßnahmen bei langanhaltenden Ereignissen in einer PSA unterliegen den nachfolgend zusammengefassten Grundgedanken.

- Die Nichtverfügbarkeit der vorgesehenen Versorgungswege für Ressourcen und damit der Ausfall der Versorgung führt bei ausreichend langer Ereignisdauer mit Sicherheit zu einem Ausfall aller Systeme und damit zu einem Kernschaden.
- Das Anlagenpersonal und die dahinter handelnden Organisationen haben aufgrund des langanhaltenden Ereignisses ausreichend Zeit, Maßnahmen umzusetzen, um einen Ausfall der Systeme zu vermeiden.

- Die hier diskutierten ergänzenden Notfallmaßnahmen basieren nicht auf anlagen-spezifischen Gegebenheiten. Die ergänzenden Notfallmaßnahmen sind vielmehr ge-nerisch und auf andere (auch internationale) Anlagenstandorte anwendbar, da diese über ähnliche Strukturen und Mittel verfügen.

Aufbauend auf den Erfahrungen aus bisherigen schweren Störfällen an Kernkraftwerks-standorten ist davon auszugehen, dass vergleichbare Maßnahmen eingeleitet werden. Daher ist eine Einbindung in eine PSA im Rahmen einer forschungsorientierten Arbeit gerechtfertigt.

2.5.3.1 Benötigte Ressourcen

Personal

Während des angenommenen Hochwasserereignisses werden unterschiedliche Perso-nengruppen benötigt. Der Notfallstab besteht aus insgesamt 15 Mitgliedern und befindet sich während des angenommenen Hochwasserereignisses nicht auf dem Anlagenge-lände, sondern an einem anderen gut erreichbaren Ort (vorgesehene Ausweichstelle). Dementsprechend werden die 15 Personen in den ergänzenden Notfallmaßnahmen nicht weiter berücksichtigt. Um alle Aufgaben für den Anlagenbetrieb, bei Störfällen und für die Durchführung von Notfallmaßnahmen auf dem Anlagengelände sicherzustellen, sind entsprechend /BHB 17/, S. 6 eine „Mindestschichtbesetzung“ sowie die „Mindest-wartenbesetzung“ erforderlich. Weiterhin muss die Besetzung der Werkfeuerwehr si-chergestellt sein.

Die Mindestwartenbesetzung der Referenzanlage beträgt drei Personen, die des Nach-barblocks beträgt zwei Personen. Die Mindestschichtbesetzung wird mit elf Personen für die Referenzanlage und zwei Personen für den Nachbarblock angegeben. Ergänzend ist das Personal des Objektschutzes zu berücksichtigen. Da ein langanhaltendes Ereignis betrachtet wird, ist zusätzlich von Verwaltungspersonal auszugehen. Für Schichtbeset-zung, Objektschutz und Verwaltung wird von 30 und 50 Personen sowie 20 bis 30 Per-sonen für den Nachbarblock ausgegangen. Für die Werkfeuerwehr wird eine Personal-stärke von 50 Personen angenommen. Der Personalbedarf während des Hochwas-serereignisses kann komplett durch die vorhandene Personalkapazität der Referenzan-lage gedeckt werden. Insgesamt sind somit etwa 105 bis 135 Personen auf dem Anla-gengelände nötig, die jeweils nach zwölf Stunden ausgetauscht werden müssen, um eine erhöhte Fehlerwahrscheinlichkeit bei Handlungen zu vermeiden.

Ressourcen für Notstromerzeugeranlage

Die Notstromerzeugeranlage 1 bzw. 2 muss je nach Betriebsweise nach drei bis sieben Tagen nach dem Eintritt des Notstromfalls mit Kraftstoff betankt werden. Dafür werden für die Notstromerzeugeranlage 1 etwa 4 t pro Stunde benötigt. Beim Betrieb der Notstromerzeugeranlage 2 sind 0,6 t pro Stunde und beim Betrieb der mobilen Ersatzanlagen sind 0,15 t pro Stunde nötig. Letztere werden hier jedoch nicht weiter berücksichtigt. Zudem werden weitere Betriebsmittel, wie Schmierstoffe etc., kontinuierlich benötigt, die jedoch hinsichtlich der geringeren Menge hier nicht genauer betrachtet werden.

Das zufällige Versagen von Komponenten der Notstromerzeugeranlagen während des angenommenen Hochwasserereignisses wird in der PSA berücksichtigt. Die Wiederherstellungsmaßnahmen der Komponenten werden durch das Hochwasser nicht eingeschränkt (Gebäude zugänglich, Personal vorhanden) und sind im Folgenden deswegen nicht weiter ausgeführt. Allerdings kann es zu übergreifenden Ausfällen durch ein hochwasserbedingtes kausales Folgeereignis kommen. Das kausale Folgeereignis wird in Abschnitt 2.5.4 betrachtet.

Zusammenfassung und Bewertung der benötigten Ressourcen

Die benötigten Ressourcen werden in Tab. 2.15 zusammengefasst. Die Versorgung mit den Ressourcen ist mit normalen Einsatzmitteln nur bis zur angegebenen maximalen Überflutungshöhe möglich. Im Falle höherer Überflutungshöhen sind somit die ergänzenden Notfallmaßnahmen zur Einrichtung alternativer Versorgungswege nötig.

Tab. 2.15 Erforderliche Ressourcen und maximale Überflutungshöhe, bis zu der die Versorgung noch möglich ist

Ressource	Beschreibung	Maximale Überflutungshöhe
Personalbedarf	bis 135 Personen, Personalwechsel nach 12 bis 48 h (ΔT_{SD})	0,40 m (t_{eB} bis t_{uB})
Kraftstoff	4 t/h Kraftstoff für Notstromerzeugeranlage 1 und 2 nach drei bis sieben Tagen (ΔT_{KSR}) nach Eintritt des Notstromfalls	0,40 m (t_{eB} bis t_{uB})

2.5.3.2 Mögliche Beschränkungen der Kräfte und Mittel

Durch die überregionale Ausdehnung des angenommenen Ereignisses können die beschriebenen nicht kerntechnisch-spezialisierten Organisationen auch für andere Ein-

satzschwerpunkte nötig sein, wodurch deren Kräfte und Mittel eventuell für den Einsatz an der Referenzanlage beschränkt werden. Um mögliche Beschränkungen abschätzen zu können, werden zunächst umliegende Kernkraftwerke und anschließend andere Einsatzschwerpunkte dargestellt. Abschließend wird eine mögliche Schwerpunktbildung innerhalb des Hochwasserereignisses diskutiert.

Zunächst werden unterschiedliche mögliche Einsatzschwerpunkte im Rahmen des gesamten Hochwasserereignisses betrachtet. Insbesondere können weitere Kernkraftwerke betroffen sein. Ein zur Referenzanlage benachbarter Reaktorblock befindet sich /KKW 20/ am gleichen Anlagenstandort in der Rückbauphase. Ein weiterer Kernkraftwerksstandort befindet sich am gleichen Fluss wie die Referenzanlage in einer Entfernung von weniger als 100 km. Dieser wird hier nicht weiter betrachtet, da der Rückbau des Reaktorblocks bereits weitestgehend abgeschlossen wurde.

Drei weitere, Kernkraftwerksstandorte mit noch im kommerziellen Betrieb befindlichen Reaktoren befinden sich in einer Entfernung zwischen 100 und 300 km zum Referenzstandort. Diese Kernkraftwerke befinden sich nicht im Wassereinzugsgebiet des angenommenen Hochwasserereignisses. Das einzige weitere Kernkraftwerk innerhalb des Einzugsgebietes ist der Nachbarblock am gleichen Standort. Aufgrund des fortschreitenden Rückbaus dieses Reaktorblocks ist keine energieintensive, aktive Kühlung mehr erforderlich. Somit sind auch keine zusätzlichen Ressourcen für Notfallmaßnahmen erforderlich. Dementsprechend wird lediglich das Personal auf dem Anlagengelände in Bezug auf Aspekte mehrere Reaktorblöcke bzw. mehrere Radionuklidquellen betreffend (wie. z. B. die Werkfeuerwehr) berücksichtigt. Auf eine Unterscheidung der Blöcke wird jedoch nicht weiter eingegangen.

Weiterhin gibt es andere mögliche Einsatzschwerpunkte im Hochwassereinzugsgebiet des Flusses. Eine kurze Übersicht findet sich nachfolgend in Tab. 2.16.

Tab. 2.16 Auswahl möglicher Einsatzschwerpunkte während des angenommenen Hochwasserereignisses

Einsatzschwerpunkt	Art der Gefährdung
vier Großstädte	Gefährdung von Krankenhäusern oder Pflegeheimen
Kraftwerke, Häfen oder Industriegebiete	chemische Gefahren für Gewässer
mehrere Autobahnbrücken sowie Brücken für zahlreiche Bundesstraßen und Bahnstrecken	Gefahr des Einsturzes und der langfristigen Nichtverfügbarkeit wichtiger Verkehrswege

Einsatzschwerpunkt	Art der Gefährdung
Stromversorgung, Wasserversorgung	Gefährdung der Infrastruktur (auch überregional)
Bevölkerung (regional)	Gefahr der eingeschränkten Versorgung mit Trinkwasser, Essen und Medikamenten

Das Tōhoku-Erdbeben im März 2011 mit den Reaktorunfällen von Fukushima Daiichi wird als Beispiel für ein überregionales Ereignis mit der Gefährdung eines Kernkraftwerkes herangezogen. Bei diesem Erdbeben und dem nachfolgenden Tsunami waren weite Küstenteile Japans und damit wichtige Infrastrukturen wie z. B. Verkehrswege (Straße, Eisenbahn), Häfen, Deichanlagen, die überregionale Stromversorgung, die Öl-, Gas- und Kohleindustrie sowie mehrere Kernkraftwerke, z. B. in Fukushima, Onagawa, und Tōkai betroffen. Die Kernkraftwerksblöcke von Fukushima Daiichi stellten frühzeitig einen Einsatzschwerpunkt dar, was sich unter anderem aus der unmittelbaren Information des japanischen Premierministers sowie aus der Unterstützung durch den KraftwerksHersteller, der Beschaffung von Autobatterien und tragbaren Stromerzeugern sowie der Anlieferung von Süßwasser durch die U.S. Armee ableiten lässt.

In dem hier angenommenen Hochwasserereignis sind neben der Referenzanlage keine anderen Kernkraftwerksstandorte betroffen. Ein möglicher Kernschaden an der Referenzanlage bildet somit einen wesentlichen Schwerpunkt neben den in Tab. 2.16 aufgeführten Schwerpunkten. Aufgrund der Erfahrungen aus dem Tōhoku-Erdbeben (größere räumliche Ausdehnung und Gefährdung mehrerer Kernkraftwerke) wird für das angenommene Hochwasserszenario (begrenzte räumliche Ausdehnung, nur ein Kernkraftwerk gefährdet) angenommen, dass die Referenzanlage den Hauptschwerpunkt bilden wird. Da in benachbarten Bundesländern und dem benachbarten Ausland die Infrastrukturen nicht oder ggf. nur geringfügig eingeschränkt sind, werden die nötigen Kräfte und Mittel auf der administrativ-taktischen und der nicht-nuklearen operativ-taktischen Ebene für den Einsatz am Referenzstandort nicht durch andere Einsatzschwerpunkte begrenzt.

2.5.3.3 Anforderung der Bundeswehr

Die zahlreichen Einsatzschwerpunkte in Tab. 2.16 werden, wie bei Hochwasserereignissen üblich, durch die regionalen Feuerwehren und das Technische Hilfswerk bearbeitet. Natürlich stehen zusätzlich auch Einsatzkräfte und Mittel auch für den Hauptschwerpunkt an der Referenzanlage zur Verfügung, es wird jedoch davon ausgegangen, dass

diese Kräfte für die anstehende Aufgabe, die Notstromdiesel mit Treibstoff zu versorgen, nicht über die nötigen Hilfsmittel verfügen.

Deshalb wird nachfolgend angenommen, dass der Notfallstab der Referenzstandortes über den KatS-Stab in erster Linie die Bundeswehr zur Unterstützung für die ergänzenden Notfallmaßnahmen anfordern wird. Die Bundeswehr hat den Vorteil, dass Kommunikationsstrukturen auf administrativ-organisatorischer Ebene über Verbindungspersonen und operativ-taktischer Ebene über interne Kommunikationsmittel zur Verfügung stehen und daher keine Probleme in der Kommunikation zu erwarten sind. Eine Aufgabe der Bundeswehr, die der Notfallstab anfordern wird, ist die Durchführung der ergänzenden Notfallmaßnahmen zur Einrichtung alternativer Versorgungswege, also dem Transport von Personen und Kraftstoff zur Referenzanlage unter Hochwasserbedingungen.

Der Einsatz der Bundeswehr im Inland ist, abgesehen vom Ausnahmefall während der aktuellen SARS-CoV2-Pandemie ab dem Jahr 2020, nur im Katastrophenfall erlaubt. Bei dem angenommenen Ereignis, einem langandauernden Hochwasserereignis in Kombination mit einem Notstromfall und dem möglichen Ausfall der Reaktorkühlung, wird der Katastrophenfall auf Landkreisebene mit Sicherheit ausgerufen. Somit kann die Bundeswehr eingesetzt werden.

2.5.3.4 Alternative Versorgungswege für benötigte Ressourcen

Die im angenommenen Hochwasserereignis benötigten Ressourcen zum Betrieb der Referenzanlage sind in Tab. 2.15 zusammengefasst. Da die angenommene Überflutungshöhe die maximale Überflutungshöhe von 0,40 m übersteigt, sind die vorgesehenen Versorgungswege nicht möglich, weshalb die ergänzenden Notfallmaßnahmen 'Versorgung über Luftbrücke' und 'Versorgung über Fährbetrieb' eingerichtet werden. Beide Versorgungswege sind unabhängig von der Überflutungshöhe auf dem Anlagengelände umsetzbar.

Für die beiden Versorgungswege Luftbrücke und Fährbetrieb wird ein Bereitstellungsraum am Sportzentrum des Nachbarortes eingerichtet, der in einer Entfernung von etwa 2 km zum Standort der Referenzanlage liegt. Er dient als Sammelstelle für das benötigte Personal und den Kraftstoff. Weiterhin befinden sich hier der Landeplatz und Ausgangspunkt für die Luftbrücke sowie Parkflächen für LKW und Fahrzeuge der Bundeswehr. Der vorgesehene Landeplatz auf dem Anlagengelände wäre zwar nicht überflutet, kann aber trotzdem nicht genutzt werden, da der nachfolgende Transport zu den Anlagenge-

bäuden über das überschwemmte Anlagengelände führt. Der Landeplatz für den Personaltransport über die Luftbrücke befindet sich deswegen auf dem Dach des Maschinenhauses der Referenzanlage. Der Kraftstofftank kann vor dem Notstromerzeugergebäude abgesetzt werden.

Ergänzende Notfallmaßnahme ‘Versorgung über Luftbrücke’

Die ergänzende Notfallmaßnahme ‘Versorgung über Luftbrücke’ (kurz: Luftbrücke) dient dem Transport von Personal, Kraftstoff für die Notstromerzeugeranlage sowie anderem Material von bis zu 7 t.

Der Transport des Personals von 135 Personen wird wie folgt organisiert:

- Einschleusung des Personals am Sammelplatz,
- Landeplatz auf dem Dach des Maschinenhauses,
- Zugang zum Maschinenhaus über ein Treppenhaus,
- Bewegung im Maschinenhaus auf höher gelegenen Ebenen.

30 Personen können pro Flug mit einem CH-53 transportiert werden. Damit sind für den Antransport (vom Bereitstellungsraum zum Maschinenhaus der Referenzanlage) fünf Flüge notwendig. Der Schichtwechsel erfolgt auf dem Anlagengelände. Anschließend folgt der Abtransport (vom Maschinenhaus der Referenzanlage zum Bereitstellungsraum), erneut mit fünf Flügen. Die angenommene Gesamtdauer eines Fluges wird in Tab. 2.17 hergeleitet. Ziel bei der Umsetzung der Luftbrücke ist, die Dauer für den Personaltransport auf zwei Stunden (eine Stunde Antransport, eine Stunde Abtransport) zu begrenzen. Dafür erfolgt die zeitliche Organisation wie in Tab. 2.18 zusammengefasst. Demnach werden jeweils nach zwölf Stunden zwei CH-53 für jeweils zwei Stunden benötigt.

Tab. 2.17 Angenommene Dauern der einzelnen Phasen während eines Transportes von Personen und Kraftstoff (Außenbehälter) über die Luftbrücke

Phase des Transportes	Personal	Kraftstoffbehälter
Einstieg, Anhängen (voll)	3 – 5 min	1 min
Start	1 min	1 min
Flug (voll)	1 – 3 min	2 – 4 min

Phase des Transportes	Personal	Kraftstoffbehälter
Landung	1 min	–
Ausstieg, Aushängen	3 – 5 min	1 min
Anhängen (leer)	–	2 – 4 min (da überflutetes Gelände)
Start [min]	1 min	–
Flug (leer)	1 – 3 min	2 – 4 min
Landung, Aushängen (leer)	1 min	1 min
Gesamte Zeitspanne	12 – 20 min	10 – 16 min

Tab. 2.18 Angenommene zeitliche Organisation des Personalwechsels (je eine Stunde An- und Abtransport) und des Kraftstofftransportes (vor allem Diesel) mit Kraftstoffbehälter über die Luftbrücke mit dem Hubschrauber CH-53

	Personalwechsel	Kraftstofftransport (< 7 t)
Anforderungsintervall	12 h	1 h
Geplante Dauer für An- und Abtransport	1 h + 1 h	< 1 h
Mögliche Transporte pro Std. und CH-53	3 – 5	> 1
Erforderliche Transporte pro Std.	5	1
Erforderliche CH-53	2	1

Der Kraftstofftransport erfolgt mit dem CH-53, der im Außenbehälter eine Last von maximal sieben Tonnen aufnehmen kann. Damit ist ein Flug pro Stunde nötig, wobei der volle Kraftstoffbehälter nur ausgehängt wird, ohne den Hubschrauber zu landen. Der Tankwagenanschluss des Kraftstoffvorratsbehälters für die Notstromerzeugeranlage befindet sich im Notstromerzeugergebäude in Richtung des Schaltanlagegebäudes. Der Kraftstoffbehälter kann in der Nähe des Tankwagenanschlusses abgelassen werden. Von dort wird eine provisorische Versorgungsleitung vom Tankwagenanschluss zum vollen Außenbehälter verlegt. Beim Rückflug wird der leere Kraftstoffbehälter wieder mitgenommen. Die angenommene Flugdauer für Hin- und Rückflug beträgt mit den Annahmen in Tab. 2.17 maximal 16 min. Damit wird kontinuierlich ein CH-53 pro Stunde für den Kraftstofftransport benötigt.

Für den Personal- und Kraftstofftransport werden die drei nötigen CH-53 in Tab. 2.18 nicht dauerhaft ausgelastet, weshalb Reservekapazitäten für sonstige Transporte von z. B. Ersatzpumpen, sonstige Betriebsmittel, Nahrungsmittel oder anderes Verbrauchsmaterial verbleiben. Der Kraftstoffbehälter ist mit bis zu sieben Tonnen belastbar, große Pumpen können deswegen nicht transportiert werden. Aus dem Personentransport ste-

hen zwei CH-53 mit einer Wahrscheinlichkeit von 83 % zur Verfügung (10 h Pause pro 12 h). Für den Kraftstofftransport steht ein CH-53 mit knapp 75 % zur Verfügung (44 min Pause pro 60 min). Wenn mehrere volle Kraftstoffbehälter auf dem Anlagengelände bevorratet werden, steht kontinuierlich mindestens ein Reservehubschrauber zur Verfügung.

Insgesamt werden somit mindestens drei CH-53 für den Personal- und Kraftstofftransport benötigt (die eingeschränkte Versorgung mit Kraftstoff kann mit einem CH-53 sichergestellt werden). Die Rüstzeit der CH-53 auf dem Bundeswehrgelände wird mit zwölf bis 36 Stunden angenommen. Die Flugzeit von dort bis zum Bereitstellungsraum beträgt bei einer Marschgeschwindigkeit von etwa 200 km/h und einer Strecke von 125 km etwa 40 min. Damit kann die Luftbrücke (Index: LB) mit vier CH-53 innerhalb von $\Delta T_{LB} = U(12;36) \text{ h}$ ihrer Anforderung durch den KatS-Stab am Bereitstellungsplatz einsatzbereit sein.

Ergänzende Notfallmaßnahme ‘Versorgung über Fährbetrieb’

Die ergänzende Notfallmaßnahme ‘Versorgung über Fährbetrieb’ (kurz: Fährbetrieb) mit der Amphibie M3 kann für den Personaltransport, Kraftstofftransport und Materialtransport bis zu 20 t mit einer Grundfläche von bis zu 50 m² genutzt werden. Für den Personalwechsel wird zusätzlich ein Busbetrieb vom Bereitstellungsraum an einen Übergabepplatz in der Nähe des Anlagengeländes eingerichtet. Dadurch kann die Fahrzeit der Amphibien M3 verkürzt werden. Die Fahrwege für den Fährbetrieb können weitgehend beliebig gewählt werden.

Etwa 60 Personen können mit einer Amphibie M3 auf der Ladefläche transportiert werden. Der Personalwechsel von 135 Personen wird wie bei der Luftbrücke organisiert. Demnach sollen der Antransport und der Abtransport des gesamten Personals nacheinander erfolgen und jeweils nicht länger als eine Stunde dauern. Als Gesamtdauer eines Transportes wird nach Tab. 2.19 eine Zeitspanne von 8 bis 16 min angenommen. Entsprechend wird der Personalwechsel wie in Tab. 2.20 zusammengefasst organisiert. Für den Personalwechsel wird somit mindestens eine Amphibie M3 benötigt.

Tab. 2.19 Angenommene Dauer der einzelnen Phasen während eines Transportes von Personen und Kraftstoff (im Container) über den Fährbetrieb

Phase des Transportes	Personal	Container
Einstieg, Beladen (voll)	3 – 5 min	1 – 3 min
Antransport zum Anlagengelände	1 – 3 min	3 – 5 min
Ausstieg, Entladen	3 – 5 min	2 – 5 min
Beladen (leer)	–	1 – 3 min
Abtransport vom Anlagengelände	1 – 3 min	3 – 5 min
Entladen (leer)	–	1 – 3 min
Gesamte Zeitspanne	8 – 16 min	11 – 22 min

Tab. 2.20 Angenommene zeitliche Organisation des Personalwechsels (1 h Antransport, 1 h Abtransport) und des Kraftstofftransportes (vor allem Diesel) über den Fährbetrieb mit der Amphibie M3

	Personalwechsel	Kraftstofftransport (< 20 t)
Anforderungsintervall	12 h	1 h
geplante Dauer für An- und Abtransport	1 h + 1 h	< 1 h
mögliche Transporte pro Stunde und Amphibie M3	3 – 6	2 – 5
nötige Transporte pro Std.	3	1
nötige Amphibien M3	1 + 1	1

Die Amphibie M3 kann sowohl den Diesel für die Notstromerzeugeranlage als auch Ersatzpumpen und sonstige Ladung in Containern bis zu 20 t transportieren. Für den erforderlichen Transport einer Kraftstoffmenge von 4 t pro Stunde ist nur ein Transport innerhalb von 5 Stunden notwendig. Um neben dem Kraftstofftransport spontan auf Anforderungen von notwendigen Ersatzteilen reagieren zu können, wird jedoch kontinuierlich eine Amphibie M3 für die Kraftstoffversorgung vorgehalten. Der Transport der Container erfolgt vom Bereitstellungsraum auf das Anlagengelände und wieder zurück. Aufbauend auf den Annahmen in Tab. 2.19 dauert ein Transport etwa 11 bis 22 min. Damit ist eine Amphibie M3 für die Kraftstoffversorgung und weiterer notwendiger Teile ausreichend, wie in Tab. 2.20 zusammengefasst ist.

Für den Personal- und Kraftstofftransport werden somit insgesamt zwei Amphibien M3 benötigt und zusätzlich ein Fahrzeug als Reserve angefordert (für die eingeschränkte Versorgung der Anlage mit Kraftstoff sind, einschließlich Reservefahrzeug, zwei Amphi-

bien M3 erforderlich). Die Rüstzeit der Fahrzeuge am Standort des Panzerpionierbataillons beträgt zwischen 12 und 36 h. Die Fahrzeit dauert etwa 7 bis 12 h. Somit kann der Fährbetrieb (Index: FB) mit drei Amphibien M3 nach der Anforderung durch den KatS-Stab innerhalb einer möglichen Dauer von $\Delta T_{FB} = U(19;48)$ h eingesetzt werden.

Ausfallanalyse der ergänzenden Notfallmaßnahmen

Um die Zuverlässigkeit der ergänzenden Notfallmaßnahmen zu bestimmen, werden Ausfallanalysen für die Luftbrücke und den Fährbetrieb durchgeführt. Dabei wurden jeweils folgende Möglichkeiten für Ausfälle diskutiert:

- A) Die Mittel sind am Standort nicht verfügbar (z. B. wegen Auslandseinsätzen) bzw. nicht einsatzbereit.
- B) Die Mittel sind nicht rechtzeitig am Standort verfügbar.
- C) Die Mittel sind vor Ort nicht einsetzbar (z. B. durch Wettereinflüsse oder zufälligen Ausfall).
- D) Das Anlagengelände ist nicht erreichbar (z. B. Zufahrt, Abstellplatz oder Landeplatz sind blockiert). Mögliche Ersatzhubschraubertypen bzw. Ersatzfahrzeuge werden nicht berücksichtigt.

Die Ergebnisse sind in Tab. 2.21 zusammengefasst und deren Herleitung nachfolgend genauer beschrieben.

Tab. 2.21 Ausfallwahrscheinlichkeiten p für die alternativen Versorgungswege

	Luftbrücke	Fährbetrieb
A) Mittel am Standort nicht bzw. nur eingeschränkt verfügbar	$p_A(N_{CH53} < N_{CH53,min})$ bzw. $p_A(N_{CH53} < N_{CH53,red})$	$p_A(N_{M3} < N_{M3,min})$ bzw. $p_A(N_{M3} < N_{M3,red})$
B) Mittel nicht rechtzeitig am Bereitstellungsraum verfügbar	$p_B(t_{KSV} < t_{LB})$ bzw. $p_B(t_{PW} < t_{CLB})$	$p_B(t_{KSV} < t_{FB})$ bzw. $p_B(T_{PW} < t_{FB})$
C) Mittel vor Ort nicht einsetzbar	$p_c = 0,0$	$p_c = 0,0$
D) Anlagengelände nicht erreichbar	$p_D = 0,0$	$p_D = 0,0$

Zunächst wird die Ausfallwahrscheinlichkeit der Luftbrücke untersucht.

- A) Am Standort des Hubschraubergeschwaders sind etwa 60 CH-53 stationiert. Der Anteil einsatzbereiter Hubschrauber wurde 2014 für unterschiedliche Hubschraubertypen untersucht /STA 14/. Demnach beträgt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Hubschrauber einsatzbereit ist, etwa $p_{CH53} = \frac{41}{190} = 0,22$. Dabei wird angenommen, dass sich etwa $N_{CH53}^{gesamt} = U(5;20)$ CH-53 am Standort befinden. Für den Personentransport und den Kraftstofftransport müssen insgesamt $N_{CH53,min} = 3$ CH-53 am Standort sein. Bei der Beschränkung auf die Kraftstoffversorgung werden nur $N_{CH53,red} = 1$ CH-53 benötigt. Damit kann mit einer Poisson-Verteilung die Wahrscheinlichkeit berechnet werden, dass nicht genügend einsatzbereite Hubschrauber $N_{CH53} < N_{CH53,min}$ am Standort verfügbar sind, wobei über alle möglichen Werte für N_{CH53}^{gesamt} gemittelt wird.
- B) Die Mittel für den Personalwechsel sind am Bereitstellungsraum nicht rechtzeitig verfügbar, wenn die Bereitstellung der Luftbrücke zum Zeitpunkt $t_{LB} = t_{NFM} + \Delta T_{SD} / \Delta T_{FD}$ größer ist als der Zeitpunkt des ersten notwendigen Personalwechsels $t_{PW} = t_{NFM} + \Delta T_{SD} / \Delta T_{FD}$ (12 bis 48 h nach Beginn der eingeschränkten Bewegung auf dem Anlagengelände). Aus diesen beiden Zeiten ergibt sich die Wahrscheinlichkeit $p_{B,p}$ in Tab. 2.21 für eine zu späte Bereitstellung des Personalwechsels. Bei längeren modellierten Überflutungsdauern ΔT_{FD} kommt es demnach mit einer geringeren Wahrscheinlichkeit zu einer zu späten Bereitstellung als bei kürzeren modellierten Überflutungsdauern. Der Zeitpunkt der ersten notwendigen Betankung ist $t_{KSV} = t_{NSF} + \Delta T_{KSR} / \Delta T_{FD}$, also zwischen drei und sieben Tagen nach Eintritt des Notstromfalls. Damit kommt es zur Wahrscheinlichkeit $p_{B,k}$ in Tab. 2.21, dass die Luftbrücke nicht rechtzeitig für einen Kraftstofftransport zur Verfügung steht.
- C) Nach Aussage der Bundeswehr sind die CH-53 allwetterflugtauglich. Somit kann ein systematischer Ausfall aller vier CH-53 durch Wettereinflüsse ausgeschlossen werden. Ein zufälliger Ausfall kann durch einen Reservehubschrauber kompensiert werden. Ein zufälliger Ausfall aller oder unzulässig vieler Hubschrauber vor Ort durch einen gemeinsam verursachten technischen Fehler wird nicht erwartet, da die Hubschrauber schon zum Einsatzort geflogen sind. Zudem sind Vorort-Reparaturen durch die Bundeswehr möglich. Es wird daher ausgeschlossen, dass die Mittel vor Ort nicht einsetzbar sind.
- D) Die Dachfläche des Maschinenhauses ist ausreichend groß und das Notstromerzeugungsgebäude auf vier Seiten freistehend. Somit sind improvisierte Alternativlösun-

gen für die Erreichbarkeit auf dem Anlagengelände möglich, eine Nicht-Erreichbarkeit wird ausgeschlossen.

Der Fährbetrieb kann ebenfalls durch die vier in Tab. 2.21 dargestellten Möglichkeiten ausfallen:

- A) Am Standort des Panzerpionierbataillons sind 30 Amphibien M3 stationiert. Für die Ausfallwahrscheinlichkeit der Amphibien M3 waren keine spezifischen Daten verfügbar. Daher wird die Verfügbarkeit der Schützenpanzer PUMA für die Ausfallanalyse verwendet. Laut /DBT 20/, S. 43 sind ein Viertel der Schützenpanzer funktionsfähig $p_{M3} = 0,25$. Hier wird angenommen, dass sich $N_{M3}^{gesamt} = U(5;10)$ von 30 Amphibien M3 am Standort des Panzerpionierbataillons befinden. Für den Personal- und Kraftstofftransport werden einschließlich Reservefahrzeug insgesamt $N_{M3,min} = 2 + 1$ Amphibien M3 benötigt. Bei Beschränkung auf den Kraftstofftransport werden nur $N_{M3,red} = 1 + 1$ Amphibien M3 (davon eine in Reserve) benötigt. Mit einer Binomialverteilung ergibt sich die mittlere Wahrscheinlichkeit, dass für den vollständigen Transport nicht ausreichend Fahrzeuge verfügbar sind.
- B) Eine freie Anfahrt der Amphibien M3 vom Standort des Panzerpionierbataillons zur Referenzanlage kann durch die Begleitung der Polizei sichergestellt werden. Verzögerungen durch die Verkehrslage sind daher nicht zu erwarten. Nach Tab. 2.13 kann der Fährbetrieb daher zum Zeitpunkt $t_{FB} = t_{NFM} + \Delta T_{FB}/\Delta T_{FD}$ bereitgestellt werden. Der erste Personalwechsel wird zum Zeitpunkt t_{PW} notwendig. Damit kann die Wahrscheinlichkeit berechnet werden, dass die Mittel zur Sicherstellung des Personalwechsels nicht rechtzeitig verfügbar sind.
- C) Ein Ausfall einer Amphibie M3 kann durch das Reservefahrzeug kompensiert werden, zumal Vorort-Reparaturmöglichkeiten durch die Bundeswehr bestehen. Systematische Ausfälle aufgrund des Wetters sind ebenfalls nicht zu erwarten. Ein gemeinsam verursachter technischer Ausfall wird, analog zu den Hubschraubern, nicht erwartet.
- D) Weiterhin wird das Anlagengelände aufgrund der Geländefähigkeit der Amphibie M3 und der flexiblen Streckenwahl immer erreichbar sein. Die Wahrscheinlichkeit, dass die Mittel vor Ort nicht einsetzbar sind, ist daher zu vernachlässigen.

2.5.3.5 Zusammenfassung und Endzustände

Die Anforderung und Einrichtung der beiden alternativen Versorgungswege Luftbrücke und Fährbetrieb erfolgt parallel ab dem relativen Zeitpunkt t_{NFM} . Deren Eckdaten sind in Tab. 2.22 zusammengefasst. Beide Versorgungswege können vollständig durch die Nichtverfügbarkeit der notwendigen Mittel an den Bundeswehrstandorten ausfallen sowie verspätet zur Versorgung zur Verfügung stehen. Die jeweiligen gesamten Ausfallwahrscheinlichkeiten werden aus der Summe der vier untersuchten Möglichkeiten gebildet.

Tab. 2.22 Übersicht zu alternativen Versorgungswegen für Personalwechsel von 135 Personen und Kraftstofftransport für die Notstromerzeugeranlagen 1 und 2

	Luftbrücke	Fährbetrieb
Transportmittel	3 CH-53	2 + 1 Amphibien M3
Standort	Hubschraubergeschwader	Panzerpionierbataillon
Kapazitäten für	Personalwechsel, Kraftstofftransport	
Vorlaufzeit	$12 \text{ h} < \Delta T_{LB} < 36 \text{ h}$	$19 \text{ h} < \Delta T_{FB} < 48 \text{ h}$
Ausfallwahrscheinlichkeit	p_{Ausfall} in Tab. 2.21	

Die Personalversorgung kann durch die ergänzenden Notfallmaßnahmen sichergestellt werden, wenn mindestens ein alternativer Versorgungsweg vollständig realisiert wurde. Sie kann zudem sichergestellt werden, wenn beide alternativen Versorgungswege eingeschränkt, also nur für den Kraftstofftransport, rechtzeitig einsatzbereit sind. Die Kraftstoffversorgung kann sichergestellt werden, wenn mindestens ein alternativer Versorgungsweg eingeschränkt in Betrieb genommen werden kann. In diesen Fällen wird von einer sicheren Versorgung der Referenzanlage mit den benötigten Ressourcen bis zur Wiederherstellung der externen Stromversorgung und dem Rückgang des Hochwassers ausgegangen. Demnach wird bei erfolgreicher Umsetzung der ergänzenden Notfallmaßnahmen ein sicherer Zustand der Referenzanlage erreicht.

Sind die ergänzenden Notfallmaßnahmen nicht erfolgreich, kann ggf. die externe Stromversorgung über das Hauptnetz rechtzeitig wiederhergestellt werden. In diesen Fällen führt der Ausfall der D1- und D2-Notstromversorgung wegen Treibstoffmangel nicht zum Kernschaden. Hier wird zusätzlich der Fall betrachtet, dass die Notstromversorgung nur für weniger als 10 h sichergestellt werden muss und anschließend wieder durch die externe Stromversorgung ersetzt werden kann.

Sollten die ergänzenden Notfallmaßnahmen nicht eingerichtet werden und eine rechtzeitige Wiederherstellung der externen Stromversorgung aufgrund des Wasserstandes nicht möglich sein, tritt der Verlust aller Systeme mit nachfolgendem Kernschaden ein. Die Ereignisabläufe sind in Abb. 2.9 kurz zusammengefasst. Dabei kommt es nicht darauf an, in welcher Reihenfolge entweder das Wasser rechtzeitig zurück geht (kurze Überflutungsdauer), die ergänzenden Notfallmaßnahmen rechtzeitig erfolgreich durchgeführt werden oder die externe Stromversorgung rechtzeitig wiederhergestellt werden kann. Sind die Notfallmaßnahmen zur Versorgung sowie die Wiederherstellung der Normalversorgung nicht erfolgreich, wird ein Kernschaden angenommen.

Wird nur ein Versorgungsweg teilweise realisiert, kann der Personaltransport nicht durchgeführt werden. Dies führt zu verlängerten Arbeitszeiten und damit zu einer erhöhten Fehlerwahrscheinlichkeit bei Handmaßnahmen (nach /SWA 83/, S. 5 – 13). Dabei wird vereinfachend angenommen, dass die erhöhte Fehlerwahrscheinlichkeit direkt zu einem Kernschaden führt. Diese Annahme wird bei der quantitativen Analyse im PSA-Modell nicht mehr verwendet, da dort die Fehlerwahrscheinlichkeit direkt berücksichtigt wird.

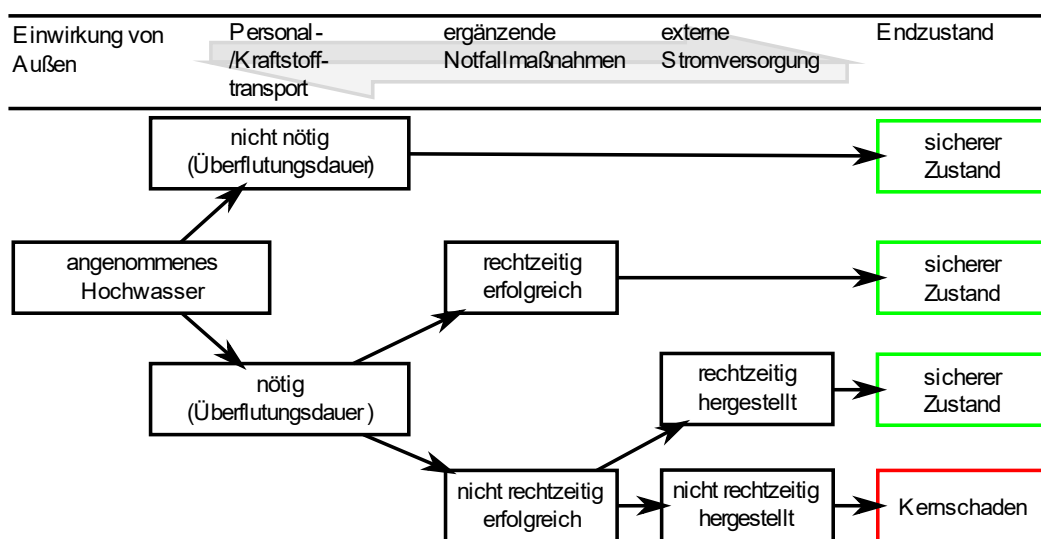


Abb. 2.9 Ereignisbaum für ein langandauerndes Hochwasser, bei dem ggf. ein Personal- bzw. Kraftstofftransport über die ergänzenden Notfallmaßnahmen 'Versorgung über Luftbrücke' und 'Versorgung über Fährbetrieb' sicherzustellen ist

Sofern weder die Luftbrücke noch der Fährbetrieb hinreichend realisiert werden können, kann der Kraftstofftransport nicht durchgeführt werden. In diesem Fall ist eine Kühlung

des Kerns nicht mehr möglich, was zu einem Kernschaden führen würde. In diesem Fall können noch die normalen Versorgungswege bei einem rechtzeitigen Ende der Einschränkungen im Hochwasserereignis wiederhergestellt werden, bevor ein Ausfall der Gleichstromversorgung eintritt. Dies ist der Fall, wenn entweder das Gelände zum Zeitpunkt $t_{UB} = U(0,75;0,95)$ wieder mit Tanklastwagen befahrbar ist (Notstromerzeugeranlage kann betankt werden) oder wenn die externe Stromversorgung zum Zeitpunkt $t_{ESV} = t_{RESV} + \Delta T_{RESV}/\Delta T_{FD}$ wiederhergestellt wurde. In diesen Fällen wird der Ausfall der Gleichstromanlage durch die Wiederherstellung der normalen Drehstromversorgung verhindert.

2.5.4 Ereigniskombination im angenommenen Hochwasserereignis

In bisher durchgeführten PSA wurden Ereigniskombinationen übergreifender Einwirkungen und insbesondere solcher Einwirkungen von außen aufgrund deren Komplexität und fehlender Leitfäden dazu nur selten in PSA einbezogen (vgl. /EC 17/, S. 23). Mittlerweile gehört eine Berücksichtigung von Ereigniskombinationen übergreifender Einwirkungen sowohl bei der Anlagenauslegung als auch bei der Sicherheitsbewertung von Kernkraftwerken zum Stand der Technik und findet auch in entsprechenden Regelwerksüberarbeitungen der IAEA (u. a. dem Safety Guide SSG-64 /IAE 21/, ebenso wie in den aktuellen Überarbeitungen DS523 und DS528 der PSA Safety Guides SSG-3 /IAE 10/ und SSG-4 /IAE 10a/) Berücksichtigung.

Auch unter der Annahme langandauernder Ereignisse erscheint eine Betrachtung von Ereigniskombinationen übergreifender Einwirkungen als nicht zu vernachlässigen. So können beispielsweise bei einem mehrere Wochen andauernden Hochwasser anlageninterne Brände, Explosionen oder Überflutungen durch die ggf. ansteigende Fehlerwahrscheinlichkeit von SSC als Folgeereignisse auftreten. Die Betriebserfahrung hat zudem auch gezeigt, dass sich bei solchen langandauernden Überflutungsereignissen die Wahrscheinlichkeit für unabhängig von dem anlagenexternen Hochwasserereignis während dessen Dauer auftretende Einwirkungen, insbesondere solchen von innen, erhöht und dementsprechend auch solche Kombinationen unabhängiger Ereignisse beobachtet wurden.

Demzufolge werden nachfolgend Ereigniskombinationen untersucht, wobei der Fokus auf Kombinationen kausaler Folgeereignisse liegt. Bei einer solchen Ereigniskombination hat immer ein initiales Ereignis, wie beispielsweise eine übergreifende Einwirkung

von innen oder außen, ein weiteres Ereignis direkt (kausal) zur Folge. Beispiele dafür, die sich auch in der internationalen Betriebserfahrung kerntechnischer Anlagen finden, sind unter anderem:

- durch ein Hochwasserereignis verursachtes Treibgut (biologische Einwirkung), welches zu einer Verstopfung des Kühlwassereinlasses führen kann,
- durch eine anlagenexterne hydrologische Einwirkung (typischerweise Hochwasser oder Sturzflut, siehe auch /SPE 18/) eindringendes Wasser, welches eine anlageninterne Überflutung sicherheitstechnisch relevanter Komponenten mit ggf. hochenergetischem elektrischen Versagen, u. a. durch Störlichtbögen (international als HEAF (*High Energy Arcing Fault*) bezeichnet) zur Folge haben kann.

2.5.4.1 Auswahl einer Ereigniskombination anhand qualitativer Kriterien

Für Überflutungen des Anlagengeländes aufgrund starker Regenfälle oder anderer anlagenexterner hydrologischer oder meteorologischer Einwirkungen finden sich in der Betriebserfahrung kerntechnischer Anlagen (siehe /ROE 17a/, S. 53ff) Ereigniskombinationen kausaler Folgeereignisse. So drang beispielsweise nach starken Regenfällen Wasser in sicherheitstechnisch relevante Gebäude, wie das Reaktorgebäude bzw. das Maschinenhaus von Kernkraftwerken in Japan (im Jahr 2016) und Deutschland (im Jahr 2011) ein, was zumindest in dem japanischen Kernkraftwerk zu Ausfällen sicherheitstechnisch relevanter elektrischer Komponenten mit der Möglichkeit eines weiteren anlageninternen Folgeereignisses führte und demzufolge auch international gemeldet wurde.

Ein Beispiel für eine Ereigniskombination von einer Einwirkung von außen mit zwei darauffolgenden Einwirkungen, d. h. einer Ereigniskette, ist das Eindringen von Wasser in einen Kabelkanal während eines Taifuns in Japan im Jahr 1985 mit nachfolgendem Störlichtbogen (HEAF) an einer Hochspannungskomponente und darauffolgendem Brand (siehe /NEA 21a/). Weitere Ereignisketten ergaben sich (siehe /ROE 21/ und /NEA 21a/) ebenfalls in japanischen Kernkraftwerken in den Jahren 2007 und 2011. Dabei kam es bedingt durch größere Erdbeben zunächst jeweils zu einem Störlichtbogenereignis mit darauffolgendem anlageninternem Brand.

Basierend auf der nationalen wie internationalen Betriebserfahrung, wird nachfolgend unterstellt, dass auch in Gebäude der Referenzanlage Wasser infolge einer langandauernden Überflutung eindringen und Einwirkungen von innen zur Folge haben kann. Einige Gebäude sind dabei für eine weitere Betrachtung nicht relevant, da sie entweder

gegen größere Wassermengen ausgelegt sind oder aufgrund des angenommenen Hochwassers als ausgefallen anzunehmen sind. Somit verbleiben noch

- das Reaktorgebäude,
- das Schaltanlagegebäude,
- das Notnebenkühlwasserpumpenbauwerk sowie
- die Zellenkühler 1-4.

In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass die gesicherten Zugänge nochmals etwa 0,50 m über der Schutzhöhe (die dem postulierten 100.000-jährlichen Hochwasserereignis zugeordnet ist) liegen. Eindringendes Wasser führt zwar zum Ausfall der Eigenbedarfs- und D1-Notstromversorgung (Notstromfall mit Ausfall des D1-Netzes), aber auch dann ist die Sicherheit der Anlage nicht unmittelbar gefährdet. In diesem Fall ist davon auszugehen, dass die Betriebsmannschaft und die Werkfeuerwehr das weitere Eindringen von Wasser in den Kontrollbereich durch temporäre Hochwasserschutzmaßnahmen (z. B. zusätzliche Abdichtungen oder Abschottungen mittels gefüllter Sandsäcke) an den Eingängen zum Reaktorgebäude oder dem Hilfsanlagegebäude ausreichend verhindert. Doch selbst wenn dies nicht gelingen sollte und das Wasser in das Untergeschoss des Hilfsanlagegebäudes einträte, wäre der sicherheitstechnisch relevante Reaktorgebäude-Ringraum davon nicht betroffen, da dessen Schleusentore waserdicht ausgelegt sind.

Im Schaltanlagegebäude erscheint ein unbemerktes Eindringen von Wasser infolge einer Geländeüberflutung möglich. Weiterhin befinden sich dort die Anschlüsse der D1-Notstromtransformatoren, die für die D1-Notstromversorgung im hier angenommenen Notstromfall relevant sind. Deren Ausfallen fordert weitere aktive Sicherheitssysteme in der Notstromversorgung an. Ein Ausfall ist daher sicherheitstechnisch relevant. Daher wurde das Szenario 'kausaler Ausfall der D1-Notstromtransformatoren im Schaltanlagegebäude' infolge von (hochenergetischem) Komponentenversagen nach dem Eindringen von Wasser als Folge des unterstellten Hochwassers ausgewählt.

2.5.4.2 Folgeausfall der D1-Notstromtransformatoren im Schaltanlagegebäude

Angenommenes Szenario und Auswirkungen

Im Schaltanlagegebäude befinden sich laut Systembeschreibung der Notstromerzeugeranlage 1, u. a. auf der Ebene -0,57 m unterhalb der Nullmeterkote, sicherheitstechnisch wichtige Komponenten. Beispielsweise wird hier die elektrische Energie der Notstromerzeugeranlage 1 an die Niederspannungstransformatoren aller vier Schienen BMT10/ ... /40 geleitet. Die Niederspannungstransformatoren sind an der Längsseite des Schaltanlagegebäudes auf der Ebene 0,20 m über der Nullmeterkote aufgestellt. Sie sind nach außen über Drahtgitter abgeschlossen. Weiterhin können Komponenten der Niederspannungsverteilung BFT10/ ... /40 sowie BHT10 und BHT40 betroffen sein.

Die Systeme sind vor anlageninternen Überflutungen, vor allem durch das Feuerlöschsystem, geschützt /ROE 17a/, S. 141f. Dementsprechend sind *„elektronische Bauteile in ausreichender Höhe angeordnet“* und *„geringe Wassereinträge in Elektrotechnikräume sind redundanzübergreifend zulässig, die zugehörigen Türen schließen nicht wasserdicht“*. Zudem erschweren *„an gefährdeten Raumbereichen [...] Schwellen den Wassereintrag“* und *„im Gebäude freigesetzte Wassermengen werden in der Regel durch Bodenabläufe, über Treppenhäuser oder durch Rohr- und Kabelkanäle aus den gefährdeten Bereichen abgeführt“*.

Basierend auf der Betriebserfahrung wird hier ein unbemerkter Wassereintrag mit nachfolgendem Systemausfall betrachtet, zumal laut Betriebshandbuch geringe redundanzübergreifende Wassereinträge zulässig sind. Weiterhin ist durch die nicht wasserdicht schließenden Türen sowie aufgrund der Anordnung der Räume ein übergreifender Ausfall durch anlagenexterne Überflutung denkbar. Je nach Anzahl der betroffenen Schienen der Notstromverteilung D1 bei einem übergreifenden Ausfall können die 380 V- und 660 V-Verteilungen des D1-Notstromnetzes während des angenommenen Notstromfalls ausfallen. Entsprechend wird dann auf die Notstromerzeugeranlage D2 im Notspeisegebäude zurückgegriffen.

Erforderliche und mögliche Gegenmaßnahmen

Durch das postulierte, unbemerkte Eindringen von Wasser in das Schaltanlagegebäude, durch übergreifenden Ausfall auch in mehrere Räume gleichzeitig, kann der Aus-

fall der D1-Stromversorgung ausgelöst werden. Im Abschnitt 2.4.1.1 werden die verfügbaren Systeme der Referenzanlage bei Wasserständen bis 3,5 m beschrieben. Demnach wird die Stromversorgung über das D2-Notstromsystem im Notspeisegebäude sichergestellt. Abgesehen von der Kraftstoffversorgung bei langanhaltenden Ereignissen (wenn der gesamte Vorrat an Kraftstoff auf der Referenzanlage eingesetzt werden muss) sind die beiden Notstromsysteme komplett unabhängig. Die Kraftstoffversorgung der Notstromerzeugeranlage 2 wurde zusammen mit der Notstromerzeugeranlage 1 im Abschnitt 2.4.1.3 betrachtet und ergänzende Notfallmaßnahmen zu deren langfristigen Sicherstellung im Abschnitt 2.5.3 beschrieben. Insofern wird hier nicht weiter darauf eingegangen.

Zusammenfassung

Es wurde der kausale Ausfall der D1-Notstromversorgung im angenommenen Hochwasserereignis betrachtet. Es wurde kein kausaler Ausfall der Notstromerzeugeranlage 2 durch das Hochwasserereignis angenommen, da das Gebäude während des Betriebes der Anlage regelmäßig begangen wird. Der kausale Ausfall der D1-Notstromversorgung kann somit über die D2-Notstromversorgung abgefangen werden.

Natürlich kann es auch parallel zum kausalen Ausfall der D1-Notstromversorgung zu zufälligen Ausfällen der Notstromerzeugeranlage 2 kommen. Die bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit ist aufgrund der Sicherungsmaßnahmen der D2-Notstromversorgung im Vergleich zum im vorliegenden Bericht betrachteten übergreifenden Ausfall beider Notstromversorgungen durch den Ausfall der Kraftstoffversorgung deutlich geringer. Deshalb wird im Folgenden nicht weiter auf den zufälligen Ausfall der D2-Notstromversorgung eingegangen.

2.5.5 Diskussion von Annahmen

Während der Beschreibung des angenommenen Hochwasserereignisses wurden zahlreiche Annahmen und Postulate für die Referenzanlage getroffen, die als konservativ zu betrachten sind und in deren Folge sehr seltene Ereigniskombinationen resultieren. Teilweise entsprechen diese Postulate nicht dem aktuellen Nachweisstand der Referenzanlage. Diese können einen erheblichen Einfluss auf das quantitative Ergebnis weiterer Untersuchungen haben, weshalb nachfolgend auf einige dieser Annahmen eingegangen wird. Die Diskussion bezieht sich hauptsächlich auf die wesentlichen Bereiche der ge-

samen Untersuchung: die Dauer des angenommenen Ereignisses, die Beschreibung des Ereignisverlaufes sowie die ergänzenden Notfallmaßnahmen.

Dabei sollen insbesondere solche Annahmen herausgestellt werden, die auf einer geringen Wissensbasis („strength of knowledge“) aufbauen, also einen großen unbekannten Unsicherheitsfaktor beinhalten /BER 16/. Solche „schwache“ Annahmen sind durch mindestens eine der vier Eigenschaften gekennzeichnet /BER 16/:

- Die Annahmen hängen mit starken Vereinfachungen zusammen,
- Daten sind nicht verfügbar und unzuverlässig,
- Experten sind sich hinsichtlich der Annahmen uneinig, oder
- die einer Annahme zugrunde liegenden Phänomene sind unbekannt oder schlecht verstanden, Modelle sind nicht verfügbar oder ergeben (vermutlich) schlechte Vorhersagen.

Trifft keine dieser vier Eigenschaften auf eine Annahme zu, ist diese entweder „moderat“ oder „stark“. Starke Annahmen sind durch folgende Eigenschaften gekennzeichnet:

- Die Annahme wird als nachvollziehbar angesehen,
- viele zuverlässige Daten sind verfügbar,
- es herrscht breite Übereinstimmung unter Experten, oder
- die unterliegenden Phänomene sind gut verstanden und die verwendeten Modelle ergeben bekanntermaßen gute Ergebnisse mit der nötigen Genauigkeit.

Eine Zusammenstellung der verwendeten Annahmen und deren Einstufung anhand der verwendeten Wissensbasis gibt Tab. 2.23 wieder.

Tab. 2.23 Einstufung unterschiedlicher gemachter Annahmen anhand ihrer zugrundeliegenden Wissensbasis /BER 16/

Annahme	Wissensbasis
Übertragung der beobachteten Hochwasserdauern auf die modellierte Überflutungsdauer wie in Abb. 2.8 skizziert	schwach, da starke Vereinfachung (z. B. keine Berücksichtigung der Umgebung) und unterliegenden Phänomene nicht bekannt sind

Annahme	Wissensbasis
Eintritt des Notstromfalls zum relativen Zeitpunkt t_{NSF}	schwach, da starke Vereinfachung durch Gleichverteilung mit unbegründeter Unter- und Obergrenze; unbekannte Ausfallursache
Reparaturdauer ΔT_{RESV} der externen Stromversorgung	schwach, da keine Daten verfügbar und Wiederherstellungsmaßnahmen unbekannt
Frühe Einleitung ergänzender Notfallmaßnahmen durch den Notfallstab zum Zeitpunkt t_{Nfm}	schwach, da keine Daten verfügbar und viele Randbedingungen unsicher (individuelle Entscheidungsfindung, Gruppenverhalten etc.)
benötigte Vorlaufzeit für die Einrichtung der Luftbrücke ΔT_{LB} und des Fährbetriebs ΔT_{FB}	schwach, da keine Daten verfügbar
Anzahl der verfügbaren CH-53 (Luftbrücke) und Amphibien M3 (Fährbetrieb) am Bundeswehrstandort (Ausfallanalyse der ergänzenden Notfallmaßnahmen)	moderat, da maximale Anzahl der CH-53 und M3 bekannt, Experten einig und bekannte Randbedingungen (z. B. nicht am Standort durch anderen Einsatz, etc.)
gesamte Ausfallwahrscheinlichkeit $p_{Ausfall}$ der ergänzenden Notfallmaßnahmen in Tab. 2.21	schwach, da starke Vereinfachung in Bezug auf die Berücksichtigung von vier Ausfallmöglichkeiten (z. B. Vernachlässigung anderer Ausfallmöglichkeiten); Ausfallanalyse basiert auf mehreren (moderaten) Annahmen

Um den Einfluss der Annahmen auf die Ergebnisse einer PSA zu untersuchen, müssen im PSA-Modell weitere Analysen durchgeführt werden. Zunächst sollte der Einfluss der Annahmen auf Schlussfolgerungen aus den PSA-Ergebnissen (z. B. in Bezug auf die bedingten Kernschadenswahrscheinlichkeit im angenommenen Hochwasserereignis oder auf die gesamte Kernschadenshäufigkeit) in einer Sensitivitätsanalyse untersucht werden. Dazu werden die Annahmen so lange (qualitativ) verändert, bis sich die Schlussfolgerungen ändern. Dabei sollten nicht nur einzelne Annahmen, sondern auch Annahmen untereinander variiert werden. Ziel der Untersuchungen ist, die Ergebnisse gegen den Einfluss von unbekannten Unsicherheitsfaktoren hinter den Annahmen durch eventuelle Anpassungen der Annahmen abzusichern.

2.5.6 Schlussfolgerungen

In diesem Bericht werden die ergänzende Notfallmaßnahmen 'Versorgung über Luftbrücke' und 'Versorgung über Fährbetrieb' in Zusammenhang mit einem langanhaltenden Hochwasser auf der Referenzanlage diskutiert, mit denen die Versorgung der Referenzanlage mit Personal und Kraftstoff sichergestellt werden soll. Die Grundgedanken hinter der Einführung der ergänzenden Notfallmaßnahmen sind am Anfang des Abschnitts 2.5.3 zusammengefasst. Neben den untersuchten ergänzenden Notfallmaßnahmen gibt es noch eine Vielzahl anderer denkbarer Möglichkeiten. Grundsätzlich sollten aber nur

solche Maßnahmen untersucht werden, die plausibel und einfach durchzuführen sind und eine gewisse Planungstiefe (z. B. Notfallplan) aufweisen. Die ergänzenden Notfallmaßnahmen sollten möglichst realitätsnah und trotzdem konservativ mit wenigen Annahmen modelliert und die Annahmen hinterfragt werden. In diesem Fall bietet die Berücksichtigung ergänzender Notfallmaßnahmen in Zusammenhang mit langanhaltenden Ereignissen in der Realität die Möglichkeit, entsprechende Handlungsmöglichkeiten bei Störfällen abzubilden. Daraus können dann Schlussfolgerungen auf mögliche Verbesserungen der anlageninternen Vorsorge bzw. Vorgehensweise gezogen werden.

Die Berücksichtigung von Notfallmaßnahmen bei der probabilistischen Untersuchung langanhaltender Ereignisse wird auch international als erforderlich angesehen (z. B. /GEO 14/). Die hier vorgestellten ergänzenden Notfallmaßnahmen zur Sicherstellung der Treibstoffversorgung sowie der Personalversorgung stellen hierzu eine Möglichkeit dar. Aufgrund des generischen Charakters der ergänzenden Notfallmaßnahmen können diese auf andere Anlagen übertragen werden.

2.6 Erdbeben mit langandauernden Folgen

2.6.1 Erdbebenereignisse am Standort der Referenzanlage und weltweit

Deutschland befindet sich in einer geographischen Lage mit geringer seismischer Aktivität. Abb. 2.10 zeigt eine Erdbebengefährdungskarte für den deutschsprachigen Raum für eine Wiederkehrperiode von 475 Jahren. Die Regionen, die am stärksten von seismischen Aktivitäten betroffen sind, sind die westliche Grenze um den Raum Aachen und der südliche Teil Deutschlands, speziell die Schwäbische Alb einschließlich dem Alpengebirge. Die Referenzanlage befindet sich laut DIN EN 1998-1, /DIN 11/ in der Erdbebenzone 0, bzw. keiner Erdbebenzone, was einer Erdbebenintensität nach EMS am Standort von $VI < I_{AS} < VI\frac{1}{2}$ entspricht.

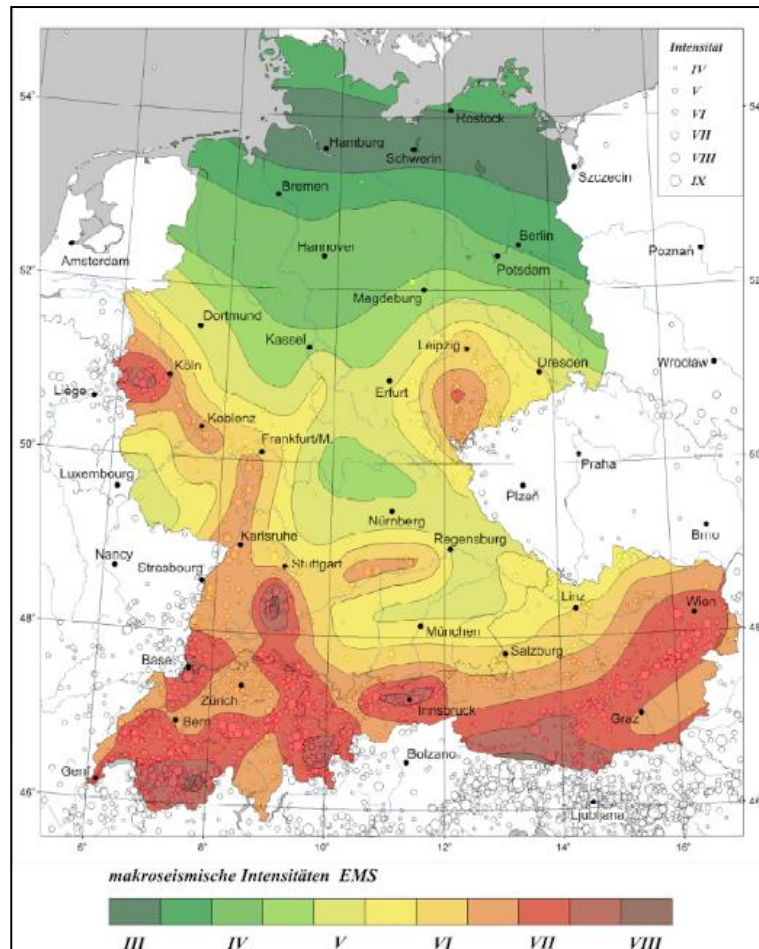


Abb. 2.10 Erdbebengefährdungskarte /GRU 96/

Abb. 2.11 zeigt einen Ausschnitt aller erfassten Erdbebenereignisse seit 1994 mit einer markierten Auswahl an Ereignissen in einem Radius von ca. 130 km um die Referenzanlage.

Begleitend dazu gibt Tab. 2.24 eine Auflistung der zehn stärksten Erdbeben in der Region des Standorts der Referenzanlage mit der jeweiligen Entfernung vom Epizentrum zum Standort der Referenzanlage. Aus Tab. 2.24 ist leicht ersichtlich, dass das stärkste Erdbeben bis heute zwar laut Konvention als stark einzustufen ist, aber zu keinen oder nur leichten Gebäudeschäden geführt hat.

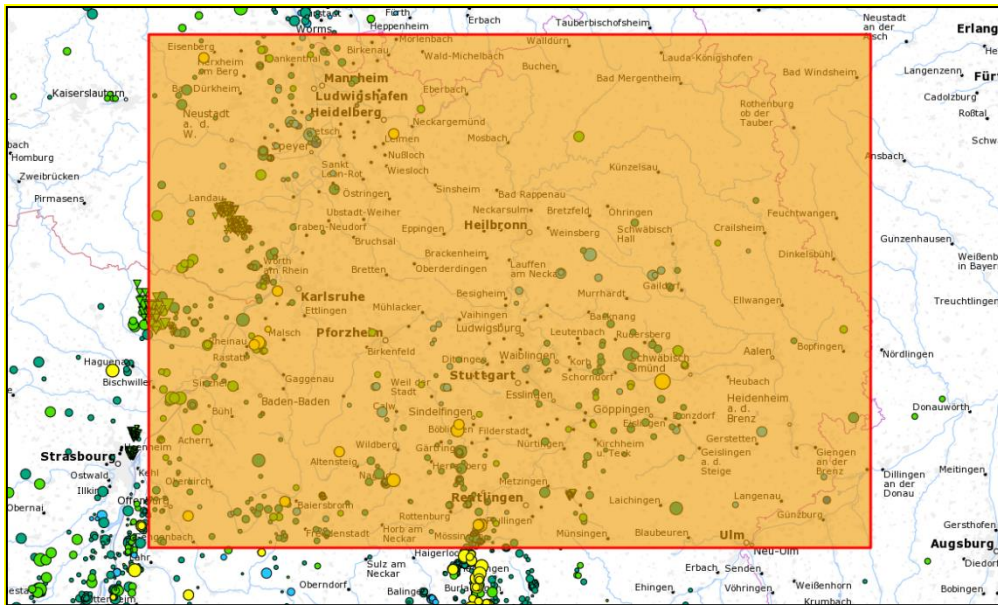


Abb. 2.11 Geographischer Ausschnitt der Erdbebenereignisse seit 1994 in der Nähe (ca. 130 km) des Standorts der Referenzanlage /LGR 20/

Tab. 2.24 Die zehn stärksten Erdbeben nahe dem Standort der Referenzanlage /LGR 20/, /KWU 81/ und /WIK 20/ (*Intensität wurde nach Tab. 2.5 abgeschätzt)

Jahr	Entfernung zum Standort der Referenzanlage	Magnitude (am Hypozentrum)	Geschätzte Intensität* am Epizentrum
1911	93,2 km	6,1	8
1723	50,0 km	–	6 – 7
1787	41,5 km	4,4	5
1839	17,4 km	4,4	5
1940	40,7 km	3,8	4
1906	72,2 km	3,7	4
1997	47,8 km	3,7	4
1885	72,2 km	3,3	3
1940	32,8 km	3,2	3
2004	45,3 km	3,1	3

Eine graphische Darstellung der ausgewerteten Erdbebenereignisse findet sich in Abb. 2.12. Zusätzlich aufgetragen sind das Bemessungserdbeben mit der entsprechenden Magnitude ($\sim 6,0$) für eine Intensität von VIII sowie die Magnitude ($\sim 7,0$) für eine Intensität von IX.

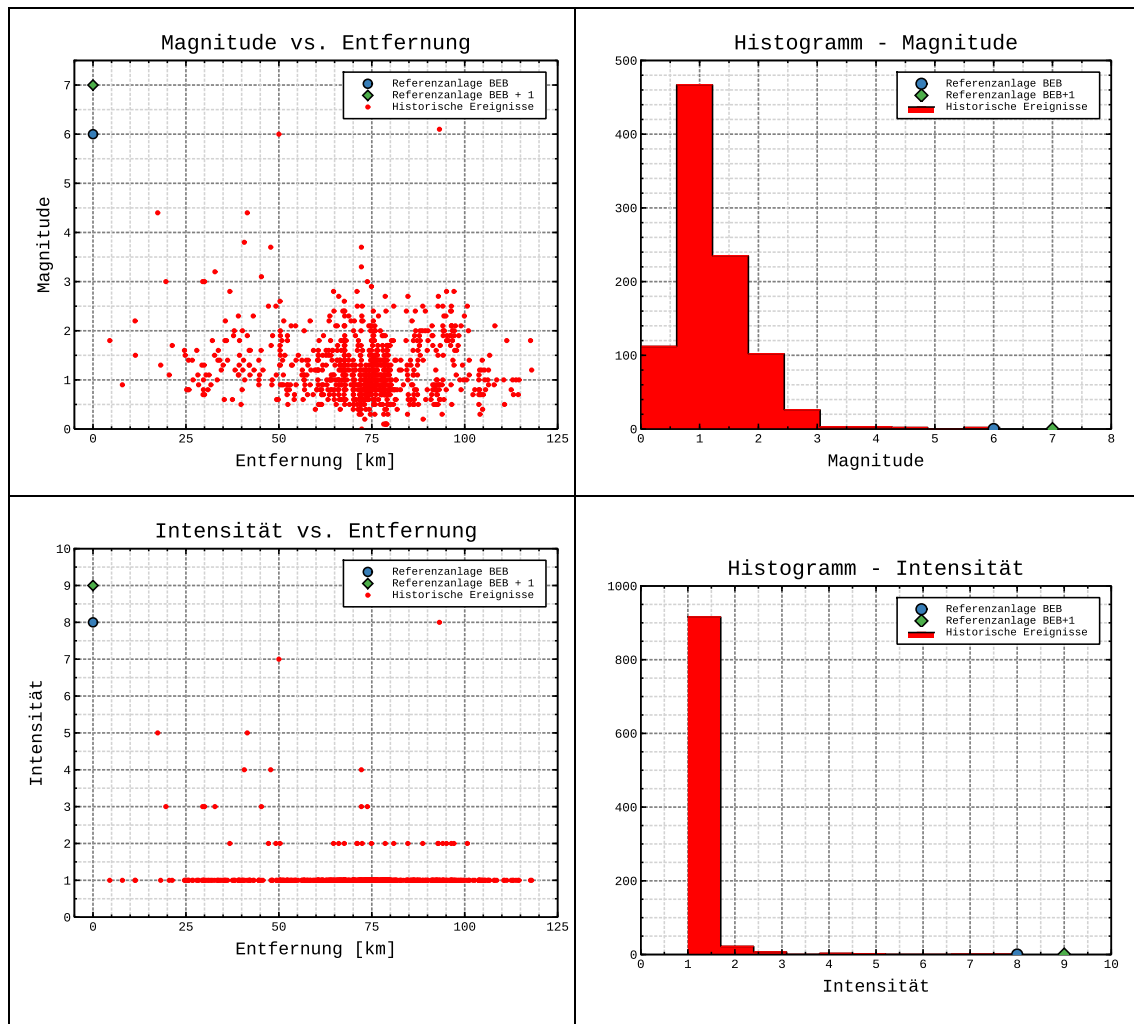


Abb. 2.12 Graphische Auswertung der Erdbebenereignisse in der Region des Standorts der Referenzanlage /LGR 20/

Innerhalb des untersuchten Raumes hat es historisch ein Erdbeben gegeben, welches dem der Anlagenauslegung zugrunde gelegten Bemessungserdbeben in Bezug auf die Erdbebenintensität entspricht. Allerdings war das Hypozentrum ca. 93 km vom Standort der Referenzanlage entfernt. Nach Kenntnis der Autoren hat es landesweit in der deutschen Geschichte seit dem Jahr 800 nur zwei Erdbeben mit einer Magnitude ≥ 6 gegeben.

Aus geologischer Sicht sind laut messtechnischen Untersuchungen und Baugrundgutachten die Bedingungen am Standort der Referenzanlage einheitlich als „Fels“ zu beschreiben mit einem einheitlichen Übertragungsverhalten ohne besondere Verstärkungseffekte /KKW 11b/.

Eine historische Betrachtung der Erdbebenereignisse in Zusammenhang mit (kommerziellen) kerntechnischen Anlagen zeigt, dass die vorhandenen Schutzmaßnahmen und Systeme, die Anlagen gegen solche Ereignisse (ohne Berücksichtigung von Folgeauswirkungen / Ereigniskombinationen) vorhalten, effektiv und erfolgreich sind. In Tab. 2.25 sind die zwei stärksten historischen Ereignisse mit den wichtigsten Eigenschaften beschrieben. Beide haben in Japan stattgefunden, einer Region mit sehr großen seismischen Aktivitäten, und bei beiden wurden die erforderlichen Systeme angefordert, um die Reaktoren abzuschalten.

Tab. 2.25 Erfahrungsberichte weltweit – grundlegende Informationen

Kashiwazaki-Kariwa 16. Juli 2007 /TEP 08/		Fukushima Daiichi 11. März 2011 /GRS 16/
Anlageninformation		
7 SWR im kommerziellen Betrieb – 8 GW _e Zum Zeitpunkt des Erdbebens: - 3 Blöcke im Leistungsbetrieb - 1 Block im Anfahrprozess - 3 Blöcke waren abgeschaltet oder in Wartung		6 SWR im kommerziellen Betrieb – 4,7 GW _e Zum Zeitpunkt des Erdbebens: - 3 Blöcke im Leistungsbetrieb - 3 Blöcke in Revision
Ereignischarakteristika		
Stärke	M _w = 6,6; M _j = 6,8	M _w = 9,0 (mit Vor- und Nachbeben M _w ≤ 7,2)
Intensität, I _{EMS} (AS)	VIII – IX	IX – X
Herdtiefe	ca. 12 km	ca. 25 km
Epizentralentfernung	16 km	ca. 128 km
Hypozentralentfernung	23 km	ca. 130 km
Maximale Freifeld-beschleunigung (AS)	680 cm/s ²	550 cm/s ²
Faktor – Überschreitung der Auslegungswerte (AS)	≤ 3,6 x Auslegung	≤ 1,3 x Auslegung
Besonderheit (AS)	Verstärkung der Erdbeben-einwirkung durch lokale Topographie und Geologie	Überflutung des Anlagen-geländes bis zu 6 m (Tsunami)

Nach dem Erdbebenereignis in Kashiwazaki-Kariwa im Jahr 2007 wurden alle Reaktorblöcke am Standort in einen sicheren Zustand überführt. Zu keinem Zeitpunkt bestand eine Gefährdung der Sicherheit der Anlage.

Im Jahr 2011 war das bekannteste Ereignis, bei welchem die Sicherheit von Kernkraftwerksblöcken infolge einer naturbedingten Einwirkung von außen beeinträchtigt war, die Reaktorunfälle von Fukushima Daiichi. Ein Erdbeben mit einer Magnitude von 9 trat etwa 130 km vor der japanischen Ostküste auf. Dieses Erdbeben hatte eine Erdbebenintensität am Standort der Anlage von $I = IX - X$ auf der EMS-Skala zur Folge. Die Instrumentierung, um Bodenbeschleunigungen zu erkennen, hatte angesprochen und löste eine RESA in den drei im Leistungsbetrieb befindlichen Reaktorblöcken aus. Hätte es sich bei dem Erdbeben um eine singuläre Einwirkung gehandelt, hätte es mit hoher Wahrscheinlichkeit, vergleichbar dem Erdbebenereignis am Standort Kashiwazaki-Kariwa im Jahr 2007, keine sicherheitstechnischen Komplikationen in den Reaktorblöcken am Standort Fukushima Daiichi gegeben. Aufgrund der geographischen Lage der Anlage überflutete der auf das Erdbeben als kausales Folgeereignis aufgetretene Tsunami das Anlagengelände mit einer Flutwelle von bis zu 6 m. Diese Ereigniskombination von zwei naturbedingten Einwirkungen war auslegungsüberschreitend und führte zu erheblichen Schäden in den verschiedenen Anlagenblöcken, teils mit weiteren Folgeeinwirkungen, wie anlageninternen Wasserstoffexplosionen und Bränden. Es kam zum Kernschaden in den drei im Leistungsbetrieb befindlichen Blöcken. Während der Schaden in Block 2 lokal beschränkt war, wurden bei Block 3 und Block 1 eine starke, respektive, vollständige Kernzerstörung festgestellt. Darüber hinaus gab es große Einschränkungen der Sicherheitssysteme und möglicher Handmaßnahmen.

Tab. 2.26 gibt eine Zusammenfassung der Auswirkungen für die beiden vorgenannten Ereignisse.

Tab. 2.26 Erfahrungsberichte weltweit – Auswirkungen

Kashiwazaki-Kariwa 16. Juli 2007 /TEP 08/	Fukushima Daiichi 11. März 2011 /GRS 16/
Auswirkungen auf sicherheitstechnische Einrichtungen und auf Gebäude	
Zugangstür zu einem Notfallraum war verklemmt	Station Blackout - Verlust der externen Stromversorgung nach Erdbeben - Verlust des AC-Notstroms – Wasserschäden an Dieselgeneratoren - Verlust des DC-Notstroms – Wasserschäden an Batterien - Verlust der Schaltanlagen – Wasserschäden

Kashiwazaki-Kariwa 16. Juli 2007 /TEP 08/	Fukushima Daiichi 11. März 2011 /GRS 16/
Keine Möglichkeit zur kurzfristigen Kommunikation, Benachrichtigung der lokalen Gemeinden zum Status der Anlage - Werkfeuerwehr nachts und an Feiertagen nicht vor Ort - Verzögerte Alarmierung der externen Feuerwehr wegen besetzter Telefonleitungen	Verlust der Reaktor- und Brennelement-Lagerbeckenkühlung
Versagen der Verankerungen mehrerer Komponenten	Extreme Stresssituation für Schichtmannschaft und Arbeiter (falsche Erfassung der Situation)
Absturz zweier Arbeitsbühnen in Brennelement-Lagerbecken	Keine Beleuchtung in den Gebäuden
Schienen des Portalkrans wurden stark beschädigt	(Tsunami) Wasser und Trümmer in den Gebäuden
Wasser schwappte aus Brennelement-Lagerbecken - In Block 6 Verschleppung kontaminierten Wassers in nicht kontrollierte Bereiche - Personal wurde kontaminiert	
Umstürzen mehrerer hundert Fässer mit kontaminierten Abfällen in einem Lagerbereich	
Auswirkungen auf dem Anlagengelände	
Versagen erdverlegter Feuerlöschleitungen aufgrund differentieller Setzungen • Eindringen von Wasser in ein Betriebsgebäude (ca. 2.000 m³) • Eingeschränkte Löschwasserversorgung	Zerstörung der Meerwasserpumpen des Nebenkühlwassers
Brand an einem Eigenbedarfstransformator (Öl-Austritt und Kurzschluss durch Setzungen) – ca. 2 Stunden, keine sicherheitstechnische Funktion	Trümmer und Schlamm durch Tsunami auf dem Anlagengelände
Straßen wurden stark beschädigt, Straßenunterbau war zu schwach	Erhebliche Freisetzung von Radioaktivität (in Atmosphäre, Boden und Wasser) u. a. aufgrund der Druckentlastung des Primärcontainments (vor allem aus Block 2), was zur Evakuierung von mehr als 100.000 Personen führte
Sehr geringe Freisetzung von außerhalb des Sicherheitsbehälters, keine Auswirkungen auf die öffentliche Gesundheit	
Hauptschäden sind an nicht gegen Erdbeben ausgelegten SSC ohne sicherheitstechnische Funktionen aufgetreten	

Erfahrungen aus kerntechnischen Anlagen zeigen, dass diese wegen der hohen Konservativität in der Auslegung und kontinuierlichen Sicherheitsoptimierung über Auslegungsreserven verfügen. *„Bewertet man die Schäden oder Nichtschäden vor dem Hintergrund der tatsächlich aufgetretenen und von seismischen Instrumentierungen aufgezeichneten Bodenbewegungen, so ist die einhellige Erkenntnis, dass das Scha-*

densbild weitaus günstiger ist als rechnerisch vorhergesagt würde. Die Anlagen und damit die Anlagenteile überstehen offenbar erheblich stärkere Erdbeben als der expliziten Auslegung zugrunde liegen. Dadurch wird unterstrichen, dass regelkonform ausgelegte Anlagen und Anlagenteile erhebliche inhärente Reserven besitzen. Diese Erkenntnis ist grundsätzlich auch durch alle bekannt gewordenen Versuche bestätigt worden und findet sich implizit in der Beschreibung der Schadensmerkmale makroseismischer Intensitätsskalen. Eine große Anzahl der weltweit in Betrieb befindlichen Kernkraftwerke steht in seismisch aktiven Regionen. Trotz dieser Tatsache wurden in der Vergangenheit keine signifikanten Schäden oder Verformungen infolge seismischer Einwirkungen an sicherheitstechnisch relevanten Bauwerksstrukturen, Anlagensystemen und Komponenten bei diesen Anlagen festgestellt. Besonders bemerkenswert ist das Niigata Chuetsu-Oki Erdbeben, weil dies in unmittelbarer Nähe zum Kernkraftwerksstandort Kashiwazaki-Kariwa auftrat und die dort gemessenen Bodenbeschleunigungen deutlich über denen des Auslegungserdbebens für die Anlage lagen“ /KKW 11c/.

2.6.2 Angenommenes Erdbebenereignis und Ereignisablauf

Die Referenzanlage ist für eine Erdbebenintensität von $I = VIII$ ausgelegt. Das bedeutet, dass alle Erdbebenereignisse mit einer geringeren oder gleichen Intensität hinsichtlich der vorliegenden Analyse zu keinen relevanten Auswirkungen führen würden. Für eine Analyse zu einem Ereignis mit potenziell langandauernden Auswirkungen ist es daher sinnvoll und zielführend, ein auslegungsüberschreitendes Ereignis zu postulieren. Aus diesem Grund wird am Standort der Referenzanlage ein Erdbeben der Intensität $I = IX$ unterstellt. Nach Tab. 2.5 bedeutet dies eine maximale Bodenbeschleunigung von ungefähr 500 cm/s^2 sowie eine Eintrittshäufigkeit für ein solches Ereignis von $< E-07$ pro Jahr /KKW 11b/. Effekte, die auf Vorbeben zurückzuführen sind, werden in dieser Analyse nicht betrachtet, da die wesentlichen Auswirkungen durch das Hauptbeben verursacht werden und die Wahrscheinlichkeiten für Vorbeben mit einer hohen Intensität vernachlässigbar sind. Die Starkbebendauer, die Dauer der größten Bodenbeschleunigung, wird mit 8 s eingeschätzt. Dies entspricht den seismischen Analyseergebnissen für den Standort /KKW 11b/.

Das Erdbebenereignis wird als beendet betrachtet, sobald sich die Anlage entweder in einem sicheren Zustand befindet oder ein Kernschaden eingetreten ist.

Eine detaillierte Modellierung des Erdbebenereignisses analog zum Hochwasserereignis (siehe Abschnitt 2.5.1) wird nicht durchgeführt. Bei einem Erdbeben handelt es sich um ein Ereignis von kurzer Dauer (im Sekundenbereich), welches sich allein über die angenommene Intensität (bzw. geeignete Kenngrößen der Bodenbewegung) gut charakterisieren lässt.

Die Betrachtung des Ereignisses beginnt mit dem Hauptbeben mit einer Intensität $I = IX$. Der Fokus der Analyse liegt auf der Zeit nach dem Ende des Hauptbebens und den dadurch verursachten Auswirkungen. Alle Maßnahmen und Handlungen in dieser Zeit haben die Einhaltung der Schutzziele (Unterkritikalität, erfolgreiche Abfuhr der Nachzerfallswärme und die Verhinderung radioaktiver Freisetzungen) zum Ziel. Die Betrachtung endet entweder mit dem Erreichen eines sicheren Zustandes der Anlage oder mit dem Eintritt eines Kernschadens.

Es wird davon ausgegangen, dass beim Störfalleintritt aufgrund der Bodenbeschleunigung die Erdbebensensoren ansprechen und eine Klasse 2-Meldung (nach KTA 3501 /KTA 15b/ eine Meldung, die das Betriebspersonal auf eine Störung im Betriebssystem hinweist) auf dem Systemleitstand in der Warte verursachen.

Es wird unterstellt, dass bei dem Ereignis die Transformatorstation sowie das Maschinenhaus sehr stark beschädigt werden und die Eigenbedarfsversorgung sowie die externe Netzanbindung ausfallen (Netzanbindungen über Freilufttrassen stehen nicht zur Verfügung). *„Dadurch wird der Notstromfall verursacht, für den – auch in Überlagerung mit dem Bemessungserdbeben – die Anlage ausgelegt ist (für das Bemessungserdbeben wird der Notstromfall unterstellt, da Erdbebenereignisse ohne Auswirkungen auf die Eigenbedarfsversorgung insgesamt zu so geringen Auswirkungen führen, dass ihre Betrachtung als Störfall nicht erforderlich ist). Die Stromversorgung der Notstromsysteme erfolgt bei Bemessungserdbeben und einem gleichzeitig unterstellten Ausfall aller externe Netzanschlüsse sowie dem Ausfall der Versorgung über den Generator auslegungsgemäß über die NSD-Aggregate des viersträngigen Notstromnetzes“* /KKW 11b/. Mit Eintritt des Notstromfalls sinken die Drehzahlen der Hauptkühlmittelpumpen beim Auslaufen kontinuierlich ab, und es wird infolgedessen Reaktorschnellabschaltung (RESA) ausgelöst.

Des Weiteren wird unterstellt, dass es zu einem Abriss bzw. Bruch von Frischdampf- und Speisewasserleitungen zwischen Reaktorgebäude und Maschinenhaus kommt. Somit erhält man zusätzlich zum Ausfall der Hauptwärmesenke und der Hauptspeisewas-

erversorgung das Signal 'DAF > max.' und die entsprechenden Maßnahmen des Reaktorschutzes (u. a. Sekundärkreisabschluss), und als Folge ein Teilabfahren auf 74 bar. Die Anlage wird nach den für einen derartigen Notstromfall vorgesehenen Maßnahmen gemäß Betriebshandbuch abgefahren. Konkret bedeutet das eine Wärmeabfuhr über die Frischdampfabblassstation(en) in die Atmosphäre, eine Bespeisung der Dampferzeuger durch die Notspeisepumpen und eine Energieversorgung über die D1-Notstromdiesel.

Nicht gegen Erdbeben ausgelegte Gebäude sowie die Infrastruktur außerhalb des Anlagengeländes werden als sehr stark beschädigt, bzw. als nicht mehr vorhanden angenommen. Wie im Fall des Erdbebenereignisses von Kashiwazaki-Kariwa im Jahr 2007 /TEP 08/ kann es sein, dass es zu Setzungen im Straßenunterbau und folglich zu Schäden an Wasser- oder Stromleitungen kommt. Zudem werden Trümmer auf dem Anlagengelände liegen, welche den Zugang zu verschiedenen Gebäuden erschweren. Nachbeben von geringerer, aber nicht vernachlässigbarer Intensität führen ggf. zu weiteren Schäden innerhalb und außerhalb des Anlagengeländes.

2.6.3 Ereigniskombinationen mit dem angenommenen Erdbebenereignis

Bei der Einwirkung Erdbeben kann es zu einem oder mehreren Folgeereignissen kommen. Dabei kann es sich sowohl um Einwirkungen von außen wie von innen, aber auch um anlageninterne Ereignisse handeln, Beispiele von Einwirkungen von außen sind Nachbeben, Bodenverflüssigung, Hangrutschungen, ein Absinken/Ansteigen des Wasserstandes im Vorfluter durch Verblockung oder auch Blockaden des Kühlwassereinlaufes durch Trümmerlasten. Beispiele für Einwirkungen von innen sind insbesondere Folgebrände oder -explosionen, anlageninterne Überflutungen durch erdbebenbedingte Leitungsabrisse oder -brüche, (hochenergetisches Behälterversagen), ein Absturz schwerer Lasten oder auch eine Freisetzung von Gefahrstoffen. Lecks und Abschaltversagen, Versagen von Brandschutzmaßnahmen, aber auch ein Station Blackout (SBO) sind möglicherweise in der Folge zu unterstellen.

In der vorliegenden Analyse wurden drei mögliche Ereigniskombinationen für den Referenzstandort identifiziert und für weitere Analysen postuliert.

– Erdbeben und darauffolgendes Nachbeben:

Nach einem auslegungsüberschreitenden Erdbeben wird unterstellt, dass ein Nachbeben von geringer, aber nicht vernachlässigbarer Intensität (im Vergleich zum

Hauptbeben) auftritt. Dieses führt zu weiteren Schäden innerhalb und außerhalb des Anlagengeländes, was unter anderem den Zugang zur Anlage weiter erschwert.

– Erdbeben und anlageninterner Folgebrand:

Ein weiteres, unterstelltes Folgeereignis ist ein anlageninterner Brand. Entsprechend der Betriebserfahrung kerntechnischer Anlagen können in der Folge eines Erdbebens aus verschiedenen Ursachen einer oder mehrere anlageninterne Brände entstehen. Dabei können die Brandereignisse als ein direktes Folgeereignis des Erdbebens oder auch in einer Ereigniskette (aus z. B. einem Erdbeben mit darauffolgendem Tsunami, einer darauf resultierenden anlageninternen Explosion, die dann einen Brand zur Folge hat) oder auch korreliert mit einer anderen anlageninternen Einwirkung durch eine gemeinsame Ursache auftreten. Details zu solchen Ereigniskombinationen und der entsprechenden Betriebserfahrung kerntechnischer Anlagen finden sich in /NRC 01/, /MAY 20/ und /NEA 21a/.

Eine für deutsche Kernkraftwerke im KTA-Regelwerk /KTA 15/ und /KTA 11/ geforderte und in der Referenzanlage auch umgesetzte Auslegung gegen Erdbeben und Folgebrand durch entsprechende Brandschutzmaßnahmen kann das Risiko für einen Folgebrand mit unzulässigen Folgen für die Sicherheit der Anlage zwar reduzieren, aber bei einem erschwerten Zugang zu den Gebäuden kann es nicht komplett ausgeschlossen werden. *„Eine möglicherweise eingeschränkte Zugänglichkeit zu den mobilen Feuerlöschgeräten wird durch das auf der Anlage befindliche Personal unter Zuhilfenahme von Räumfahrzeugen wiederhergestellt“ /KKW 11b/.*

– Erdbeben und darauffolgende langandauernde anlageninterne Überflutung:

Eine weitere Ereigniskombination, die möglich und wahrscheinlich ist, ist die Kombination eines Erdbebens mit einer langandauernden, anlageninternen (durch einen oder mehrerer Leitungsbrüchen verursachten) Überflutung. Diese kann bei einem auslegungsüberschreitenden Erdbebenereignis z. B. die Wiederherstellung der externen Stromzufuhr sowie die Räumung des Anlagengeländes (erheblich) beeinträchtigen. Diese Handlungen wurden sicherheitstechnisch als wichtigste bewertet und haben dementsprechend die höchste Priorität bei der Störfallbeherrschung.

Als abdeckender Fall wird als Folgeereignis zu einem Erdbeben eine anlagenexterne Überflutung angenommen, da diese im Vergleich zu den anderen aufgeführten Folgeereignissen eine zu erwartende lange Dauer aufweist. Das zu erwartende Schadensbild und die möglichen Maßnahmen zur Beherrschung des Ereignisses sind sehr ähnlich

zum Ereignis Hochwasser, so dass die dort durchgeführten Analysen (siehe Abschnitt 2.5) grundsätzlich auch auf diesen Fall anwendbar sind.

2.6.4 Ergänzende Notfallmaßnahmen

Die Referenzanlage ist auf einen Störfall der Kategorie „EVA Erdbeben“ vorbereitet und gegen ein Erdbebenereignis mit einer Intensitätsstufe höher als die Mindestanforderung des Kerntechnischen Ausschusses (KTA) in KTA 2201.1 /KTA 11/ ausgelegt. Es wird davon ausgegangen, dass alle Notfalleinrichtungen, wie in Tab. 2.9 aufgeführt, zur Verfügung stehen. Nach Aussage des Betreibers der Referenzanlage ist *„auch nach internationaler Erfahrung ... aufgrund von erheblichen Auslegungsreserven nicht damit zu rechnen, dass es bei erheblichem Überschreiten des Bemessungserdbebens zu Ausfällen von diesen gegen das Bemessungserdbeben ausgelegten Notfalleinrichtungen kommt“* /KKW 11c/. Dennoch kann bei einem auslegungsüberschreitenden Ereignis nicht ausgeschlossen werden, dass wichtige, zur Einhaltung der Schutzziele relevante Systeme in ihrer Leistung eingeschränkt sind bzw. ausfallen. Dies ist umso mehr bei dem in dieser Analyse unterstellten Folgeereignis „anlageninterne Überflutung“ gegeben. In diesem Zusammenhang ist die Versorgung mit Treibstoff und Personal als wichtigste Maßnahmen hervorzuheben, deren Ausfall einen erheblichen Beitrag zur Häufigkeit von Schadenszuständen hat.

Der Ausgangszustand für mögliche ergänzende Notfallmaßnahmen ist ein erfolgreiches Abfahren der Anlage ohne Kern- oder Brennstabschäden. Die Nachwärme wird unmittelbar nach dem Erdbeben und kurzfristig danach über die vorhandenen Sicherheitssysteme abgeführt. Es ist jedoch erforderlich, die Nachwärmeabfuhr langfristig aufrechtzuerhalten und die externe Stromversorgung wiederherzustellen. Da die Wiederherstellung der externen Stromversorgung erst nach Rückgang des Hochwassers möglich ist, sind bei langandauernder Überschwemmung die im Abschnitt 2.5.3 beschriebenen ergänzenden Notfallmaßnahmen auch in diesem Fall erforderlich, um die Treibstoffversorgung für die Notstromdiesel zu gewährleisten und für einen kontinuierlichen Austausch des Schichtpersonals zu sorgen, welches vor Ort Handmaßnahmen unter anderem zur langfristigen Aufrechterhaltung der Nachwärmeabfuhr durchführen muss (z. B. zur Sicherstellung der Dampferzeugerbespeisung mittels Notspeisepumpen).

Die ergänzenden Notfallmaßnahmen, die in der Analyse zum Hochwasserereignis aufgelistet und beschrieben wurden (siehe Abschnitt 2.5.3), sind auch bei einem ausle-

gungsüberschreitenden Erdbebenereignis mit darauffolgender anlageninterner Überflutung anwendbar. Einen Bedarf an weiteren, alternativen Notfallmaßnahmen ist nicht gegeben. Dies gilt auch im Hinblick auf die Ausfallanalyse in Abschnitt 2.5.3.4, insbesondere für die Luftbrücke, bei welcher Hubschrauber ungeachtet möglicher Hindernisse zum Standort der Referenzanlage fliegen können. Für die Amphibien M3 des Fährbetriebs sind verlängerte Vorlaufzeiten denkbar. Deren Einfluss wird in einer Sensitivitätsanalyse in Abschnitt 3.1.2 diskutiert.

Da im Kontext eines auslegungsüberschreitenden Erdbebenereignisses keine weiteren methodischen Erkenntnisse für die Langzeitphase zu erwarten sind, wird auch auf eine detaillierte Modellierung des Erdbebens im PSA-Modell verzichtet. Die für die vorliegende Analyse betrachteten Notfallmaßnahmen werden durch die entsprechenden Berechnungen in dem PSA-Modell für die Hochwasseranalyse abgedeckt.

3 Erprobung einer probabilistischen Langzeitbewertung für Hochwasser in einer Referenzanlage

Für eine Referenzanlage an einem deutschen Kernkraftwerksstandort wurden beispielhaft probabilistische Untersuchungen zur Erprobung einer Erweiterung einer PSA der Stufe 1 auf langandauernde Ereignisse unter Einbezug ergänzender Notfallmaßnahmen durchgeführt. Hierfür wurde das in Abschnitt 2.5 beschriebene Ereignis „langandauern- des Hochwasser“ herangezogen.

Für die Referenzanlage liegen eine vollständige PSA der Stufen 1 und 2 für Anlagenbetriebszustände des Leistungs- und Nichtleistungsbetriebs für anlageninterne Ereignisse sowie der Stufe 1 für die Einwirkungen von innen „Brand“ und „Überflutung“, die naturbedingten Einwirkungen von außen „Erdbeben“ und „Hochwasser“ und für die zivilisatorischen Einwirkungen „Flugzeugsabsturz“, „Explosionsdruckwelle“ sowie grobe probabilistische Abschätzungen für weitere übergreifende Einwirkungen (wie extreme Wetterereignisse, biologische Einwirkungen, anlagenexterne Brände, Giftgaswolken, Schiffkollision mit dem Einlaufbauwerk) bei Leistungsbetrieb einschließlich des zugehörigen elektronischen PSA-Anlagenmodells (mit dem PSA-Code RiskSpectrum®) vor.

Die Erprobung der Erweiterung der PSA der Stufe 1 für langandauernde Ereignisse aufgrund übergreifender Einwirkungen erfolgte auf der Basis eines im Vorhaben RS1556 durchgeführten vollständigen Einwirkungsscreening /MAY 20/. Dabei wurde in einem ersten Schritt das quantitative Einwirkungsscreening nur auf langandauernde Ereignisse bezogen. In einem weiteren Schritt wurden dann methodische Weiterentwicklungen für die Detailanalysen, insbesondere für die Einbindung ergänzender Notfallmaßnahmen sowie erhöhte GVA-Wahrscheinlichkeiten durch den Langzeitbetrieb, durchgeführt.

In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass die methodischen Erweiterungen der PSA für die Referenzanlage grundsätzlich für alle Anlagenbetriebszustände erfolgten.

3.1 Probabilistische Modellierung der Kraftstoff- und Personalversorgung mit ergänzenden Notfallmaßnahmen sowie der Wiederherstellung der externen Stromversorgung

3.1.1 Modellbeschreibung

Bei dem in Abschnitt 2.5 charakterisierten und für die Analysen angenommenen langandauernden Hochwasser müssen sowohl die Kraftstoff- als auch die Personalversorgung über die gesamte Überflutungsdauer sichergestellt werden. Die erfolgreiche Versorgung hängt dabei von einer Vielzahl an Faktoren ab, wie sie in der phänomenologischen Untersuchung beschrieben wurden. In Tab. 3.1 sind diese Faktoren mit den verwendeten probabilistischen Modellen zusammengefasst. Die verwendeten probabilistischen Standardmodelle für die relevanten Parameter sind entweder eine Gleichverteilung U zwischen Minimum und Maximum, eine Binomialverteilung B aus Anzahl und Wahrscheinlichkeit oder eine Dreiecksverteilung T mit Minimum, Modalwert und Maximum. Da diese Modelle standardmäßig in der PSA verwendet werden, sind diese nachfolgend als Standardmodelle bezeichnet.

Tab. 3.1 Zusammenfassung der Faktoren mit Einfluss auf die erfolgreiche Versorgung der Referenzanlage mit Kraftstoff und Personal

Faktor	Standardmodell
Überflutungsdauer	$\Delta T_{FD} \equiv p(\Omega) \geq 72 \text{ h}$ basierend auf empirischen Häufigkeitsverteilung in Abb. 2.7
Relativer Zeitpunkt des Notstromfalls und des Beginns des Dieserverbrauchs	$t_{NSF} = U(0,0;0,4)$ Annahme eines großen Wertebereiches einschließlich eines sehr frühen Notstromfalls
Betriebsdauer der Notstromerzeuger mit der zur Verfügung stehenden Kraftstoffreserve	$\Delta T_{KSR} = T(3;3;7) \text{ d}$ Dreiecksverteilung basierend auf Untersuchungen im Stresstest mit dem Modalwert beim Mindestvorrat gemäß Regelwerk in Abschnitt 2.4.1
Relativer Zeitpunkt für den Beginn der eingeschränkten Bewegungsmöglichkeit auf dem Anlagengelände	$t_{eB} = U(0,05;0,25)$ Berücksichtigung von Unsicherheiten im Verlauf der Überflutung
Schichtdauer	$\Delta T_{SD} = U(12;48) \text{ h}$ basierend auf Erfahrungen aus anderen Katastrophenlagen, dass Arbeiten auch länger fehlerfrei durchgeführt werden können, zumal auch ohne den Personalwechsel Ruhephasen möglich sind

Faktor	Standardmodell
Relativer Zeitpunkt, ab dem die Kraftstoffversorgung durch ergänzende Notfallmaßnahmen sichergestellt werden muss	$t_{KSV} = t_{NSF} + \Delta T_{KSR} / \Delta T_{FD}$
Relativer Zeitpunkt, ab dem ein regelmäßiger Personalwechsel durch ergänzende Notfallmaßnahmen erforderlich ist	$t_{PW} = t_{eB} + \Delta T_{SD} / \Delta T_{FD}$
Relativer Zeitpunkt für die Einleitung der ergänzenden Notfallmaßnahmen	$t_{NFM} = U(0,0;0,2)$ Annahme einer frühen Einleitung
Vorlaufzeit der Luftbrücke	$\Delta T_{LB} = U(12;36)$ h basierend auf realistischen Annahmen
Anzahl aller (auch nicht funktionsfähigen) CH-53 am Standort	$N_{CH53}^{gesamt} = U(5;20)$ Annahme aufgrund unsicherer Angaben
Ausfallwahrscheinlichkeit eines CH-53	$P_{CH53} = U\left(\frac{41}{190} - 0,05; \frac{41}{190} + 0,05\right)$ Annahme einer Unsicherheit von 0,1 in dem berechneten Wert in Abschnitt 2.5.3.4
Anzahl der einsatzbereiten CH-53 am Standort	$N_{CH53} = B(N_{CH53}^{gesamt}, P_{CH53})$
Anzahl der erforderlichen CH-53 für die eingeschränkte Versorgung über die Luftbrücke	$N_{CH53,red} = 1$ Herleitung in Abschnitt 2.5.3.4
Anzahl der erforderlichen CH-53 für die vollständige Versorgung über die Luftbrücke	$N_{CH53,min} = 3$ Herleitung in Abschnitt 2.5.3.4
Relativer Zeitpunkt, ab dem Luftbrücke einsatzbereit	$t_{LB} = t_{NFM} + \Delta T_{LB} / \Delta T_{FD}$
Vorlaufzeit des Fährbetriebs	$\Delta T_{FB} = U(19;48)$ h Zeitraumen basiert auf realistischen Annahmen.
Anzahl aller (auch nicht funktionsfähiger) Amphibien M3 am Standort	$N_{M3}^{gesamt} = U(5;10)$ Annahme aufgrund unsicherer Angaben
Ausfallwahrscheinlichkeit eines M3	$p_{M3} = U(0,25 - 0,05; 0,25 + 0,05)$ Annahme einer Unsicherheit von 0,1 in dem berechneten Wert in Abschnitt 2.5.3.4
Anzahl der einsatzbereiten M3 am Standort	$N_{M3} = B(N_{M3}^{gesamt}, p_{M3})$
Anzahl der erforderlichen M3 für die eingeschränkte Versorgung über den Fährbetrieb	$N_{M3,red} = 2$ Herleitung in Abschnitt 2.5.3.4
Anzahl der erforderlichen M3 für die vollständige Versorgung über den Fährbetrieb	$N_{M3,min} = 2$ Herleitung in Abschnitt 2.5.3.4
Relativer Zeitpunkt, ab dem Fährbetrieb einsatzbereit ist	$t_{FB} = t_{NFM} + \Delta T_{FB} / \Delta T_{FD}$

Faktor	Standardmodell
Relativer Zeitpunkt für den Beginn der Reparatur der externen Stromversorgung	$t_{RESV} = U(0,55;0,65)$ Berücksichtigung von Unsicherheiten im Verlauf der Überflutung
Reparaturdauer bis zur Wiederherstellung der externen Stromversorgung	$\Delta T_{RESV} = U(0;3) \text{ d}$ Annahme eines realistischen Bereiches incl. einer zu vernachlässigenden Reparaturdauer bei nur geringen Schäden
Relativer Zeitpunkt für die Wiederherstellung der externen Stromversorgung	$t_{ESV} = t_{RESV} + \Delta T_{RESV} / \Delta T_{FD}$
Relativer Zeitpunkt für uneingeschränkte Bewegung, nachdem Überflutung zurückgegangen ist	$t_{ub} = U(0,75;0,95)$ Berücksichtigung von Unsicherheiten im Verlauf der Überflutung

Die Standardmodelle dieser Faktoren basieren auf zahlreichen Annahmen, die in Abschnitt 2.5.5 diskutiert wurden. Um die Annahmen quantitativ zu hinterfragen, wurden die in Tab. 3.2 angegebenen Modelle verwendet.

Tab. 3.2 Angepasste Modelle der in Abschnitt 2.5.5 diskutierten Faktoren zur Untersuchung der zugrundeliegenden Annahmen.

Faktor	angepasstes Modell
Überflutungsdauer	$\Delta T_{FD} = U(\min(\Omega); \max(\Omega))$ Annahme einer Gleichverteilung zwischen Minimum und Maximum der empirischen Häufigkeitsverteilung in Abb. 2.7
Vorlaufzeit der Luftbrücke	$\Delta T_{LB} = U(6;72) \text{ h}$ Annahme eines weiten Wertebereiches (halbierter Minimalwert und verdoppelter Maximalwert der realistischen Annahmen)
Vorlaufzeit des Fährbetriebs	$\Delta T_{FB} = U(19;48) \text{ h}$ Annahme eines weiten Wertebereiches (halbierter Minimalwert und verdoppelter Maximalwert der realistischen Annahmen)
Relativer Zeitpunkt für die Einleitung ergänzender Notfallmaßnahmen	$t_{NFM} = U(0,0;0,4)$ Berücksichtigung einer sehr späten Einleitung zur Berücksichtigung der Komplexität in der Planung der Maßnahmen
Anzahl aller (auch nicht funktionsfähiger) Amphibie M3 am Standort	$N_{M3}^{gesamt} = U(0;30)$ Weiter Wertebereich limitiert durch sichere Angaben zur Anzahl aller M3
Anzahl aller (auch nicht funktionsfähig) CH-53 am Standort	$N_{CH53}^{gesamt} = U(0;60)$ Weiter Wertebereich limitiert durch sichere Angaben zur Anzahl aller CH-53
Reparaturdauer bis zur Wiederherstellung der	$\Delta T_{RESV} = U(0;5) \text{ d}$

Faktor	angepasstes Modell
externen Stromversorgung	Annahme eines großen Wertebereiches

Der Personalwechsel kann dauerhaft sichergestellt werden, wenn

- die Versorgung über die Luftbrücke bzw.
- über den Fährbetrieb oder
- die Kombination der eingeschränkten Versorgung (Mittel für die Kraftstoffversorgung) beider Versorgungswege oder
- der normale Versorgungsweg nach dem Rückgang der Überflutung

rechtzeitig wieder möglich ist. Die Ausfallwahrscheinlichkeiten hierfür sind in Tab. 3.3 angegeben.

Tab. 3.3 Ausfallwahrscheinlichkeit des Personalwechsels p_{PW} über die gesamte Ereignisdauer

Versorgungsweg	Ausfallwahrscheinlichkeit
Ausfallwahrscheinlichkeit der (eingeschränkten) Versorgung über Luftbrücke	$p_{PW, LB} = p(t_{PW} < t_{LB}) + p(N_{CH53} < N_{CH53, min})$ bzw. $p_{PW, LBlim} = p(t_{PW} < t_{LB}) + p(N_{CH53} < N_{CH53, red})$
Ausfallwahrscheinlichkeit der (eingeschränkten) Versorgung über Fährbetrieb	$p_{PW, FB} = p(t_{PW} < t_{FB}) + p(N_{M3} < N_{M3, min})$ bzw. $p_{PW, FBlim} = p(t_{PW} < t_{FB}) + p(N_{M3} < N_{M3, red})$
Ausfallwahrscheinlichkeit der kombinierten Versorgung über die eingeschränkte Luftbrücke und den eingeschränkten Fährbetrieb	$p_{PW, komb} = p_{PW, LBlim} + p_{PW, FBlim}$
Ausfallwahrscheinlichkeit der Versorgung über normale Versorgungswege nach dem Rückgang der Überflutung	$p_{PW, uB} = p(t_{PW} < t_{uB})$
Ausfallwahrscheinlichkeit des rechtzeitigen Personalwechsels	$p_{PW} = p_{PW, LB} \cdot p_{PW, FB} \cdot p_{PW, komb} \cdot p_{PW, uB}$

Die Kraftstoffversorgung kann dauerhaft sichergestellt werden, wenn

- die eingeschränkte Versorgung (ohne Personal) über die Luftbrücke oder
- über den Fährbetrieb sichergestellt werden kann, oder wenn

- der normale Versorgungsweg rechtzeitig wieder möglich ist.

Die jeweiligen Ausfallwahrscheinlichkeiten können mit den Gleichungen in Tab. 3.4 berechnet werden. Hier wird beim Ausfall der Luftbrücke bzw. des Fährbetriebs jeweils berücksichtigt, dass entweder zu wenige Mittel bzw. die Mittel zu spät einsatzbereit sind.

Tab. 3.4 Ausfallwahrscheinlichkeit der Kraftstoffversorgung p_{KSV} über die gesamte Ereignisdauer

Versorgungsweg	Ausfallwahrscheinlichkeit
Ausfall der rechtzeitigen eingeschränkten Versorgung über Luftbrücke	$p_{KSV, LBred} = p(t_{KSV} < t_{LB}) + p(N_{CH53} < N_{CH53,lim})$
Ausfall der rechtzeitigen eingeschränkten Versorgung über Fährbetrieb	$p_{KSV, FBred} = p(t_{KSV} < t_{FB}) + p(N_{M3} < N_{M3,lim})$
Ausfall der rechtzeitigen Versorgung über normale Versorgungswege nach dem Rückgang der Überflutung	$p_{KSV, uB} = p(t_{KSV} < t_{uB})$
Ausfall der Kraftstoffversorgung	$p_{KSV} = p_{KSV, LBlim} \cdot p_{KSV, FBlim} \cdot p_{KSV, uB}$

Weiterhin kann die externe Stromversorgung wiederhergestellt werden, nachdem die Überflutung zurückgegangen ist. In diesem Fall wird nicht von einem Ausfall der D1- bzw. D2-Notstromerzeugeranlagen durch Treibstoffmangel ausgegangen. Allerdings werden in dem PSA-Modell Komponentenausfälle im Notstromfall angenommen. Wird die externe Stromversorgung nicht rechtzeitig wiederhergestellt, ist man auf die ergänzenden Notfallmaßnahmen angewiesen. Die Wahrscheinlichkeit für den Ausfall der Wiederherstellung der externen Stromversorgung ist

$$p_{KSV,ESV} = p(t_{KSV} < t_{ESV}). \quad (3.1)$$

In diesem Zusammenhang wird zusätzlich betrachtet, dass die externe Stromversorgung sehr frühzeitig wiederhergestellt werden kann, sodass die Notstromerzeugeranlagen nicht länger als 10 h betrieben werden müssen. In diesen Fällen entfallen einige ansonsten notwendige Handmaßnahmen. Die Wahrscheinlichkeit für den Ausfall einer frühzeitigen Wiederherstellung der externen Stromversorgung ist

$$p_{KSV,fESV} = p((t_{ESV} - t_{NSV}) < 10 \text{ h}). \quad (3.2)$$

Mit diesen Modellen und Annahmen können somit die Ausfallwahrscheinlichkeiten der Kraftstoff- und Personalversorgung berechnet werden. Die Berechnung erfolgt in einer Monte-Carlo-Simulation mit 10^6 zufälligen Szenarien, die durch die oben beschriebenen Faktoren definiert sind.

3.1.2 Ergebnisauswertung und Diskussion

Aus den zufälligen Szenarien mit den Faktoren in Tab. 3.1 wurde die Ausfallwahrscheinlichkeiten

- der rechtzeitigen Personalversorgung über Fährbetrieb, Luftbrücke bzw. deren Kombination und den normalen Versorgungsweg nach der Überflutung,
- der rechtzeitigen Kraftstoffversorgung über Fährbetrieb, Luftbrücke bzw. dem normalen Versorgungsweg sowie
- der rechtzeitigen (frühzeitigen) Wiederherstellung des externen Stromnetzes nach der Überflutung

berechnet. Diese sind in Tab. 3.5 dargestellt. Die gesamte Ausfallwahrscheinlichkeit für die unterschiedlichen Ressourcen ergibt sich aus der UND-Verknüpfung in den einzelnen Szenarien. Da die Ausfallwahrscheinlichkeiten der unterschiedlichen Versorgungsmöglichkeiten über gemeinsame Faktoren korrelieren, ist das Produkt der Ausfallwahrscheinlichkeiten aller Versorgungswege nicht gleich der angegebenen gesamten Ausfallwahrscheinlichkeit. Ein offensichtliches Beispiel für eine gemeinsame Abhängigkeit ist die Überflutungsdauer. Die Gesamtausfallwahrscheinlichkeiten werden im PSA-Modell übernommen. Allerdings können dort die Korrelationen nicht berücksichtigt werden.

Tab. 3.5 Mittels Monte-Carlo-Simulation berechnete bedingte Ausfallwahrscheinlichkeiten auf Anforderung bei einem langandauernden Hochwasser für die Personal-, Kraftstoff- und (frühzeitige) externe Stromversorgung

Ausfallwahrscheinlichkeit bei Anforderung	Gesamt	Fährbetrieb	Luftbrücke	Kombination	Versorgungsweg
Art der Versorgung					
Personalversorgung	4,6 E-01	8,7 E-01	6,5 E-01	7,7 E-01	8,3 E-01
Kraftstoffversorgung	2,3 E-03	4,6 E-01	9,0 E-02	–	5,5 E-02
Externe Stromversorgung	1,4 E-01	–	–	–	–
Frühzeitige externe Stromversorgung	9,9 E-01	–	–	–	–

Bei einem langandauernden Hochwasser kann die Personalversorgung seltener rechtzeitig sichergestellt werden als die Kraftstoffversorgung. Grund hierfür ist die kürzere Dauer (maximal $\Delta T_{SD} = 2$ d bzw. maximal $\Delta T_{KSR} = 7$ d), bis die Versorgung sichergestellt werden muss. Weiterhin können die Luftbrücke und der Fährbetrieb ausfallen, wenn nicht ausreichend Mittel (CH-53, Amphibie M3) am Anlagengelände zur Verfügung stehen. Die Häufigkeitsverteilung hierfür ist in Abb. 3.1 dargestellt. Beispielsweise stehen in knapp 50 % der Szenarien nicht ausreichend Amphibien M3 für die Einrichtung des vollständigen Fährbetriebs für Personal- und Kraftstoffversorgung zur Verfügung, für die eingeschränkte Versorgung sind es etwa 15 %.

Es kann festgestellt werden, dass unter den oben getroffenen Annahmen, insbesondere der probabilistischen Verteilungen der Überflutungsdauer und der notwendigen Reparaturdauer der externen Stromversorgung, nur in wenigen Fällen die externe Stromversorgung frühzeitig (< 10 h) wiederhergestellt werden kann.

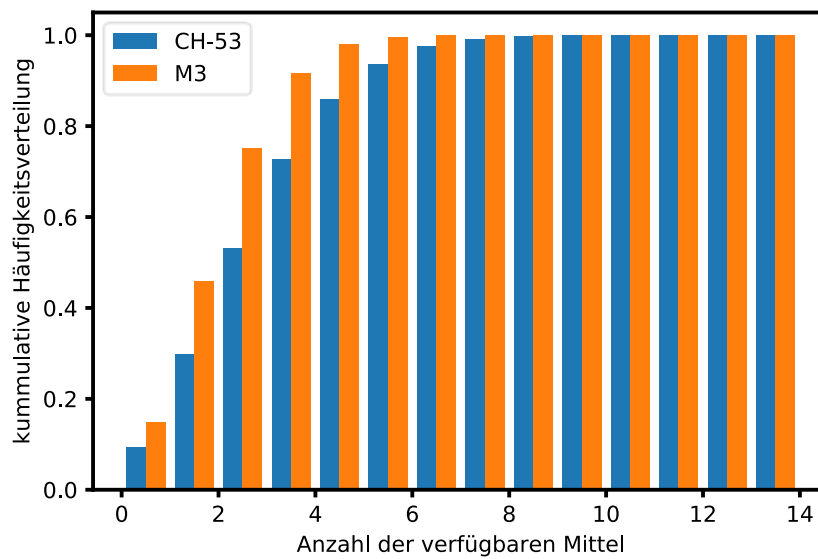


Abb. 3.1 Anzahl der verfügbaren CH-53 und Amphibie M3 für deren Einsatz in der Luftbrücke und des Fährbetriebs

Weiterhin ist sowohl die Ausfallwahrscheinlichkeit der Personalversorgung als auch der Kraftstoffversorgung von der Hochwasserdauer abhängig. Der Zusammenhang ist in Tab. 3.6 dargestellt.

Tab. 3.6 Zusammenhang zwischen der Hochwasserdauer und der Ausfallwahrscheinlichkeiten der Personalversorgung und der Kraftstoffversorgung unter Verwendung der Standardmodelle

Hochwasserdauer	Ausfallwahrscheinlichkeit Personalversorgung	Ausfallwahrscheinlichkeit Kraftstoffversorgung
0 – 2 d	3,3 E-01	< 1,0 E-06
2 – 4 d	4,9 E-01	1,0 E-04
4 – 6 d	5,0 E-01	6,0 E-03
6 – 8 d	4,8 E-01	2,3 E-02
8 – 10 d	4,7 E-01	3,2 E-02
10 – 12 d	4,6 E-01	3,9 E-02
12 – 14 d	4,7 E-01	3,9 E-02
14 – 16 d	4,5 E-01	4,2 E-02
16 – 18 d	4,8 E-01	6,4 E-02

Die in Tab. 3.5 gezeigten Ergebnisse basieren auf Annahmen, die in Abschnitt 2.5.5 diskutiert wurden. Zur quantitativen Untersuchung dieser Annahmen wurden die Standardmodelle der betreffenden Faktoren angepasst und in Tab. 3.2 beschrieben. Die damit durchgeführte Monte-Carlo-Simulation mit 10^6 zufälligen Szenarien zeigt, dass die beiden Faktoren 'Einleitung ergänzender Notfallmaßnahmen' t_{NFM} und 'Überflutungsdauer' ΔT_{FD} den größten Einfluss auf die Ausfallwahrscheinlichkeiten der Personalversorgung und der Kraftstoffversorgung haben. Für die Berücksichtigung der Abhängigkeit zur Hochwasserdauer sind die quantitativen Werte basierend auf den Standardmodellen in Tab. 3.6 angegeben. Weiterhin sind die Vorlaufzeiten für die Luftbrücke ΔT_{LB} und den Fährbetrieb ΔT_{LFB} von Bedeutung. Die Gesamtzahl der Mittel (einschließlich nicht einsatzbereiter Mittel) N_{CH53}^{gesamt} und N_{M3}^{gesamt} spielen hingegen eine untergeordnete Rolle. Für die Ausfallwahrscheinlichkeit der Wiederherstellung der externen Stromversorgung sind aufgrund der Modellannahmen nur die Überflutungsdauer und die Reparaturdauer ΔT_{RESV} relevant. Die Korrelationskoeffizienten sind in Tab. 3.7 angegeben.

Tab. 3.7 Spearman's Korrelationskoeffizient der relevanten Faktoren mit Einfluss auf die Personal- und Kraftstoffversorgung sowie die externe Stromversorgung

Faktor	Personal	Kraftstoff	externe Stromversorgung
t_{NFM}	0,43	0,26	–
ΔT_{FD}	0,21	0,25	0,66
ΔT_{LB}	0,22	0,11	–
ΔT_{LFB}	0,12	0,06	–
N_{CH53}^{gesamt}	0,11	0,08	–
N_{M3}^{gesamt}	0,06	0,06	–
ΔT_{RESV}	–	–	0,26

3.2 Einbindung der Kraftstoff- und Personalversorgung mit ergänzenden Notfallmaßnahmen sowie Wiederherstellung der externen Stromversorgung im PSA-Anlagenmodell

Für die Modellierung langandauernder Ereignisse wurden die ergänzenden Notfallmaßnahmen in das PSA-Anlagenmodell integriert. Deren Einbindung geschieht hauptsächlich über die jeweiligen Ausfallwahrscheinlichkeiten für die Personalversorgung, die Ver-

sorgung mit Kraftstoff sowie die Wiederherstellung der externen Stromversorgung, wie sie in Tab. 3.5. angegeben sind.

Sofern die Personalversorgung nicht rechtzeitig sichergestellt werden kann, wird angenommen, dass sich die Fehlerwahrscheinlichkeit von Handmaßnahmen (Englisch: human error probability, HEP) um den Faktor 5 erhöht. Dieser Faktor wurde aus der Methode SPAR-H (siehe /NRC 05/, Kap. 2.4.4.7, S. A-5) mit den folgenden leistungsbeeinflussenden Faktoren (Englisch: performance shaping factors, PSFs) aus den Handlungsaufgaben (action tasks) abgeleitet: fitness for duty (Einsatzfähigkeit) mit dem Wert für eine verminderte Leistungsfähigkeit (degraded fitness). Die Erhöhung ist in Tab. 3.8 dargestellt.

Tab. 3.8 Anpassung der Ausfallwahrscheinlichkeiten für die relevanten menschliche Handlungsfehler (HEP) beim Ausfall der rechtzeitigen Personalversorgung (Basiselement PERSONAL_HWLAE)

Basisereignis	Bezeichnung	Ursprüngliche HEP	Angepasste HEP
OP_ABF/50K	Handmaßnahme zum Abfahren mit 50 K/h ausgefallen	8,60 E-02	4,30 E-01
OP_BORIER	Handmaßnahmen zum Borieren des Kühlmittels nicht erfolgreich	1,00 E-02	5,00 E-02
OP_DA_PRIM	Handmaßnahmen zur Druckabsenkung der Primärseite nicht erfolgreich	1,00 E-02	5,00 E-02
OP_DEIONAT NASP	Ausfall Handmaßnahmen für Deionatnachspeisung	1,00 E-02	5,00 E-02
OP_HW_UBP	Ausfall der Maßnahmen zum Setzen der Hochwasser-Schotte	8,50 E-05	nicht angepasst, da noch vor HWLAE
OP_HW_UBP_ALARM	Alarmierung wird nicht rechtzeitig durchgeführt	3,00 E-02	nicht angepasst, da noch vor HWLAE
OP_HW_UBP_ANWEISUNG	Anweisung zum Schließen der schwenkbaren Schotten wird nicht erteilt	1,00 E-02	nicht angepasst, da noch vor HWLAE
OP_JNA-FAK-NWA	Manueller Start von JNA/FAK für RDB-Kühlung über Untergruppensteuerung fällt aus	4,73 E-04	2,37 E-03
OP_LAR	Maßnahme zum Öffnen LAR-Verbindungsleitung von Hand ausgefallen	2,30 E-03	1,15 E-02
OP_LAR_ONACHSP	Ausfall Handmaßnahmen zum Nachspeisen Deionatbehälter	1,00 E-02	5,00 E-02
OP_LAS_PPE	Handmaßnahme zum Starten der Notspeisepumpe über Elektro-Antrieb ausgefallen	3,00 E-02	1,50 E-02
OP_NWA-BECKEN	Manueller Start von JNA oder FAK für Beckenkühlung ohne Untergruppensteuerung fällt aus	1,13 E-01	5,65 E-01

Basisereignis	Bezeichnung	Ursprüngliche HEP	Angepasste HEP
OP_NWA_OUGS	Manueller Start von JNA/FAK für RDB-Kühlung ohne UGS fällt aus	1,52 E-02	7,60 E-02
OP_PDE/SDE	Handmaßnahmen PDE nach Ausfall SDE versagen	2,50 E-01	1,00 E±00
OP_SDE	Handmaßnahmen zur Durchführung SDE versagen (ohne SPL)	8,30 E-02	4,15 E-01
OP_ZELLENK. NACHSP.	Ausfall Öffnen der Handarmaturen für Zellenkühler	1,00 E-02	5,00 E-02

3.3 Detailanalysen für langandauernde übergreifende Einwirkungen und Einwirkungskombinationen

3.3.1 Umfassende Berücksichtigung langandauernder Einwirkungen von außen und entsprechender Einwirkungskombinationen

In einer Hazards PSA für langandauernde Ereignisse müssen für alle nach dem qualitativen und quantitativen Einwirkungsscreening (vgl. /MAY 20/) verbliebenen, unter bestimmten Randbedingungen langandauernden Einzeleinwirkungen von außen ebenso wie für entsprechende Ereigniskombinationen von Einwirkungen von außen mit anderen Einwirkungen (von innen oder außen) oder mit anlageninternen Ereignissen Detailanalysen durchgeführt werden.

Für die Referenzanlage handelt es sich dabei entsprechend dem Einwirkungsscreening in /MAY 20/ und dem weiteren Screening in Bezug auf langandauernde Ereignisse nur um die naturbedingten Einzeleinwirkungen „Erdbeben“ und „Hochwasser“. Nachfolgende Ereigniskombinationen mit zumindest einer langandauernden Einwirkung sind am Standort der Referenzanlage nicht auszuschließen:

- Erdbeben und langandauernder Folgebrand,
- langandauernde Erdbebenauswirkungen und darauffolgender anlageninterner Brand,
- langandauernde Erdbebenauswirkungen und darauffolgende anlageninterne Überflutung,
- langandauernde Erdbebenauswirkungen und darauffolgendes, insbesondere hochenergetisches Komponentenversagen,
- langandauernde Erdbebenauswirkungen und darauffolgende anlageninterne Explosion,
- langandauerndes Hochwasser und darauffolgender anlageninterner Brand,
- langandauerndes Hochwasser und darauffolgende anlageninterne Überflutung,
- langandauerndes Hochwasser und darauffolgendes, insbesondere hochenergetisches Komponentenversagen,
- langandauerndes Hochwasser und darauffolgende anlageninterne Explosion sowie

- unfallbedingter Flugzeugabsturz mit einem langandauernden Brand,

wobei die Folgeereignisse ggf. auch noch korreliert mit einem Notstromfall bzw. einem Station Blackout auftreten können.

Des Weiteren sind auch Kombinationen von unabhängig voneinander gleichzeitig auf die Referenzanlage einwirkenden langandauernden Einwirkungen nur quantitativ auszuschließen. Dabei handelt es sich um die Kombinationen langandauernder Erdbebenereignisse oder eines langandauernden Flusshochwasser mit der Einwirkung von innen „Brand“.

Durch Erdbeben kann es zu einem langandauernden Notstromfall kommen. Deshalb muss in der PSA für die entsprechenden Ereignisabläufe in der Referenzanlage der Notstromfall überlagert werden.

Eine anlagenexterne Überflutung durch Flusshochwasser betrifft den gesamten Standort. Personelle Abhängigkeiten (u. a. Werkfeuerwehr für die Durchführung temporärer Hochwasserschutzmaßnahmen am Standort) sind für die Hazards PSA zu berücksichtigen.

Hochwasserschutzmaßnahmen werden an allen Anlagen des Standorts von der Werkfeuerwehr am Standort durchgeführt. Dabei handelt es sich primär um temporäre Schutzmaßnahmen an Gebäuden, welche durch diese bis zur Schutzhöhe des Standorts gegen eindringendes Wasser geschützt werden. Der Schutz der Gebäude, in denen Systeme der Notstromversorgung untergebracht sind, hat dabei die höchste Priorität. Die für die Durchführung der Maßnahmen benötigte Zeit hängt u. a. stark von der Personalverfügbarkeit am Standort ab. Durch die Überflutung des Standorts kann es zum Eintritt eines Notstromfalls kommen, der in der PSA für den Ereignisablauf Hochwasser in den betroffenen Anlagen berücksichtigt werden muss. Das Hochwasserereignis kann ggf. ein langandauerndes Ereignis darstellen.

Die unmittelbaren Auswirkungen eines unfallbedingten Flugzeugabsturzes sind im Falle des Absturzes eines kleineren Militärflugzeugs lokal begrenzt und würden aufgrund der räumlichen Trennung der verschiedenen Anlagen nur wenige Gebäude und Systemteile betreffen. Beim Absturz eines größeren Passagierflugzeugs könnte jedoch mehr als ein Gebäude, insbesondere von den thermischen Auswirkungen, ggf. aber auch durch einen mechanischen Aufprall betroffen sein. Für die Referenzanlage ist eine probabilistische

Grobanalyse ausreichend. Dabei sind insbesondere Ereignisabläufe mit Folgebränden eines Flugzeugabsturzes zu modellieren und zu quantifizieren, die sich über das Gelände ggf. in mehrere Gebäude ausbreiten und zu Komponentenausfällen in und Freisetzungen von Radioaktivität aus diesen führen können. Dabei sind das Feuerlöschsystem und Entwässerungsleitungen auf dem Gelände, ebenso wie das vorhandene Anlagenpersonal, welches ggf. nicht für entsprechende, bei solchen Szenarien zu ergreifenden Maßnahmen zur Verfügung steht, im PSA-Modell zu berücksichtigen.

Die Folgen eines Flugzeugabsturzes können ebenfalls zu einem ggf. langandauernden Notstromfall führen. Deshalb muss in der PSA für die entsprechenden Ereignisabläufe in der jeweiligen Anlage der Notstromfall überlagert werden.

Die Berücksichtigung standortübergreifender Einwirkungen und Einwirkungskombinationen konnte im Rahmen des Vorhabens nicht vollständig durchgeführt, sondern nur an ausgewählten Beispielen im Detail erprobt werden. Von den nach dem Screening verbliebenen Einwirkungen boten sich anlagenexterne Überflutungen als geeignetes Beispiel an, da hier aktuell seitens der GRS bereits (siehe auch /ROE 17a/) methodische Weiterentwicklungen durchgeführt worden waren und am Referenzstandort Abhängigkeiten sowohl bei den SSC wie auch bei menschlichen Ressourcen und Handlungen bestehen.

3.3.2 Erweiterung von Ereignisbäumen des PSA-Anlagenmodells der Referenzanlage für die probabilistische Detailanalyse

Nachfolgend sind die Annahmen und Voraussetzungen dargestellt, die bei der Erweiterung bestehender Ereignisbäume in der PSA der Stufe 1 für die Referenzanlage für die beiden untersuchten Szenarien 'langandauerndes Hochwasser' und 'langandauerndes Erdbeben' getroffen wurden.

3.3.2.1 Ereignisablaufanalysen

Für die Analysen wurden Ergebnisse aus früheren GRS Vorhaben (siehe u. a. /ROE 17/, /ROE 18/ und /SPE 18/ sowie Angaben aus der im Rahmen der Sicherheitsüberprüfung durchgeführten PSA des Betreibers zu Einwirkungen von außen /KKW 09a/ und dem aktuellen Betriebshandbuch verwendet.

Die Anlage ist laut /KKW 09a/ bis zu einem Wasserstand von 2,50 m entsprechend Kraftwerkskote 0,00 m gegen Hochwasser geschützt. Ab dieser Höhe gibt es für bestimmte Gebäude weitere mobile Hochwasserschutzeinrichtungen als temporäre Hochwasserschutzmaßnahmen. An allen vier Redundanzen des sicherheitstechnisch relevanten Notstromdieselgebäudes sind die großen Hochwasserschotte fest installiert und für den Eingangsbereich sogenannte Schwenkschotte angebracht, die sich im Anforderungsfall leicht von einer einzelnen Person schließen lassen. Da das Maschinenhaus nicht durch mobile Hochwasserschutzeinrichtungen geschützt wird, beginnt dort bei Erreichen dieser Höhe die Überflutung. Die Überflutung des Maschinenhauses führt mindestens zum Ausfall der Hauptspeisewasser-, An- und Abfahrpumpen sowie der Hauptkondensatpumpen, wodurch die Transienten 'Ausfall des Hauptspeisewassers', (T2) und 'Ausfall der Hauptwärmesenke' (T3) ausgelöst werden.

Die folgenden Gebäude sollen bei Hochwasser durch Anbringen bzw. Zuschwenken mobiler Hochwasserschotte geschützt werden:

- Türen und Tor des Lagers für radioaktive Abfälle,
- Türen des 400 kV-Schalthauses,
- Türen des 10 kV-Schalthauses und
- Türen des Notstromdieselgebäudes.

Für die nachfolgenden Analysen wird in der Referenzanlage unterstellt, dass die Schotte der Schalthäuser nicht ordnungsgemäß angebracht werden. Es kommt dadurch zu einem Ausfall der Eigenbedarfsversorgung und somit zu einem Notstromfall, der die oben genannten Transienten überlagert. Ein Ausfall des Notstromdieselgebäudes durch Fehler beim Schließen der schwenkbaren Hochwasserschotten wird, wie in Abschnitt 2.5.2 ausgeführt, mit einer Wahrscheinlichkeit von $8,5 \cdot 10^{-5}$ abgeschätzt.

Ereignisablauf

Nachfolgend ist der Ereignisablauf beschrieben, der als Ereignisbaum in Abb. 3.2 dargestellt ist.

Es wird angenommen, dass sich das Hochwasser langsam entwickelt, es also nicht zu plötzlichen Überschwemmungen z. B. durch eine Sturzflut kommt (vgl. /ROE 17a/). Entsprechend dem Pegelanstieg am Einlaufbauwerk werden nach Anweisung im Betriebshandbuch (vgl. /BHB 17/, S. 2-3.5.1) gestaffelte Maßnahmen ergriffen, um die Anlage zu sichern (siehe dazu auch Tab. 2.2).

Für den weiteren Ereignisablauf wird unterstellt, dass der Reaktorblock wegen des steigenden Pegelstandes nicht vorsorglich abgefahren wird, sondern dass ein Ausfall der Eigenbedarfsversorgung durch überschwemmungsbedingtes Versagen des Schaltanlagegebäudes eintritt. Das Zuschalten des 110 kV-Reservenetzes ist wegen Überflutung des 110 kV-Schalthauses nicht möglich. Im weiteren Ablauf wird unterschieden, ob die Netzanbindung innerhalb von 10 Stunden wiederhergestellt werden kann oder nicht.

Im ersteren Fall kommt es zu einem „klassischen“, d. h. nicht langandauernden Notstromfall T1-AM, der als separates Ereignisablaufdiagramm zu modellieren ist und über die Auswirkung T1-AM (siehe Abb. 3.2) mit dem bereits vorhandenen Ereignisablaufdiagramm verknüpft werden würde. Dieses Ereignisablaufdiagramm unterscheidet sich nicht von dem, wie es zum Beispiel in /GRS 01/ beschrieben ist und wird deshalb für diese Untersuchung nicht weiter berücksichtigt.

Systemfunktion im Ereignisbaum: NETZANBINDUNG < 10H

„RESA“: Durch Auslaufen der Hauptkühlmittelpumpen wird über „Drehzahl 2v4 HKMP < min“ die Reaktorschnellabschaltung (RESA) ausgelöst. Ein Ausfall der RESA-Funktion führt direkt zu einem sogenannten ATWS (anticipated transient without scram)-Zustand, der normalerweise im Hinblick auf die PSA der Stufe 2 weiter untersucht wird. Aufgrund der hohen Zuverlässigkeit der RESA-Funktion (die Ausfallwahrscheinlichkeit beträgt $9,0 \cdot 10^{-7}$) wird die weitere Untersuchung für diesen Fall in der vorliegenden Untersuchung vernachlässigt.

Systemfunktion im Ereignisbaum: RESA

„Frischdampfsammler verfügbar“: Ist der Frischdampfsammler nicht verfügbar können die Dampferzeuger nur über ihre zugeordnete Frischdampfabblassestation Wärme abführen.

Systemfunktion im Ereignisbaum: B1

„Frischdampfabgabe / Sekundärseitige Wärmafuh über Teilabfahren“: Durch das ebenfalls durch die Überflutung des Maschinenhauses ausgefallene Hauptkondensatsystem kommt es zum Ausfall der Hauptwärmesenke (Verblockung der Frischdampfumleitstation), und der Druck in den Dampferzeugern steigt bis 85 bar an, wodurch ein Teilabfahren auf 74 bar ausgelöst und die Nachwärme über die Frischdampfabblassstation abgeführt wird.

Systemfunktion im Ereignisbaum: Y1

„Notstromversorgung“: Über „Spannung der Notstromschiene < min“ werden die Notstromdiesel der Redundanzen 1 – 4 gestartet, wodurch die Notstromschienen mit Drehstrom versorgt werden. Ein möglicher Ausfall der Hochwasserschutzmaßnahmen im Notstromerzeugergebäude und der damit verbundene Ausfall aller Notstromdiesel des Notstromnetzes 1 ist in den Fehlerbäumen ET-BDA bis ET-BDD berücksichtigt. Bei diesem Ereignis wird von einer langfristigen Notstromversorgung ausgegangen.

Systemfunktion im Ereignisbaum: NSV-LANG

„Dampferzeugerbespeisung“: Durch das Abblasen von Frischdampf sinkt der Füllstand in den Dampferzeugern. Nach Unterschreiten eines Füllstands von 5 m werden redundanzzugeordnet die Notspeisepumpen zur Füllstandsanhebung gestartet. Die von einem vorgelagerten Füllstandslevel zur Füllstandshaltung angeforderten An- und Abfahrpumpen sind durch die Überflutung des Maschinenhauses nicht verfügbar. Das Deionat für die Dampferzeugerbespeisung wird aus den entsprechend zugeordneten Notspeisebecken bezogen. Laut BHB reicht der Inhalt eines Notspeisebeckens aus, um für etwa 5 h die Nachwärme abzuführen.

Systemfunktion im Ereignisbaum: LA/LB

„Nachspeisen der Deionatbecken“: Die Becken müssen nach ca. 5 h nachgespeist werden, was über die Deionatversorgung, das Feuerlöschsystem oder über die Brunnenwasserversorgung (vgl. /BHB 17/, 3-4.1,3.2, Maßnahmeblock 5) mit den Brunnenzusatzwasserpumpen durchgeführt werden kann (Funktion: Deionat Nachspeisung). Für den herkömmlichen Notstromfall (ohne langfristige Überflutung) ist diese Funktion nicht nötig, da von einer Wiederverfügbarkeit der Stromversorgung innerhalb von 2 h ausgegangen wird.

Systemfunktion im Ereignisbaum: LAR

„Abfahren mit 50 K/h“: Laut BHB soll die Anlage langfristig mit 50 K/h abgefahren werden. Es wird angenommen, dass die Systemtechnik nach erfolgreichem Teilabfahren

mit hoher Zuverlässigkeit funktioniert. Auf der Primärseite wird die durch Kontraktion des Kühlmittels verursachte Volumenreduktion im Druckhalter über die Druckhalter-Füllstandsregelung mit dem Volumenregelsystem ausgeglichen. Vereinfachend werden für den Ausfall dieser Funktion nur die notwendigen Operateur-Handlungen für Einleitung und Durchführung bewertet.

Systemfunktion im Ereignisbaum: ABF/50K

„Aufborieren zur Einhaltung der Unterkritikalität“: Um das Schutzziel Unterkritikalität einzuhalten, muss bei Abkühlung des Kühlmittels der Primärkreis mit dem Zusatzboriersystem mit 7.000 ppm boriertem Kühlmittel aufboriert werden. Laut BHB sollen mindestens 2v4 Zusatzborierstränge einspeisen, um die für die Kühlmitteltemperatur mindestens zulässige Borkonzentration zu erhalten. Ein Ausfall des Borierens kann zu einer Rekritikalität führen (Endzustand: KRIT).

Systemfunktion im Ereignisbaum: BORIEREN

„Druckabsenken auf der Primärseite“: Falls die sekundärseitige Wärmeabfuhr oder die Nachspeisung der Deionatbecken ausfallen, muss die Wärmeabfuhr über die Primärseite abgeführt werden. Dazu muss der Druck auf der Primärseite abgesenkt werden. Dies wird durch Druckhaltersprühen mittels des Zusatzboriersystems erreicht.

Systemfunktion im Ereignisbaum: DA PRIM

„Wärmeabfuhr mit primärseitigem Nachwärmeabfuhrsystem“: Nach Unterschreiten von 180 °C Kühlmitteltemperatur und 3,7 MPa im Primärkreis kann die Wärme über die Nachkühlsysteme und die Nachkühlkette abgeführt werden. In diesem Fall müssen laut Systembeschreibung für das gesicherte Nebenkühlwasser nach etwa 8 bis 10 h die Zellenkühler durch Zusatzwasser aus dem Brunnen 2 (Nachbarblock) nachgespeist werden. Diese Maßnahme ist im Fehlerbaum modelliert.

Systemfunktion im Ereignisbaum: NWA PRIM

„Wärmeabfuhr aus Brennelement-Lagerbecken“: Nach ca. 10 h ist die Wärmeabfuhr aus dem Brennelement-Lagerbecken erforderlich, um die zulässige Temperatur ≤ 60 °C langfristig sicherzustellen. Hierzu sind die drei Beckenkühlstränge sowie bei deren Ausfall die Möglichkeit der Wärmeabfuhr über zwei Stränge des Nachkühlsystems vorgesehen. Die Anforderung an den betrieblichen Beckenkühlkreis FAK20 erfolgt automatisch über die Temperaturgrenzwerte im Brennelementlagerbecken. Die redundanten Stränge müssen dagegen von Hand zugeschaltet werden. Ein Ausfall der Lagerbeckenkühlung führt dort langfristig zu Brennstabschäden (Endzustand: BS).

Systemfunktion im Ereignisbaum: NWA BECKEN

„Notfallmaßnahmen: Sekundärseitige Druckentlastung und Bespeisung (SDE)“: Fällt die Energieversorgung über die Notstrom- bzw. Notspeisediesel oder die Bespeisung der Dampferzeuger mit dem Notspeisesystem aus, besteht die Möglichkeit, mittels SDE die Dampferzeuger zu bespeisen. Die bei dieser Maßnahme geplante Einspeisung aus dem Speisewasserbehälter ist bei dem unterstellten Hochwasser nicht möglich. Im vorliegenden Fall bleibt die Variante der Dampferzeuger-Bespeisung mit der mobilen Pumpe über die Sammelleitung des Notspeisesystems.

Systemfunktion im Ereignisbaum: SDE

„Notfallmaßnahmen: Primärseitige Druckentlastung und Bespeisung (PDE)“: Bei Ausfall der vorgelagerten Systemfunktionen wird bei Erreichen der entsprechenden Kriterien die Notfallmaßnahme „Primärseitige Druckentlastung und Bespeisung“ durchgeführt. Dabei wird der Druck über das Druckhalter-Abblaseventil sowie die beiden Druckhalter-Sicherheitsventile abgesenkt und boriiertes Wasser aus den Druckspeichern und Niederdruck-Einspeisesystemen eingespeist.

Systemfunktion im Ereignisbaum: PDE

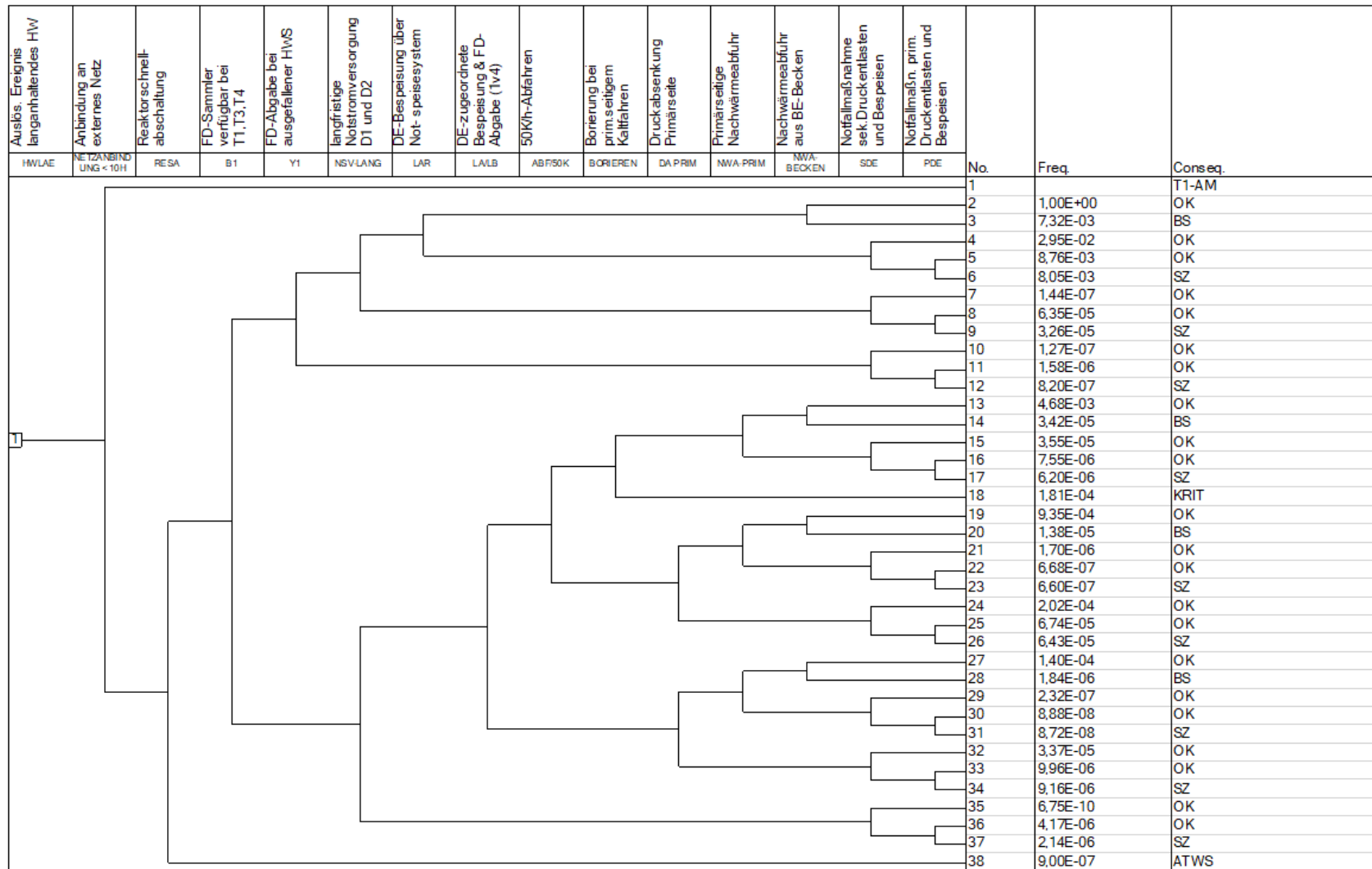


Abb. 3.2 Ereignisbaum für langandauerndes Hochwasser

3.3.2.2 Ereignisablaufanalyse für die Ereigniskombination „langandauerndes Ereignis nach Erdbeben“

Als abdeckendes Ereignis wird als Folge eines Erdbebens eine langandauernde interne Überflutung unterstellt. Demzufolge entspricht der Ereignisablauf prinzipiell dem im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Ablauf für ein langandauerndes Hochwasser.

3.3.3 Erweiterung von Fehlerbäumen im PSA-Modell der Referenzanlage für die probabilistische Detailanalyse

Die Erweiterung des PSA-Anlagenmodells basiert auf der vom Betreiber der Referenzanlage im Rahmen der Sicherheitsüberprüfung erstellten PSA.

Da in einem langandauernden Ereignisablauf viele Maßnahmen von Hand einzuleiten und durchzuführen sind, betreffen die Änderungen im Fehlerbaum hauptsächlich die Modellierung von Handmaßnahmen.

Erste Testrechnungen haben gezeigt, dass der Austausch des Personals nach einer Schicht einen großen Einfluss auf die Zuverlässigkeit der durchzuführenden Maßnahmen hat. Daraufhin wurden die relevanten Handmaßnahmen mit der Methode SPAR-H /NRC 05/ neu bewertet (vgl. Tab. 3.8). Es zeigt sich, dass sich die Ausfallwahrscheinlichkeiten der Handmaßnahmen um den Faktor 5 erhöhen, falls ein Ersatz des Personals nicht möglich ist. Die Wahrscheinlichkeit für einen Ausfall des Personalersatzes ist jedoch wiederum abhängig von der Dauer der Überflutung. Das Gleiche gilt für die Zuverlässigkeit der Maßnahmen für die Dieselbeschaffung.

Deshalb wurden für diese Komponenten Ersatzereignisse (sogenannte Exchange Events) definiert, die über sogenannte „House Events“ entsprechend den untersuchten Flutdauern aktiviert werden.

Abb. 3.3 zeigt die Definition der Exchange Events der Komponenten für Personalersatz und Dieselbeschaffung für die unterschiedlichen Überflutungsdauern. Da sich die Werte für den Personalersatz nach zwei Tagen nicht mehr ändern, wird für die verschiedenen Fälle mit Flutdauern von mehr als zwei Tagen dasselbe Exchange Event verwendet.

House Event	Char #1	Exchange Event
FLUTDAUER 2-4D	▼	PERSONAL >2D
FLUTDAUER 4D-8D		PERSONAL >2D
FLUTDAUER 8D-12D		PERSONAL >2D
FLUTDAUER 12D-18D		PERSONAL >2D
FLUTDAUER 0-2D		PERSONAL <2D

House Event	Char #1	Exchange Event
FLUTDAUER 2-4D	▼	DIESEL 2-4
FLUTDAUER 4D-8D		DIESEL 4-8
FLUTDAUER 8D-12D		DIESEL 8-12
FLUTDAUER 12D-18D		DIESEL 12-18
FLUTDAUER 0-2D		DIESEL 0-2

Abb. 3.3 Definition von Exchange Events in den Fehlerbäumen

Die anderen Handmaßnahmen im Ereignisablauf sind mit den Wahrscheinlichkeiten für Erfolg bzw. Ausfall des Personalwechsels verknüpft. Um zu vermeiden, dass sich logisch ausschließende minimale Schnittmengen bilden, wurden die jeweils komplementären Erfolgs- bzw. Ausfallereignisse als negierte Elemente verknüpft. Abb. 3.4 zeigt ein entsprechendes Beispiel. Bei der Quantifizierung ist zu beachten, dass RiskSpectrum® zwar die minimalen Schnittmengen (Englisch minimal cutsets) richtig ermittelt, die Wahrscheinlichkeiten für diese aber nicht genau berechnet. Zur Quantifizierung ist ein Näherungsverfahren voreingestellt, welches bei vergleichsweise hohen Wahrscheinlichkeiten für die negierten Zuverlässigkeitskenngrößen konservative Ergebnisse ausweist. Diese Konservativität könnte man umgehen, indem bei der Quantifizierung die sogenannte DeMorgan-Option /LR 20/ verwendet wird, da mit dieser Option die Wahrscheinlichkeiten der minimalen Schnittmengen exakt errechnet werden. Diese Option ist aber nur bei kleinen Modellen praktikabel, da die Rechenzeiten für die DeMorgan-Option im Vergleich zum Näherungsverfahren sehr hoch sind.

Weiterhin ist es in RiskSpectrum® nicht möglich, eine Gesamtrechnung über alle Flutdauerintervalle durchzuführen, etwa um den Einfluss der Flutdauern auf das Gesamtergebnis zu ermitteln. Grund hierfür ist, dass bei einem Rechenlauf nur eine Randbedingung angegeben werden kann. Somit können die Ergebnisse nur separat für jede Flutdauer ermittelt werden.

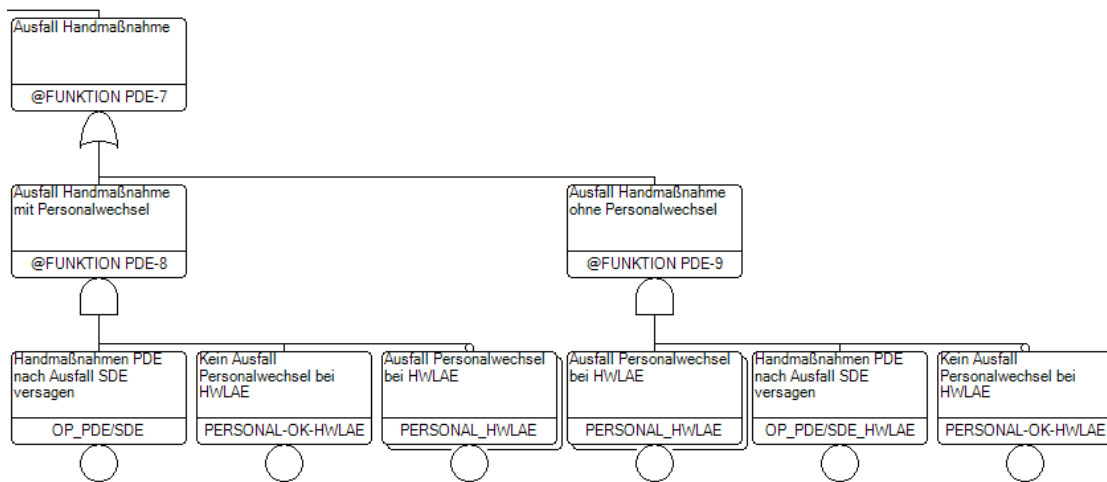


Abb. 3.4 Beispiel eines Fehlerbaums für die Verknüpfung von Personalwechsel und Handmaßnahmen

Um eine Gesamtrechnung über alle Flutdauern durchführen zu können, müsste für jede Flutdauer ein eigener Ereignisbaum aufgestellt werden, der mit den entsprechenden Fehlerbäumen mit spezifischen Daten für die jeweilige Randbedingung verknüpft wird. Wegen des hohen Modellierungsaufwandes musste auf diese Möglichkeit verzichtet werden. Eine Weiterentwicklung der von der GRS entwickelten Analysewerkzeuge (u. a. pyRiskRobot) zur Berücksichtigung übergreifender Einwirkungen in PSA der Stufe 1 könnte diesen Aufwand jedoch mittelfristig reduzieren.

3.3.4 Einfluss zusätzlichen Anforderungen an Zuverlässigkeitskenngrößen für SSC

Missionszeiten

Die wesentliche zusätzliche Anforderung an die SSC besteht in den erheblich erweiterten Laufzeiten für Aggregate (Pumpen, Diesel, Ventilatoren). In bisherigen PSA wurden je nach auslösendem Ereignis Laufzeiten von Aggregaten zwischen 2 h und 24 h benutzt. Für die vorliegenden Untersuchungen sind diese Zeiten nicht mehr ausreichend, da durch die langandauernde Einwirkung von deutlich längeren Zeiträumen ausgegangen wird, bis ein dauerhaft stabiler Zustand erreicht wird.

Die am Standort der Referenzanlage verfügbaren Vorräte für den Dieselbetrieb sind für mindestens 72 h ausreichend. Durch die Option der ergänzenden Notfallmaßnahmen zur Dieselversorgung kann ein Betrieb über die gesamte Hochwasserdauer gewährleis-

tet werden. In den Analysen wird diese Zeit auf 100 h abgeschätzt. Ein Einfluss auf die Ausfallraten der Aggregate durch den verlängerten Betrieb wird in den vorliegenden Untersuchungen vereinfachend nicht angenommen. Es ist jedoch zu beachten, dass die Bestimmung der Ausfallraten allgemein auf einer Auswertung vergleichbarer Betriebserfahrung beruht, die vor allem im Testbetrieb entsteht. Die Laufzeiten der Komponenten aus den Tests werden zwar für die Datenermittlung kumuliert, die tatsächliche Laufzeit eines Diesels bei der 4-wöchentlichen Prüfung soll nach KTA 3702 /KTA 14/ mindestens 2 h betragen. Ein Dauerbetrieb von 72 h wird nur alle acht Jahre durchgeführt. Eine Aussage, ob sich das Ausfallverhalten im Langzeitbetrieb gegenüber dem Kurzzeitbetrieb ändert, kann daraus nicht abgeleitet werden. Somit werden ohne Änderung der Ausfallraten die Missionszeiten im PSA-Modell für diejenigen Komponenten, die für die Stromerzeugung und zur Nachwärmeabfuhr (Diesel, Dampferzeugerbespeisung, nukleare Nachkühlkette) im Dauerbetrieb sind, auf 100 h erhöht.

Bewertung von Reparaturoptionen

In einer französischen Veröffentlichung zu langandauernden Ereignissen /GEO 14/ wurde festgestellt, dass die Betrachtung von Reparaturmöglichkeiten wichtig ist und diese deshalb auch in französischen Untersuchungen zu langandauernden Ereignissen berücksichtigt werden. Beispielsweise wurden in unterschiedlichen Studien

- die Wiederherstellung des Auslösers („initiator recovery“),
- die Befüllung der Speisewasserbehälter mit Deionat,
- die Wiederherstellung der Hauptwärmesenke,
- die Reparatur der Notstromerzeugeranlagen sowie
- die Wiederherstellung der externen Stromversorgung

einbezogen. Weiterhin wird darauf hingewiesen, dass die benötigten Wiederherstellungs- bzw. Reparaturdauern wichtige, zugleich aber auch unsichere Faktoren darstellen. Eine Sensitivitätsanalyse ist daher für diese Faktoren notwendig. In einer Sicherheitsanalyse der Referenzanlage /KKW 12/ wurden die in Tab. 3.9 zusammengefassten Reparaturdauern angenommen. Zusammenfassend wurden somit

- 40 h für die Maschinentechnik,
- 2, 10, 12, ... h für die Elektrotechnik und

- 20 h für die Leittechnik

verwendet /KKW 12/, S. 5.2-7. Bei Systemen auf dem Außengelände bzw. außerhalb des Anlagengeländes (vor allem zur Stromversorgung) können jedoch deutlich größere Reparaturdauern realistisch sein. Bei der Berücksichtigung von Reparatur- und Wiederherstellungsmaßnahmen in einem PSA-Anlagenmodell müssen zudem Unsicherheiten insbesondere im Hinblick auf die unklaren Randbedingungen (erschwerter Zugang, Personalmangel) durch das langanhaltende Ereignis berücksichtigt werden. Eine Sensitivitätsanalyse, um die Auswirkungen der Reparaturdauern auf das Ergebnis der PSA festzustellen, ist deshalb erforderlich.

Tab. 3.9 Verwendete Reparaturdauern in einer Sicherheitsanalyse der Referenzanlage /KKW 12/

Komponente / System	Reparaturdauer	Referenz /KKW 12/
Gruppe eines erweiterten dynamischen Magnetkernsystems (EDM)	8 h (Betriebserfahrung); 20 h (konservativ)	S. 4.4-160
Leittechnische Komponenten	20 h	S. 4.4-189
Beckenkühlpumpe	3 h und 12 h (Betriebserfahrung); 10 h (Annahme)	S. 4.7-50
Redundanz der sekundärseitigen Wärmeabfuhr	2 h; 10 h (bei Betriebsstörungen)	S. 4.8-30
Not- und Nachkühlsystem	10 h (Mittelwert); 40 h (maximal)	S. 4.8-30

In Bezug auf das im Projekt untersuchte langandauernde Hochwasserereignis werden nun die Reparaturmöglichkeiten qualitativ am Beispiel der Stromversorgung diskutiert. In dem Ereignis wird der Ausfall der externen Stromversorgung angenommen. Die Stromversorgung wird daraufhin durch die Notstromerzeugeranlage 1 sichergestellt. Dieses System ist viersträngig aufgebaut, Ausfälle von einzelnen Komponenten, wie beispielsweise der Kraftstoffpumpe, können durch vorhandene Reserven ersetzt werden. Allerdings wird ein GVA des Systems, der zum kompletten Ausfall der Notstromerzeugeranlage 1 führt, als am wahrscheinlichsten erachtet. Im Falle der Nichtverfügbarkeit der Notstromerzeugeranlage 1 wird die Notstromerzeugeranlage 2 zur Stromversorgung verwendet. Deren Betrieb erfolgt so lange, bis die Funktionsfähigkeit der Notstromerzeugeranlage 1 wiederhergestellt ist. Somit gibt es folgende parallele Aufgaben, die zur Sicherstellung der Stromversorgung notwendig sind:

- Wiederherstellung der externen Stromversorgung, sobald dies die Randbedingungen zulassen,
- Reparatur von mindestens einem Aggregat der Notstromerzeugeranlage 1,
- Sicherstellung des dauerhaften Betriebs der Notstromerzeugeranlage 2 sowie
- Kraftstoffversorgung durch die ergänzenden Notfallmaßnahmen, die auf dem Anlagengelände Personal binden können.

Damit ist eine dauerhafte Verfügbarkeit der Notstromerzeugeranlagen 1 und 2 für die Sicherstellung der Stromversorgung von großer Bedeutung. Einfache Modelle zur Abschätzung der Verfügbarkeit eines Systems (die viersträngigen Standby-Systeme der Notstromerzeugeranlagen (z. B. aus /LEE 05/, Kap. 7.13.6) verdeutlichen die Wichtigkeit

- der Ausfallrate der parallelen Teilsysteme (z. B. eines Aggregates),
- der Reparaturdauer eines Teilsystems sowie
- der Anzahl der verfügbaren Reparaturteams.

Diese Faktoren werden jedoch in dem betrachteten langandauernden Ereignis von weiteren Faktoren, zusammengefasst in Tab. 3.10, beeinflusst, die allerdings weitgehend unbekannt sind. Die Bewertung der Reparaturmöglichkeiten unterliegt somit schwer zu quantifizierenden Unsicherheiten.

Tab. 3.10 Faktoren, die Einfluss auf die Zuverlässigkeit und die Reparaturmöglichkeit der Notstromerzeugeranlage haben können

Faktor	Möglicher Einfluss auf den Faktor
Ausfallraten	Die Ausfallraten wurden nicht unter entsprechenden Bedingungen des Langzeitbetriebs der Anlage ermittelt.
Reparaturdauer	Verfügbarkeit von Ressourcen (Materialien, Werkzeuge, Strom) unter Berücksichtigung der beschränkten Vorhaltung und Verzögerungen beim Transport
	Leistungsfähigkeit des Reparaturteams aufgrund verlängerter Arbeitszeiten und erhöhtem Stress (u. a. Erfolgszwang)
	Personalstärke eines Reparaturteams aufgrund einer eventuellen begrenzten Personalverfügbarkeit auf dem Anlagengelände bzw. durch spontane Personalausfälle
	Erschwerte Reparaturbedingungen aufgrund des Ereignisses (z. B. veränderte oder erschwerte Bewegungsmöglichkeiten)

Faktor	Möglicher Einfluss auf den Faktor
Anzahl der Reparaturteams	Verfügbarkeit von Personal mit entsprechenden Fähigkeiten auf dem Anlagengelände
	Weitere Aufgaben für das geeignete Personal

Weiterhin stellt sich die Frage, ob es kritische Zeitpunkte für Systemausfälle bzw. Kippunkte gibt, die zum Gesamtausfall der Stromversorgung führen können. Im Prinzip wird die Stromversorgung durch mehrere parallele Systeme (bestehend aus mehreren parallelen Teilsystemen) sichergestellt. Deshalb gibt es für einzelne Ausfälle keine kritischen Zeitpunkte. Allerdings kann der zeitnahe Ausfall mehrerer Systeme (z. B. der Ausfall mehrerer Aggregate der Notstromerzeugeranlage 2) kritisch werden, da nur begrenzt Personal und Ressourcen zu deren Reparatur zur Verfügung stehen. Hier wird betont, dass eventuell kausale Zusammenhänge zwischen den Ausfällen bestehen können. Mögliche Kippunkte bis zum Versagen der Stromversorgung bestehen somit in der zeitlichen Nähe mehrerer Ausfälle.

Aus diesen qualitativen Betrachtungen lassen sich somit organisatorische Maßnahmen zur Beeinflussung der Zuverlässigkeit der Notstromversorgung ableiten. Einige Beispiele sind in Tab. 3.11 dargestellt.

Tab. 3.11 Organisatorische Maßnahmen zur Erhöhung der Zuverlässigkeit der Stromversorgung bei einem langandauernden Hochwasserereignis

Faktor	Organisatorische Maßnahme
Ausfallrate	Überwachung der Systeme, wozu Personal benötigt wird und durch Randbedingungen beeinflusst werden kann
	Abwechselnder Betrieb von Redundanzen
Reparaturdauer	Frühzeitige Bereitstellung von Ressourcen
	Sicherstellung von ausreichend guten Arbeitsbedingungen (Beleuchtung, Sauberkeit etc.)
	Sicherstellung von ausreichend geeignetem Personal und dessen Arbeitsfähigkeit
Anzahl der Reparaturteams	Prioritätensetzung für parallele Aufgaben
	Personalorganisation (Zuordnung zu Aufgaben)

4 Quantifizierung des erweiterten PSA-Anlagenmodells und Ergebnisdiskussion

Nachfolgend wird das erweiterte PSA-Anlagenmodell, bezogen auf die langandauernde Einwirkung Hochwasser, quantifiziert. Eine Ermittlung von Häufigkeiten der resultierenden Schadenszustände, bezogen auf die durch die Einwirkung ausgelöste Transiente, wurde nicht durchgeführt, da die Ermittlung von Eintrittshäufigkeiten übergreifender Einwirkungen keine methodische Neu- oder Weiterentwicklung darstellt und somit nicht Aufgabe der vorliegenden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten war. Es wurden die entsprechenden bedingten Wahrscheinlichkeiten für Schadenszustände von Kern- und Brennstabschäden sowie für eine potenzielle Rekritikalität berechnet. Hierbei wurde mit der Wahrscheinlichkeit $p = 1$ angenommen, dass die jeweils untersuchte Einwirkung eingetreten ist. Somit können die Auswirkungen der übergreifenden Einwirkungen bzw. Einwirkungskombinationen auf die Zuverlässigkeit der Systemtechnik zur Verhinderung von Schadenszuständen ermittelt werden. Die ermittelten Ergebnisse für die bedingten Wahrscheinlichkeiten für Schadenszustände scheinen in vielen Fällen vergleichsweise hoch zu sein. Es ist dabei jedoch zu beachten, dass die Eintrittshäufigkeiten für die entsprechenden Einwirkungen zumeist sehr gering sind (z. B. Häufigkeit für ein auslegungsüberschreitendes Erdbeben $\leq 1 \text{ E-08/a}$).

Die ausgewiesenen Anteile am Gesamtergebnis (siehe Abschnitt 4.1) beziehen sich ausschließlich auf die Transienten als Folge der hier quantifizierten übergreifenden Einwirkungskombinationen. Ein Bezug zur Gesamt-PSA wird nicht hergestellt. Eine Aussage zum Anteil der untersuchten Fälle am Gesamtrisiko der Referenzanlage kann deshalb nicht abgeleitet werden.

4.1 Zusammenfassende Ergebnisdarstellung der Endzustände

Tab. 4.1 zeigt die Punktwerte und die Erwartungswerte aus der Unsicherheitsanalyse für die bedingten Wahrscheinlichkeiten für Schadenszustände am Reaktorkern, am Brennelement-Lagerbecken sowie für eine potenzielle Rekritikalität, bezogen auf die verschiedenen Flutdauern. Zudem werden der Erwartungswert und der K_{95} -Wert dargestellt. Der K_{95} -Wert ist das Verhältnis aus 95 %-Quantil und Median und gibt Hinweise auf die Streuung der bedingten Wahrscheinlichkeit.

Tab. 4.1 Bedingte Wahrscheinlichkeiten für Endzustände bei langandauerndem Hochwasser für die untersuchten Flutdauern

Flutdauer [d]	Bedingte Wahrscheinlichkeit für Kernschaden			Bedingte Wahrscheinlichkeit für Brennstabschaden			Bedingte Wahrscheinlichkeit für Rekritikalität		
	Punktwert	Erwartungs- wert	K ₉₅	Punktwert	Erwartungs- wert	K ₉₅	Punktwert	Erwartungs- wert	K ₉₅
0 – 2	8,15 E-03	8,07 E-03	8,5	7,32 E-03	7,03 E-03	3,7	1,81 E-04	1,83 E-04	4,3
2 – 4	1,19 E-02	1,19 E-02	7,8	1,05 E-02	1,12 E-02	3,2	2,11 E-04	2,15 E-04	4,6
4 – 8	1,24 E-02	1,22 E-02	6,5	1,05 E-02	9,98 E-03	3,4	2,11 E-04	2,03 E-04	4,7
8 – 12	1,30 E-02	1,30 E-02	7,0	1,05 E-02	1,02 E-02	3,3	2,11 E-04	2,25 E-04	4,7
12 – 18	2,60 E-02	2,67 E-02	4,2	1,05 E-02	1,04 E-02	3,2	2,11 E-04	2,09 E-04	4,4

Die Erwartungswerte für die bedingten Wahrscheinlichkeiten für Kernschadenszustände liegen demnach zwischen $8,0 \cdot 10^{-3}$ und $2,6 \cdot 10^{-2}$, je nach Flutdauer. Die Ergebnisse für Brennstabschäden liegen in etwa der gleichen Größenordnung (zwischen $7,03 \cdot 10^{-3}$ und $1,04 \cdot 10^{-2}$), die für Rekritikalität um etwa zwei Größenordnungen niedriger (von $1,83 \cdot 10^{-4}$ bis $2,09 \cdot 10^{-4}$). Man erkennt in allen Fällen eine deutliche Erhöhung der Ausfallwahrscheinlichkeiten ab einer Flutdauer von zwei Tagen. Eine weitere Erhöhung der Ergebnisse mit steigender Flutdauer lässt sich nur bei den Endzuständen mit Kernschaden feststellen. Die Punktwerte für Brennstabschaden und Rekritikalität ändern sich nicht mehr. Die Erhöhung der Ergebnisse nach zwei Tagen Flutdauer resultiert aus der Zuverlässigkeit für einen Personalwechsel, die nach ca. zwei Tagen signifikant abnimmt, danach aber weitgehend konstant bleibt. Eine erfolgreiche Personalversorgung wiederum ist von nicht zu vernachlässigendem Einfluss auf die Zuverlässigkeit der für die Störfallbeherrschung durchzuführenden Handmaßnahmen (vgl. Abschnitt 3.3.3.) Die Zuverlässigkeit der Dieselbeschaffung, die mit steigender Überflutungsdauer abnimmt, spielt hier keine Rolle, da Pfade mit Ausfall der Dieselbeschaffung zuerst zu einem Kernschaden führen. Die Erhöhung der Kernschadenshäufigkeit um den Faktor 2 zwischen den Intervallen 8 – 12 Tage und 12 – 18 Tage ist durch die um etwa einen Faktor 10 gestiegene Ausfallwahrscheinlichkeit für die Dieselbeschaffung (d. h. für den Ausfall der Dieselbeschaffung 8 – 12 Tage: $3,5 \cdot 10^{-2}$, für den Ausfall der Dieselbeschaffung 12 – 18 Tage: $4,6 \cdot 10^{-1}$) begründet.

Die Personalversorgung könnte aber auch kurzfristig mit einfachen Mitteln zumindest teilweise und zeitweise gewährleistet werden. Solche Maßnahmen wurden jedoch konservativ nicht in Betracht gezogen (siehe Diskussion in Abschnitt 2.5.6). Im Falle einer funktionierenden Personalversorgung aber mit ausgefallener Kraftstoffversorgung spielt die Systemfunktion 'langfristige Notstromversorgung D1 und D2 (NSVLANG)' eine größere Rolle bei der Bewertung des langanhaltenden Hochwasserereignisses. Ein Ausfall der Funktion NSVLANG kann dann nur noch durch die Notfallmaßnahmen 'sekundärseitiges bzw. primärseitiges Druckentlasten und Bespeisen' verhindert werden. Für beide Notfallmaßnahmen sind die Ausfallwahrscheinlichkeiten der notwendigen Handmaßnahmen durch die Sicherstellung des Personalwechsels nicht erhöht.

Einige relevante Minimalschnitte umfassen die Ausfälle von mehreren Handmaßnahmen. Dabei können Abhängigkeiten der Handmaßnahmen (z. B. gleiches Personal, zeitliche Nähe der Handlung) eine Rolle spielen. Solche Abhängigkeiten wurden hier zwar nicht im Detail untersucht, können aber mit folgender Feststellung eingeschränkt wer-

den: die meisten Maßnahmen sind zeitlich und örtlich getrennt und werden deswegen vermutlich von unterschiedlichem Personal durchgeführt (z. B. Nachspeisen der Deionatbecken, primärseitiges Druckentlasten und Bespeisen, Sekundärseitiges Druckentlasten und Bespeisen), weshalb in den meisten Fällen nach SPAR-H /NRC 05/ von einer geringen Abhängigkeit ausgegangen wird. Detailliertere Untersuchungen bezüglich der Abhängigkeit der Maßnahmen von der Personalverfügbarkeit sollten jedoch abseits dieser Methodenentwicklung bei der Berücksichtigung von langanhaltenden Ereignissen durchgeführt werden.

Kernschadenszustände

Das Ergebnis für Kernschaden wird für den Zeitraum von 0 bis 2 Tagen zu 84 % vom Ausfall der Handmaßnahmen für die Nachspeisung des Notspeisebeckens in Verbindung mit dem Ausfall der Notfallmaßnahmen 'PDE' und 'SDE' bei Ausfall des Personalwechsels bestimmt. Weitere 9 % Anteil am Ergebnis hat der GVA der Notspeisediesel in Verbindung mit dem Ausfall der Notfallmaßnahmen 'PDE' und 'SDE' bei Ausfall des Personalwechsels. Für den Zeitraum von 12 – 18 Tagen trägt der Ausfall der Dieselbeschaffung in Verbindung mit dem Aufbau der Netzanbindung und dem Ausfall der Notfallmaßnahmen 'PDE' und 'SDE' bei Ausfall des Personalwechsels mit 52 % zum Ergebnis bei. Weitere 39 % Anteil am Ergebnis haben die Ausfallkombinationen der Handmaßnahmen für die Nachspeisung des Notspeisebeckens in Verbindung mit dem Ausfall der Notfallmaßnahmen 'PDE' und 'SDE' bei Ausfall des Personalwechsels. Die Dieselbeschaffung spielt im Zeitraum von 0 – 2 Tagen keine Rolle, da die Anlage über einen Dieselvorrat für mindestens 3 Tage verfügt.

Die Anteile der einzelnen Ereignissequenzen am Ergebnis für eine kurze (0 – 2 Tage), eine mittlere (4 – 8 Tage) und eine lange Flutdauer (12 – 18 Tage) sind in Tab. 4.2 wiedergegeben und können auch in Abb. 3.2 nachvollzogen werden.

Das Ergebnis wird bei kurzen Überflutungsdauern zu fast 99 % von der Ereignissequenz Nr. 6 dominiert. In dieser Sequenz führt mit ca. 85 % der Ausfall der Handmaßnahmen für die Deionatnachspeisung in Verbindung mit den Ausfällen des Personalwechsels und der Notfallmaßnahmen 'PDE' und 'SDE' zum Kernschadenszustand. Weitere ca. 9 % werden vom Ausfall aller Notspeisediesel durch GVA in Verbindung mit den Ausfällen des Personalwechsels und der Notfallmaßnahmen 'PDE' und 'SDE' beigetragen. Mit steigender Überflutungsdauer nimmt der Anteil dieser Sequenz ab. Dafür steigt der Anteil der Sequenz Nr. 9 stark an, diese hat bei einer langen Flutdauer einen Anteil von

über 54 %. In dieser Sequenz hat der Ausfall der Dieselbeschaffung in Verbindung mit Ausfällen des Personalwechsels und der Notfallmaßnahmen 'PDE' und 'SDE' zum Kernschadenzustand einen Anteil von 94 %.

Tab. 4.2 Anteile der Ereignisabläufe am Ergebnis mit dem Endzustand 'Kernschaden' für Flutdauern von 0 bis 2, 4 bis 8 und 12 bis 18 Tagen

Flutdauer		0 – 2 Tage		4 – 8 Tage		12 –18 Tage	
Endzustand	Ereignis-ablauf	Häufig-keit	Anteil	Häufig-keit	Anteil	Häufig-keit	Anteil
Kernschaden	6	8,50 E-03	98,7 %	1,18 E-02	94,9 %	1,18 E-02	44,9 %
	9	3,26 E-05	0,4 %	5,06 E-04	4,1 %	1,43 E-02	54,4 %
	12	8,20 E-07	0,0 %	1,01 E-06	0,0 %	1,01 E-06	0,0 %
	17	6,20 E-06	0,1 %	8,85 E-06	0,1 %	8,85 E-06	0,0 %
	23	6,60 E-07	0,0 %	9,78 E-07	0,0 %	9,78 E-07	0,0 %
	26	6,43 E-05	0,7 %	9,46 E-05	0,8 %	9,46 E-05	0,4 %
	31	8,72 E-08	0,0 %	1,29 E-07	0,0 %	1,29 E-07	0,0 %
	34	9,16 E-06	0,1 %	1,34 E-05	0,1 %	1,34 E-05	0,1 %
	37	2,14 E-06	0,0 %	4,82 E-06	0,0 %	6,96 E-05	0,3 %
	Summe	8,62 E-03	100 %	1,24 E-02	100 %	2,63 E-02	100 %

Anzumerken ist in diesem Zusammenhang, dass die Ergebnissummen der bedingten Wahrscheinlichkeiten bei der Auswertung der Einzelsequenzen in der Regel größer sind als bei der Ermittlung mit einer Gesamtrechnung über alle Sequenzen. Bei den Einzelrechnungen werden nämlich auch Minimalschnitte mitgezählt, die bei der Gesamtrechnung nicht minimal sind und dort aussortiert werden.

Brennstabschadenzustände

Auffällig ist, dass das Ergebnis für Brennstabschäden etwa so groß ist, wie das für einen Kernschaden. Das liegt daran, dass die Funktion der Nachwärmeabfuhr aus dem Brennelement-Lagerbecken im Langzeitfall auf jeden Fall erforderlich ist. Deshalb führt der Ausfall dieser Funktion schon allein zum Schadenzustand. Das Ergebnis wird für den Zeitraum 0 – 2 Tage zu 89 % und für den Zeitraum 12 – 18 Tage zu 92 % bestimmt von:

- dem Ausfall der betrieblichen Beckenkühlung mit der Redundanz 2 durch Betriebsversagen der zugehörigen Notstromdiesel der Redundanzen 20 und 30,
- dem Ausfall der Handmaßnahmen zur Inbetriebnahme der Beckenkühlung mit den redundanten Strängen 10 und 40,
- der Notfallmaßnahmen zur externen Bespeisung des Brennelement-Lagerbeckens und
- dem Ausfall des Personalwechsels und der damit verursachten schlechteren Zuverlässigkeit der Handmaßnahmen.

Die Anteile der einzelnen Ereignissequenzen am Ergebnis für Flutdauern von 0 – 2 Tagen und von 4 – 8 Tagen sind in Tab. 4.3 wiedergegeben (siehe auch Abb. 3.2).

Das Ergebnis wird für beide ausgewerteten Flutdauern zu über 99 % von der Ereignissequenz Nr. 3 dominiert. In dieser Sequenz führt mit ca. 89 % der Ausfall der betrieblichen Beckenkühlung in Verbindung mit den Ausfällen des Personalwechsels und den Handmaßnahmen für die Inbetriebnahme der Beckenkühlung über Nachwärmeabfuhrsysteme und der Notfallmaßnahmen zur Beckennachspeisung. Bei erfolgreichem Personalwechsel trägt diese Ausfallkombination für weitere ca. 7 % zum Ergebnis bei. Insgesamt nehmen die bedingten Wahrscheinlichkeiten der Sequenzen mit steigender Flutdauer zu, die relativen Anteile am Ergebnis ändern sich jedoch nicht. Wie in Tab. 4.1 dargestellt, ändern sich die Ergebnisse mit weiter steigenden Flutdauern nicht mehr.

Tab. 4.3 Anteile der Ereignisabläufe am Ergebnis mit dem Endzustand ‘Brennstabschaden’ für eine Flutdauer von 0 bis 2 und 4 bis 8 Tagen

Flutdauer		0 – 2 Tage		4 – 8 Tage	
Endzustand	Ereignisablauf	Häufigkeit	Anteil	Häufigkeit	Anteil
Brennstabschaden	3	7,32 E-03	99,3 %	1,05 E-02	99,3 %
	14	3,42 E-05	0,5 %	4,90 E-05	0,5 %
	20	1,38 E-05	0,2 %	2,04 E-05	0,2 %
	28	1,84 E-06	0,0 %	2,70 E-06	0,0 %
	Summe	7,37 E-03	100 %	1,06 E-02	100 %

Rekritikalitätszustände

Der Endzustand 'Rekritikalität' wird ausschließlich in der Ereignissequenz 18 erreicht (siehe Tab. 4.4 und Abb. 3.2). Das Ergebnis für eine Rekritikalität wird im Zeitraum 0 – 2 Tage zu 38 % vom Ausfall des Frischdampfsammlers durch Offenbleiben eines FD-Sicherheitsventils in Verbindung mit dem Ausfall der Handmaßnahmen zum Aufborieren bei Ausfall des Personalwechsels bestimmt. Die gleichen Ausfallkombinationen tragen bei erfolgreichem Personalwechsel mit weiteren 15 % zum Ergebnis bei. Im Zeitraum 4 – 8 Tage erhöht sich der Wert bei Ausfall Personalwechsel auf 54 % während er sich bei erfolgreichem Personalwechsel auf 10 % verringert. Wie in Tab. 4.1 dargestellt, ändern sich die Ergebnisse mit weiter steigenden Flutdauern nicht mehr.

Tab. 4.4 Anteile der Ereignisabläufe am Ergebnis mit dem Endzustand 'Rekritikalität' für eine Flutdauer von 0 bis 2 und 4 bis 8 Tagen

Flutdauer		0 – 2 Tage		4 – 8 Tage	
Endzustand	Ereignisablauf	Häufigkeit	Anteil	Häufigkeit	Anteil
Rekritikalität	18	1,81 E-04	100 %	2,11 E-04	100 %

4.2 Nichtverfügbarkeit der Systemfunktionen

Nachfolgend sind in Tab. 4.5 die Gesamtnichtverfügbarkeiten der im Ereignisablauf verwendeten Systemfunktionen sowie deren Hauptbeiträge zur Nichtverfügbarkeit angegeben. Um den Einfluss der Flutdauern auf die Nichtverfügbarkeiten einordnen zu können, werden diese jeweils für eine kurze (0 – 2 Tage) und eine lange (12 – 18 Tage) Flutdauer angegeben.

Tab. 4.5 Nichtverfügbarkeiten der Systemfunktionen und deren Hauptbeiträge

Systemfunktion	Flutdauer [d]	Erwartungswert der Nichtverfügbarkeit	K ₉₅	Hauptbeiträge > 10 %
RESA	0 – 2	9,00 E 07	9,8	100 % Ersatzereignis für Ausfall RESA
	12 – 18	9,00 E-07	9,8	100 % Ersatzereignis für Ausfall RESA
Frischdampfsammler verfügbar	0 – 2	4,72 E-03	2,0	FD-Sicherheitsventil schließt nicht nach Öffnen (88 %)
	12 – 18	4,72 E-03	2,0	FD-Sicherheitsventil schließt nicht nach Öffnen (88 %)
Frischdampfabgabe bei ausgefallener Hauptwärmesenke	0 – 2	1,95 E-06	19,8	GVA der FD-Abblaseregelventile und der Magnetventile für FD-Sicherheitsventile (62 %) GVA der FD-Abblaseregelventile und der D-Sicherheitsventile (25 %)
	12 – 18	1,95 E-06	19,8	GVA der FD-Abblaseregelventile und der Magnetventile für FD-Sicherheitsventile (62 %) GVA der FD-Abblaseregelventile und der D-Sicherheitsventile (25 %)
Langfristige Notstromversorgung	0 – 2	7,54 E-05	5,6	GVA der Notstromdiesel und der Notspeisediesel (43 %)
	12 – 18	6,62 E-02	3,8	Ausfall Netzaufbau und Ausfall Dieselbeschaffung (98 %)
Dampferzeuger-Bespeisung über Not-speisesystem	0 – 2	3,17 E-02	9,8	Ausfall Handmaßnahmen für Nachspeisung der Notspeisebecken (78 %), GVA der Not-speisediesel (18 %)
	12 – 18	3,43 E-02	10,9	Ausfall Handmaßnahmen für Nachspeisung der Notspeisebecken (82 %), GVA der Not-speisediesel (15 %)
Dampferzeuger zugeordnete Bespeisung & Frischdampfabgabe	0 – 2	3,06 E-02	10,3	Ausfall Handmaßnahmen für Nachspeisung der Notspeisebecken (78 %), GVA der Not-speisediesel (18 %)
	12 – 18	3,59 E-02	11,3	Ausfall Handmaßnahmen für Nachspeisung der Notspeisebecken (82 %), GVA der Not-speisediesel (15 %)

Systemfunktion	Flutdauer [d]	Erwartungswert der Nichtverfügbarkeit	K ₉₅	Hauptbeiträge > 10 %
50 K/h–Abfahren	0 – 2	1,86 E 01	2,2	Ausfall Handmaßnahmen für Abfahren mit 50 K bei Ausfall Personalwechsel (70 %), Ausfall Handmaßnahmen für Abfahren mit 50 K mit Personalwechsel (30 %)
	12 – 18	2,46 E-01	2,1	Ausfall Handmaßnahmen für Abfahren mit 50 K bei Ausfall Personalwechsel (85 %), Ausfall Handmaßnahmen für Abfahren mit 50 K mit Personalwechsel (15 %)
Borierung bei primärseitigem Kaltfahren	0 – 2	2,60 E-02	31,0	Ausfall Handmaßnahmen für Borieren bei Ausfall Personalwechsel (68 %), Ausfall Handmaßnahmen für Borieren mit Personalwechsel (27 %)
	12 – 18	2,84 E-02	29,5	Ausfall Handmaßnahmen für Borieren bei Ausfall Personalwechsel (80 %), Ausfall Handmaßnahmen für Borieren mit Personalwechsel (17 %)
Druckabsenkung Primärseite	0 – 2	1,77 E-01	2,2	Ausfall von 2 Notstromdiesel (30 %),
	12 – 18	1,82 E-01	2,3	Ausfall von 2 Notstromdiesel (29 %), Ausfall Handmaßnahmen für Druckabsenken bei Ausfall Personalwechsel (13 %)
Primärseitige Nachwärmeabfuhr	0 – 2	1,20 E-03	4,9	Ausfall Handmaßnahmen für Nachwärmeabfuhr bei Ausfall Personalwechsel (60 %), Ausfall Handmaßnahmen für Nachwärmeabfuhr mit Personalwechsel (24 %)
	12 – 18	1,74 E-03	6,1	Ausfall Handmaßnahmen für Nachwärmeabfuhr bei Ausfall Personalwechsel (72 %), Ausfall Handmaßnahmen für Nachwärmeabfuhr mit Personalwechsel (15 %)
Nachwärmeabfuhr aus Brennelement-Lagerbecken	0 – 2	7,88 E-03	3,8	Ausfall der betrieblichen NWA über Redundanz 2 und Ausfall Handmaßnahmen für Nachwärmeabfuhr aus Brennelement-Lagerbecken bei Ausfall Personalwechsel (80 %) über redundante stränge und Ausfall der Notfallmaßnahme 'externe Beckenbespeisung' (89 %)
	12 – 18	1,03 E-02	3,4	Ausfall der betrieblichen NWA mit Redundanz 2 und Ausfall Handmaßnahmen für Nachwärmeabfuhr aus Brennelement-Lagerbecken bei Ausfall Personalwechsel (80 %) über redundante stränge und Ausfall der Notfallmaßnahme 'externe Beckenbespeisung' (92 %)

Systemfunktion	Flut- dauer [d]	Erwartungswert der Nichtverfüg- barkeit	K ₉₅	Hauptbeiträge > 10 %
Notfallmaßnahme sekundärseitiges Druckentlasten und Bespeisen	0 – 2	1,84 E-01	2,2	Ausfall Handmaßnahmen für SDE bei Ausfall Personalwechsel (80 %), Ausfall Handmaßnahmen für SDE mit Personalwechsel (17 %)
	12 – 18	2,39 E-01	2,1	Ausfall Handmaßnahmen für SDE bei Ausfall Personalwechsel (84 %), Ausfall Handmaßnahmen für SDE mit Personalwechsel (15 %)
Notfallmaßnahmen primärseitiges Druck- entlasten und Bespeisen	0 – 2	4,59 E-01	1,5	Ausfall Handmaßnahmen für SDE bei Ausfall Personalwechsel (73 %), Ausfall Handmaßnahmen für SDE mit Personalwechsel (36 %)
	12 – 18	5,61 E-01	1,5	Ausfall Handmaßnahmen für PDE bei Ausfall Personalwechsel (87 %), Ausfall Handmaßnahmen für SDE mit Personalwechsel (22 %)

4.3 Ergebnisunsicherheiten

Normalerweise sind die Häufigkeiten der auslösenden Ereignisse und die Zuverlässigkeitsdaten für die Systemkomponenten und die Handmaßnahmen nur ungenau bekannt. Die Kenntnisunsicherheit über diese Daten wird durch subjektive Wahrscheinlichkeitsverteilungen ausgedrückt. Für die in den vorausgehenden Abschnitten ausgewiesenen Erwartungswerte für die Ausfallwahrscheinlichkeiten der Systemfunktionen sowie für die bedingten Wahrscheinlichkeiten der Schadenszustände wurden mit den subjektiven Wahrscheinlichkeitsverteilungen der einzelnen Komponenten Unsicherheitsanalysen mit dem Programm RiskSpectrum® mittels Monte-Carlo-Simulationen mit jeweils 1.000 Spielen durchgeführt.

Als Ergebnis der Unsicherheitsanalysen sind für die quantifizierten Endzustände sowie für die Ausfallwahrscheinlichkeiten der Systemfunktionen in den Tabellen Tab. 4.1 und Tab. 4.5 die Erwartungswerte sowie die K95-Werte (Quotient aus 95 %-Fraktile und 50 %-Fraktile) angegeben. Je höher dieser Wert ist, desto höher ist die Unsicherheit des Ergebnisses.

Den Unsicherheitsanalysen liegen die bei den Punktwertrechnungen mit RiskSpectrum® ermittelten Minimalschnitte zugrunde.

Es ist anzumerken, dass die Ergebnisse der PSA mit weiteren Unsicherheiten verbunden sind, die in dieser Untersuchung nicht quantifiziert werden (z. B. Modellunsicherheiten) oder generell nicht quantifizierbar sind (z. B. die Unsicherheit darüber, ob unbekannte, aber möglicherweise relevante Phänomene übersehen wurden). Beispiele für hier im Rahmen der Methodenentwicklung nicht berücksichtigte Modellunsicherheiten können u. a. weitere denkbare, ergänzende Notfallmaßnahmen (z. B. spontane, technisch einfach umzusetzende Möglichkeiten für den Personalwechsel) sowie die Berücksichtigung von Reparaturmöglichkeiten sein. Die Vernachlässigung beider Phänomene ist allerdings konservativ. Für Reparaturmöglichkeiten werden ferner gänzlich unbekannte oder schwer zu bewertende Faktoren in Abschnitt 3.3.4 diskutiert.

Abb. 4.1 zeigt die aufsummierten kumulativen Wahrscheinlichkeitsverteilungen aus der Unsicherheitsanalyse für die bedingten Wahrscheinlichkeiten der Endzustände mit Kernschaden für die untersuchten Flutdauern. Auffällig sind die unterschiedlichen Steigungen der verschiedenen Kurven. Je flacher der Kurvenverlauf ist, desto „unsicherer“ ist das Ergebnis. Zum Beispiel liegt bei der Kurve für eine Flutdauer von 0 bis 2 Tagen zwischen

dem 5 %-Wert und dem 95 %-Wert der Faktor 158, bei der steilsten Kurve für die Flutdauer 12 – 18 Tage der Faktor 45. Ein Grund für die höhere Unsicherheit bei der Flutdauer 0 – 2 Tage liegt am wichtigen Beitrag der Handmaßnahmen zur Deionatnachspeisung 'OP-LAR-NACHSP_HWLAE', die einen relativ hohen Risikoerhöhungsfaktor von 17 und eine Sensitivität von 35 aufweisen (vgl. dazu Abb. 4.2 und Abb. 4.3). Die Versorgung mit Dieseltreibstoff ist in diesem Zeitintervall nicht relevant.

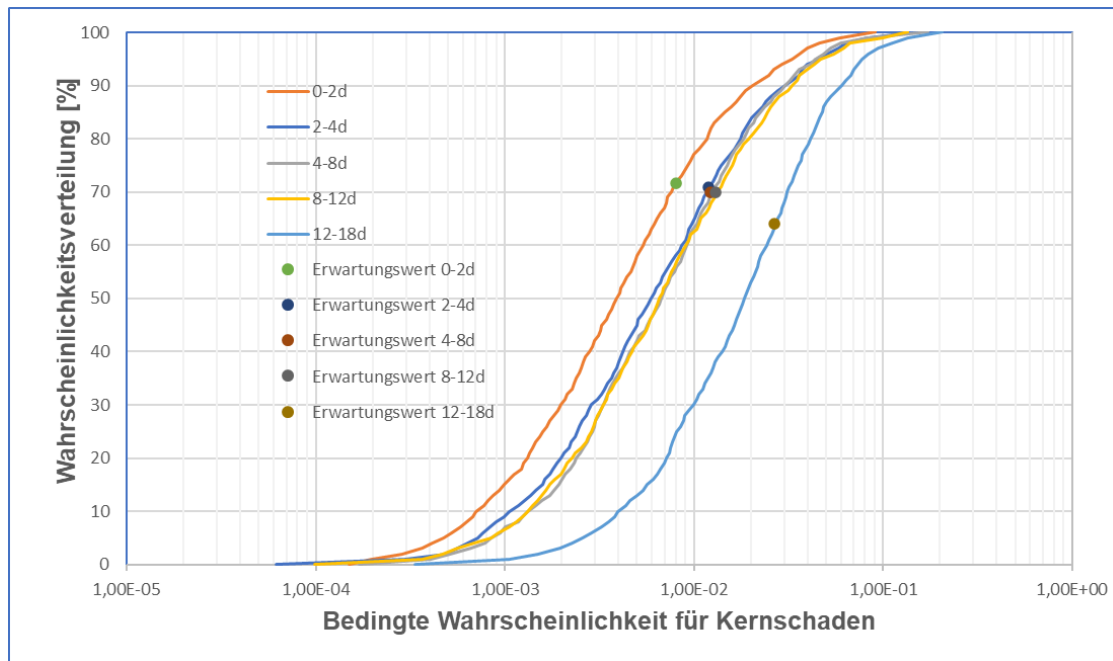


Abb. 4.1 Ergebnisse der Unsicherheitsanalyse, kumulative Verteilung der bedingten Wahrscheinlichkeit von Endzuständen mit Kernschaden bei unterschiedlichen Flutdauern

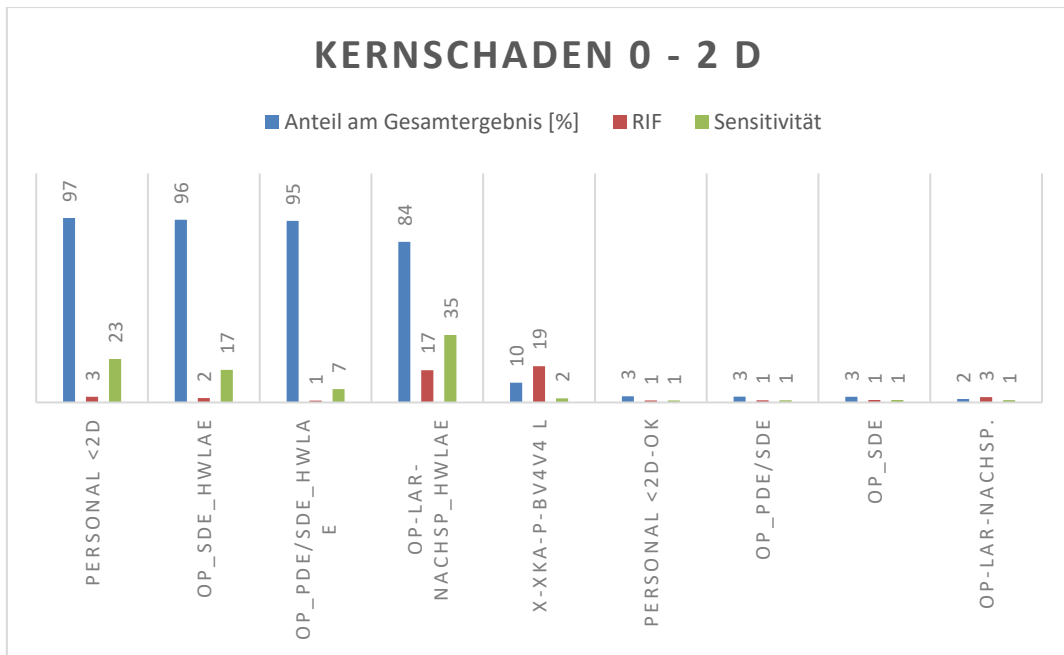


Abb. 4.2 Wichtigkeit und Sensitivitätswerte für Kernschadenzustände bei einer Flutdauer von 0 bis 2 Tagen

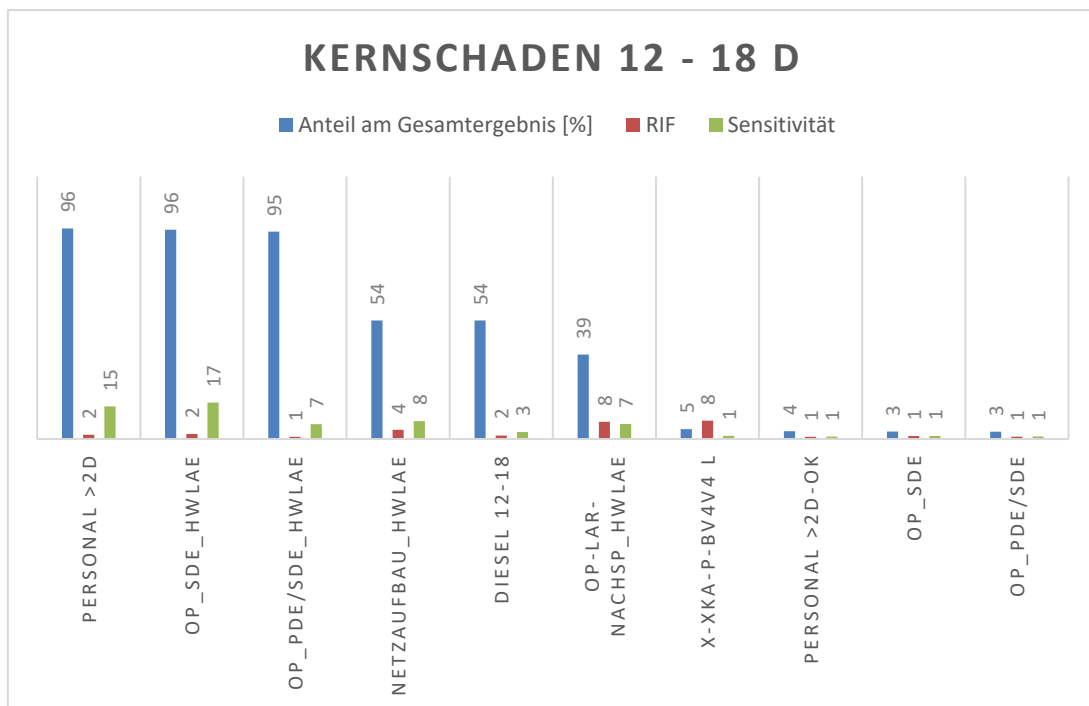


Abb. 4.3 Wichtigkeit und Sensitivitätswerte für Kernschadenzustände bei einer Flutdauer von 12 bis 18 Tagen

4.4 Importanz- und Sensitivitätsanalysen

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Importanz- und Sensitivitätsanalysen für die verschiedenen Endzustände bezogen auf die untersuchten Flutdauern diskutiert.

4.4.1 Endzustände mit Kernschaden

Die nachfolgende Tabelle Tab. 4.6 zeigt die Importanzen für Endzustände mit Kernschaden für die verschiedenen Überflutungsdauern. Das Ergebnis wird weitgehend konstant über die verschiedenen Flutdauern zu über 90 % bestimmt vom Ausfall des Personalwechsels in Verbindung mit den Ausfällen der Notfallmaßnahmen PDE und SDE. Ein weiterer wesentlicher Beitrag ist der Ausfall der Nachspeisung der Notspeisebecken mit Deionat, der aber mit steigender Flutdauer von ca. 84 % auf ca. 39 % abnimmt. Dagegen nimmt die Bedeutung der Ausfälle für den Netzaufbau und die Dieselversorgung signifikant mit steigender Flutdauer von ca. 14 auf ca. 55 % bzw. von 1,5 auf ca. 55 % zu.

Tab. 4.6 Fussel-Vesely-Importanzen der Basisereignisse (BEs) für Endzustände mit Kernschaden über die verschiedenen Flutdauern

Basisereignis	Flutdauer				
	0 – 2 d	2 – 4 d	4 – 8 d	8 – 12 d	12 – 18 d
PERSONAL <2D bzw. >2D	96,7 %	98,3 %	98,2 %	98,0 %	96,4 %
OP_SDE_HWLAE	95,9 %	97,4 %	97,3 %	97,2 %	95,8 %
OP_PDE/SDE_HWLAE	95,2 %	96,8 %	96,6 %	96,5 %	94,9 %
OP-LAR-NACHSP_HWLAE	84,3 %	85,7 %	82,5 %	78,6 %	39,3 %
X-XKA-P-BV4V4 L	10,5 %	10,1 %	9,7 %	9,3 %	4,6 %
NETZAUFBAU_HWLAE	–	–	14,4 %	8,4 %	54,9 %
DIESEL 4–8D, 8–12D bzw. 12–18D	–	–	1,5 %	8,4 %	54,9 %
PERSONAL <2D–OK bzw. >2D OK	3,3 %	1,7 %	51,0 %	2,0 %	3,7 %
OP_PDE/SDE	3,1 %	1,6 %	25,0 %	1,9 %	3,5 %
OP_SDE	3,0 %	1,6 %	8,3 %	1,9 %	3,5 %

4.4.2 Endzustände mit Brennstabschaden

Die nachfolgende Tab. 4.7 zeigt die Importanzen für Endzustände mit Brennstabschaden für die verschiedenen Überflutungsdauern. Das Ergebnis wird zu über 90 % bestimmt vom Ausfall der betrieblichen Beckenkühlung in Verbindung mit den Ausfällen der Handmaßnahmen zur Wiederherstellung der Wärmeabfuhr bzw. des Nachspeisens sowie des Personalwechsels. Diese Anteile ändern sich mit steigender Flutdauer nur unwesentlich.

Tab. 4.7 Fussel-Vesely-Importanzen der Basisereignisse für Endzustände mit Brennstabschaden über die verschiedenen Flutdauern

Basisereignis	Flutdauer				
	0 – 2 d	2 – 4 d	4 – 8 d	8 – 12 d	12 – 18 d
XKA20-BV-BEK	96,8 %	96,8 %	identisch mit 2 – 4 d		
PERSONAL <2D	92,5 %	96,0 %			
OP-BECKEN-NSP-HWLAE	92,5 %	96,0 %			
OP-NWA-BECKEN_HWLAE	92,3 %	95,8 %			
PERSONAL <2D–OK	7,6 %	4,0 %			
OP-BECKEN-NSP	7,6 %	4,0 %			
OP-NWA-BECKEN	7,5 %	4,0 %			
FAK20AP001-STN	1,2 %	1,2 %			
KAA20AA007-SN	0,6 %	0,6 %			
FAK20AP001-BV-BE	0,5 %	0,5 %			

4.4.3 Endzustände mit Rekritikalität

Die nachfolgende Tab. 4.8 zeigt die Fussel-Vesely-Importanzen für Endzustände mit Rekritikalität für die verschiedenen Überflutungsdauern. Das Ergebnis wird zu ca. 42 % bis 54 % vom Ausfall des Personalwechsels in Verbindung mit dem Ausfall des Borierens bestimmt. Dieser Anteil nimmt mit steigender Flutdauer zu. Im Gegenzug nimmt der Anteil des Ausfalls Borieren bei erfolgreiche Personalwechsel entsprechend von ca. 17 % auf 11 % ab. Der Anteil durch den Ausfall des Sammlers (LBA11-41AA001-SNNÖ) bleibt mit ca. 21 % konstant, da dieser Ausfall nicht zeitabhängig ist.

Tab. 4.8 Fussel-Vesely-Importanzen der Basisereignisse für Endzustände mit Rekri-
tikalität über die verschiedenen Flutdauern

Basisereignis	Flutdauer				
	0 – 2 d	2 – 4 d	4 – 8 d	8 – 12 d	12 – 18 d
PERSONAL <2D	42,7 %	54,4 %	identisch mit 2 – 4 d		
OP_BORIER_HWLAE	42,7 %	54,4 %			
LBA31AA001-SNNÖ	21,0 %	21,2 %			
LBA11AA001-SNNÖ	21,0 %	21,2 %			
LBA41AA001-SNNÖ	21,0 %	21,2 %			
LBA21AA001-SNNÖ	21,0 %	21,2 %			
OP_BORIEREN	17,3 %	11,3 %			
PERSONAL <2D-OK	17,3 %	11,3 %			
X-XKA-P-BV134 L	7,1 %	6,1 %			
X-XKA-P-BV234 L	7,1 %	6,1 %			

5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Probabilistische Sicherheitsanalysen sind entsprechend dem geltenden Regelwerk für deutsche Kernkraftwerke /BMU 15/ zum einen alle zehn Jahre im Rahmen der regelmäßigen Sicherheitsüberprüfungen, zum anderen aber auch anlassbezogen durchzuführen. Bei den Sicherheitsüberprüfungen sind anlageninterne auslösende Ereignisse sowie ausgewählte übergreifende Einwirkungen von innen und außen für den Leistungsbetrieb zu analysieren. Ereignisse in der jüngeren Vergangenheit (insbesondere die aus einer Einwirkungskombination resultierenden Reaktorunfälle von Fukushima Daiichi) haben zudem die Relevanz von Ereignissen und Ereigniskombinationen aus übergreifenden Einwirkungen mit lang andauernden Einwirkungen für die Häufigkeit von Schadenszuständen von Brennelementen im Reaktordruckbehälter oder im Brennelement-Lagerbecken, insbesondere auch während Anlagenbetriebszuständen des Nichtleistungsbetriebs aufgezeigt. Diese wurden in der Vergangenheit nicht systematisch in der PSA-Modellierung berücksichtigt.

Das übergeordnete Ziel des Arbeitspakets AP 1 im Vorhaben 4718R01500 bestand demzufolge darin, solche methodischen Erweiterungen in Bezug auf Risikoanalysen für langandauernde Ereignisse vorzunehmen. Weiterhin sollten basierend auf bereits in den Vorhaben 4715R01575, RS1539 und RS1556 erfolgten Weiterentwicklungen die methodischen Ansätze für eine probabilistische Sicherheitsanalyse für übergreifende Einwirkungen und Einwirkungskombinationen auch für langandauernde Ereignisse systematisch vervollständigt werden.

Die erweiterte und vervollständigte Methodik wurde exemplarisch anhand des probabilistischen Anlagenmodells für ein Referenzkernkraftwerk erprobt. Dabei kamen konservative Annahmen, insbesondere der Anlagenzustand 'unterkritisch, heiß' der Referenzanlage in Kombination mit einem Notstromfall, zur Anwendung.

Dazu wurden in erster Linie ergänzende Notfallmaßnahmen zur Sicherstellung der Personal- und Kraftstoffversorgung entwickelt und in das PSA-Anlagenmodell der Stufe 1 integriert. Die Analysen zeigen, dass die Sicherstellung der Personalversorgung einen deutlich größeren Beitrag für den Erfolg bei dem betrachteten langanhaltenden Hochwasser leistet als die Sicherstellung der Kraftstoffversorgung. Dabei wurden auch die Auswirkungen kurzfristiger, nicht vorgeplanter Möglichkeiten zur Personalversorgung diskutiert.

Der Ausfall rechtzeitiger Personalversorgung führt zu einer Erhöhung der Ausfallwahrscheinlichkeiten von Handmaßnahmen durch übermüdetes Personal. Die hierfür abgeleiteten Wahrscheinlichkeiten sind zum Teil größer als 0,1. Damit wird das in RiskSpectrum® verwendete Näherungsverfahren zur Berechnung der Wahrscheinlichkeiten von Minimalschnitten ungenau, bleibt jedoch konservativ. Sofern erforderlich, sollten genauere Analysen mit der rechenaufwändigeren DeMorgan-Methode durchgeführt werden.

Weiterhin konnte in den hier durchgeführten Untersuchungen festgestellt werden, dass aufgrund der erhöhten Ausfallwahrscheinlichkeit von Handmaßnahmen (bei Ausfall der Personalversorgung) zahlreiche Minimalschnitte, die mehrere Handmaßnahmen beinhalten, signifikant zum Ergebnis beitragen. Elemente, die in einem Minimalschnitt vorkommen, müssen voneinander unabhängig sein. Anderenfalls wäre das Ergebnis des Minimalschnittes unterschätzt (zu klein). Ob die betreffenden Handmaßnahmen unabhängig voneinander sind, wurde im Rahmen der in diesem Forschungs- und Entwicklungsvorhaben erfolgten Methodenentwicklung nicht im Detail untersucht. Für PSA-Studien ist es jedoch notwendig, dass Abhängigkeiten von Handmaßnahmen detailliert im Hinblick auf maßnahmenübergreifende Effekte betrachtet werden.

In dieser Untersuchung wurde der Fokus auf die ergänzenden Notfallmaßnahmen gelegt. Dabei wurden folgende Aspekte offengelassen, die an anderer Stelle (z. B. /GEO 14/) bereits betrachtet wurden:

- Erhöhte Ausfallraten von Komponenten, z. B. der Notstromerzeuger, durch mögliche lange Betriebsdauern bei langanhaltenden Ereignissen wurden nicht berücksichtigt. Die längeren Laufzeiten wurden durch entsprechende Verlängerung der Missionszeiten im Zuverlässigkeitsmodell der entsprechenden Komponenten berücksichtigt (siehe unten).
- Reparaturmöglichkeiten von Komponenten und deren zahlreiche beeinflussende Faktoren wurden nicht quantitativ betrachtet. Es werden jedoch nur geringe Auswirkungen auf die Endergebnisse erwartet, da Handmaßnahmen die Hauptbeiträge zu Ereignissequenzen liefern;
- Die Missionszeit wurde auf 100 h festgesetzt, da in RiskSpectrum® zeitliche Abläufe nur eingeschränkt modelliert werden können.

Diese Aspekte wurden vornehmlich in Abschnitt 3.3.4 diskutiert und sollten bei weiteren Arbeiten zu langanhaltenden Ereignissen einbezogen werden.

Insbesondere bei langandauernden Ereignissen und unter Berücksichtigung ergänzender Notfallmaßnahmen spielen zeitliche Aspekte eine nicht unerhebliche Rolle. Beispielsweise hängt bei einem hier betrachteten langandauernden Hochwasser der Erfolg der ergänzenden Notfallmaßnahmen stark von der Anstiegsgeschwindigkeit des Wassers, der Einleitung der ergänzenden Notfallmaßnahmen sowie den Vorlaufzeiten für die Luftbrücke bzw. den Fährbetrieb ab (siehe Abschnitt 3.1.2). In diesem Zusammenhang wäre eine Anwendung von Methoden der dynamischen PSA hilfreich, z. B. der von der GRS entwickelten MCDET (*Monte Carlo Dynamic Event Tree*), da mittels dieser sowohl die Dauer des langandauernden Ereignisses, z. B. bei der Versagenswahrscheinlichkeit von Komponenten, als auch Reparaturzeiten, Zeitspannen für die Wiederherstellung der externen Stromversorgung sowie ein zeitabhängiger Ausfall der ergänzenden Notfallmaßnahmen berücksichtigt werden könnten. Weiterhin lässt sich mittels Methoden der dynamischen PSA der unterschiedliche Kraftstoffbedarf der unterschiedlichen Notstromerzeugungsanlagen (einschließlich der mobilen Netzersatzanlagen) im Detail in den Analysen berücksichtigen.

Es ist in RiskSpectrum® nur indirekt möglich, variierende Flutdauern in einer Gesamtrechnung zu berücksichtigen. Hierfür müsste für jede Flutdauer ein eigener Ereignisbaum aufgestellt werden, der mit den entsprechenden Fehlerbäumen mit spezifischen Daten für die jeweilige Randbedingung verknüpft wird. Wegen des hohen Modellierungsaufwandes wurde bisher auf diese Möglichkeit verzichtet. Eine Weiterentwicklung der von der GRS entwickelten Analysewerkzeuge (u. a. pyRiskRobot) könnte den Aufwand zukünftig reduzieren und so die Analyse langandauernder Ereignisse insbesondere infolge übergreifender Einwirkungen verbessern.

Literaturverzeichnis

- /BAB 03/ Babst, S., et al.: Sicherheitstechnische Bedeutung von Zuständen bei Nicht-Leistungsbetrieb eines DWR, GRS-A-3114, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, 2003.
- /BER 16/ Berner, C., R. Flage: Strengthening quantitative risk assessments by systematic treatment of uncertain assumptions, Reliability Engineering and System Safety, Volume 151, S. 46-59, Juli 2016, <https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.10.009>.
- /BFG 20/ Bundesanstalt für Gewässerkunde (bfg): Hochwasserstände: Durchflussverlauf, https://www.bafg.de/DE/Home/homepage_node.html, zuletzt abgerufen am 12.05.2020.
- /BHB 17/ Betriebshandbuch (BHB) der Referenzanlage: Warten- und Schichtordnung, 2017.
- /BHB 19/ Betriebshandbuch (BHB) der Referenzanlage: Maßnahme zur Sicherung der Anlage gegen Hochwasser, 2019.
- /BHB 19a/ Betriebshandbuch (BHB) der Referenzanlage: Betriebsordnung – Brandschutzordnung, 2019.
- /BHB 20/ Betriebshandbuch (BHB) der Referenzanlage: Erdbeben, 2020.
- /BMU 05/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsüberprüfung für Kernkraftwerke gemäß § 19a des Atomgesetzes – Leitfaden Probabilistische Sicherheitsanalyse, 31. Januar 2005, Bekanntmachung vom 30. August 2005, Bundesanzeiger, Jahrgang 57, Nummer 207a, ISSN 0720–6100, 3. November 2005, https://www.base.bund.de/SharedDocs/Downloads/BASE/DE/rsh/3-bmub/3_74_3.pdf?__blob=publicationFile&v=1.

- /BMU 15/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke, Bekanntmachung vom 3. März 2015, BAnz AT 30.02.2015 B2, https://www.base.bund.de/SharedDocs/Downloads/BASE/DE/rsh/3-bmub/3_0_1.html.
- /BMU 17/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): Abgeschlossener Aktionsplan zur Umsetzung von Maßnahmen nach dem Reaktorunfall in Fukushima, Bonn, Dezember 2017, https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Nukleare_Sicherheit/aktionsplan_fukushima_bf.pdf.
- /DBT 20/ Deutscher Bundestag: Unterrichtung durch den Wehrbeauftragten – Jahresbericht 2019, Drucksache 19/16500, Berlin, 28.01.2020.
- /DIN 11/ Deutsches Institut für Normung (DIN): DIN EN 1998–1/NA:2011–01, Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbau, Berlin, 2011, <https://www.beuth.de/en/standard/din-en-1998-1-na/137097066>, zuletzt abgerufen am 02.08.2021.
- /EC 17/ Europäische Kommission (EC): Advanced Safety Assessment Methodologies: extended PSA (ASAMPSA-E): Report 2 – Guidance document on practices to model and implement external flooding hazards in extended PSA, 2017, <http://asampsa.eu/wp-content/uploads/2017/03/ASAMPSA-E-D50.16-REPORT2-PSAFLOODING.pdf>, zuletzt abgerufen am 28.06.2021.
- /ENS 15/ Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI): Fukushima Daiichi – Menschliche und organisatorische Faktoren – Teil 1, Brugg, Schweiz, 2015, https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2015/12/Fukushima_Mensch_Organisation_t1.

- /FAK 05/ Facharbeitskreis (FAK) Probabilistische Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke: Methoden zur probabilistischen Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke, Stand: August 2005, BfS-SCHR-37/05, Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), Salzgitter, Oktober 2005, https://doris.bfs.de/jspui/bitstream/urn:nbn:de:0221-201011243824/1/BfS_2005_SCHR-37_05.pdf.
- /FAK 05a/ Facharbeitskreis (FAK) Probabilistische Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke: Daten zur Quantifizierung von Ereignisablaufdiagrammen und Fehlerbäumen, Stand: August 2005, BfS-SCHR-38/05, Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), Salzgitter, Oktober 2005, https://doris.bfs.de/jspui/bitstream/urn:nbn:de:0221-201011243838/1/BfS_2005_SCHR-38_05.pdf.
- /FAK 16/ Facharbeitskreis (FAK) Probabilistische Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke: Methoden und Daten zur probabilistischen Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke, Stand: Mai 2015, BfS-SCHR-61/16, Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), Salzgitter, September 2016, <https://doris.bfs.de/jspui/bitstream/urn:nbn:de:0221-2016091314090/3/BfS-SCHR-61-16.pdf>.
- /FAK 18/ Facharbeitskreis (FAK) Probabilistische Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke: Methoden und Beispiele für die probabilistische Bewertung sicherheitsrelevanter Fragestellungen außerhalb der SÜ, Stand: Mai 2015, BfE-SCHR-03/18, Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), Salzgitter, Januar 2018, https://doris.bfs.de/jspui/bitstream/urn:nbn:de:0221-2018013014519/3/BfE-SCHR-03-18_FAK%20PSA.pdf.
- /GAE 15/ Gänssmantel, G., et al.: Generische Erkenntnisse aus den anlagenbezogenen Auswertungen von im Rahmen der SÜ erstellten PSA, GRS-A-3801, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln, April 2015.

- /GEO 14/ Georgescu, G., et al.: PSA modeling of long-term accident sequences, in: Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) Nuclear Energy Agency (NEA), Committee on the Safety of Nuclear Installations (CSNI): Probabilistic Safety Assessment of Natural External Hazards Including Earthquakes, Workshop Proceedings, NEA/CSNI/R(2014)9, Paris, Juli 2014, https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_19518/psa-of-natural-external-hazards-including-earth-quakeworkshop-proceedings.
- /GRS 01/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Bewertung des Unfallrisikos fortschrittlicher Druckwasserreaktoren in Deutschland, Methoden und Ergebnisse einer umfassenden Probabilistischen Sicherheitsanalyse (PSA), GRS-175, ISBN 3-931995-43-7, Köln, Oktober 2001.
- /GRS 16/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Fukushima Daiichi 11. März 2011, Unfallablauf | Radiologische Folgen, 5. Auflage, GRS-S-56, ISBN 978-3-944161-86-0, Köln, 2016, <https://www.grs.de/publikation/grs-s-56>.
- /GRU 96/ Grünthal, G., C. Bosse: Probabilistische Karte der Erdbebengefährdung der Bundesrepublik Deutschland – Erdbebenzonierungskarte für das Nationale Anwendungsdokument zum Eurocode 8: Forschungsbericht (Scientific Technical Report) 96/10, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam, 1996, https://gfzpublic.gfz-potsdam.de/pubman/item/item_227011.
- /HAG 21/ Hage, M., G. Mayer, M. Röwekamp: Vorgehen bei Erweiterungen einer Site-Level PSA bis hin zur Stufe 2, GRS-637, ISBN 978-949088-26-1, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln, Juli 2021, <https://www.grs.de/publikationen/grs-637>.

- /IAE 10/ 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, STI/PUB/1430, ISBN 978-92-0-114509-3, Vienna, Austria, April 2010, https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1430_web.pdf.
- /IAE 10a/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Development and Application of Level 2 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants, Specific Safety Guide, IAEA Safety Standards Series No. SSG-4, STI/PUB/1443, ISBN 978-92-0-102210-3, Wien, 2010, https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1443_web.pdf.
- /IAE 11/ International Atomic Energy Agency (IAEA): A Framework for an Integrated Risk Informed Decision-Making Process, A report by the International Nuclear Safety Group, INSAG–25, Wien, 2011, https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1499_web.pdf.
- /IAE 17/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Incident Reporting System (IRS), Wien, <https://websso.iaea.org/login/>, zuletzt abgerufen am 28.02.2017.
- /IAE 21/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Protection against Internal Hazards in the Design of Nuclear Power Plants, Specific Safety Guide, IAEA Safety Standards Series No. SSG-64, Wien, im Druck, 2021.
- /KKW 09/ Kernkraftwerksbetreiber der Referenzanlage: Sicherheitsstatusanalyse für die Referenzanlage, 2009.
- /KKW 09a/ Kernkraftwerksbetreiber der Referenzanlage: Sicherheitsüberprüfung der Referenzanlage, Probabilistische Sicherheitsanalyse, Externe Ereignisse für den Leistungsbetrieb, 2009.

- /KKW 11/ Kernkraftwerksbetreiber der Referenzanlage: Sicherheitsüberprüfung europäischer Kernkraftwerke vor dem Hintergrund des schweren Erdbebens und Tsunamis in Japan am 11. März 2011 [Europäischer Stress-test] – Standortbericht des Betreibers für die Referenzanlage – Abschlussbericht, 2011.
- /KKW 11a/ Kernkraftwerksbetreiber der Referenzanlage: Anlagenspezifische Sicherheitsüberprüfung europäischer Kernkraftwerke vor dem Hintergrund des schweren Erdbebens und Tsunamis in Japan am 11. März 2011 – Beantwortung der Fragenliste zur Sicherheitsüberprüfung [RSK-SÜ] für die Referenzanlage, 2011.
- /KKW 11b/ Kernkraftwerksbetreiber der Referenzanlage: Sicherheitsüberprüfung europäischer Kernkraftwerke vor dem Hintergrund des schweren Erdbebens und Tsunamis in Japan am 11. März 2011 [Europäischer Stress-test] – Standortbericht des Anlagenbetreibers – Abschlussbericht, 2011.
- /KKW 11c/ Kernkraftwerksbetreiber der Referenzanlage: Bericht zur RSK-SÜ – Beantwortung der Fragenliste zur Sicherheitsüberprüfung (RSK-SÜ) für die Referenzanlage, 2011.
- /KKW 12/ Kernkraftwerksbetreiber der Referenzanlage: Sicherheitsüberprüfung für die Referenzanlage 1998 – 2008, Kapitel 4 – Probabilistische Sicherheitsanalyse – 4.1 Leistungsbetrieb (LB), 2012.
- /KKW 12a/ Kernkraftwerksbetreiber der Referenzanlage: Sicherheitsüberprüfung für die Referenzanlage 1998 – 2008, Kapitel 4 – Probabilistische Sicherheitsanalyse – 4.4 Erdbeben, 2012.
- /KKW 12b/ Kernkraftwerksbetreiber der Referenzanlage: Referenzanlage – Revisionsbericht, 2012.
- /KKW 19/ Kernkraftwerksbetreiber der Referenzanlage: Notfallhandbuch Referenzanlage, 2019.
- /KKW 20/ Kernkraftwerksbetreiber der Referenzanlage: Stilllegung und Abbau von Anlagen (Internetseite), abgerufen am 5.06.2020.

- /KTA 11/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA): Sicherheitstechnische Regel des KTA: KTA 2201.1 – Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen, Teil 1: Grundsätze, Fassung 2011–11, November 2011, http://www.kta-gs.de/d/regeln/2200/2201_1_r_2011_11.pdf.
- /KTA 14/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA): Sicherheitstechnische Regel des KTA: KTA 3702 – Notstromerzeugungsanlagen mit Dieselaggregaten in Kernkraftwerken, Fassung 2014–11, November 2014, http://www.kta-gs.de/d/regeln/3700/3702_r_2014_11.pdf.
- /KTA 15/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA): Sicherheitstechnische Regel des KTA: KTA 2101.1 – Brandschutz in Kernkraftwerken, Teil 1: Grundsätze des Brandschutzes, Fassung 2015–11, November 2015, http://www.kta-gs.de/d/regeln/2100/2101_1_r_2015_11.pdf.
- /KTA 15a/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA): Sicherheitstechnische Regel des KTA: KTA 2103, Explosionsschutz in Kernkraftwerken mit Leichtwasserreaktoren (allgemeine und fallbezogene Anforderungen, Fassung 2015–11, November 2015, http://www.kta-gs.de/d/regeln/2100/2103_r_2015_11_ber.pdf.
- /KTA 15b/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA): Sicherheitstechnische Regel des KTA: KTA 3501, Reaktorschutzsystem und Überwachungseinrichtungen des Sicherheitssystems, Fassung 2015–11, November 2015, http://www.kta-gs.de/d/regeln/3500/3501_r_2015_11.pdf
- /KWU 81/ Kraftwerk Union Aktiengesellschaft (KWU): Sicherheitsbericht der Referenzanlage, Erlangen, März 1981.
- /LEE 05/ Lees' Loss Prevention in the Process Industries, Third Edition, Dr. Sam Nannan (Ed.), ISBN: 0 -7506 -7555 -1, Elsevier Butterworth Heinemann, Amsterdam, Niederlande, 2005.
- /LGR 20/ Regierungspräsidium Freiburg, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB): LGRB-Kartenviewer, https://maps.lgrb-bw.de/?app=lgrb&view=lgrb_uek350_erdbebenv, abgerufen am 09.09.2020.

- /LR 20/ Lloyd's Register (LR): RiskSpectrum, Risk and Reliability Software, <https://www.lr.org/en/riskspectrum/>.
- /LUB 20/ Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW): Hochwasservorhersagezentrale Baden-Württemberg: HVZ-Pegelkarte (Pegel der Referenzanlage), <https://www.hvz.baden-wuerttemberg.de>, zuletzt abgerufen am 12.05.2020.
- /MAY 20/ Mayer, G., et al.: Vervollständigung von Methoden für PSA der Stufe 1 für Ereignisse und Ereigniskombinationen übergreifender Einwirkungen / Completion of Methods for Level 1 PSA for Hazards and Hazard Combinations, Technischer Bericht/Technical Report, GRS-A-4012, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln, Oktober 2020.
- /NEA 13/ Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) Nuclear Energy Agency (NEA) Committee on the Safety of Nuclear Installations (CSNI): Use and Development of Probabilistic Safety Assessment – An Overview of the Situation at the End of 2010, NEA/CSNI/R(2012)11, Paris, Januar 2013, [http://search.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=NEA/CSNI/R\(2012\)11&docLanguage=En](http://search.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=NEA/CSNI/R(2012)11&docLanguage=En).
- /NEA 14/ Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) Nuclear Energy Agency (NEA) Committee on the Safety of Nuclear Installations (CSNI): PSA of Natural External Hazards Including Earthquake, Workshop Proceedings, Prague, Czech Republic, 17–20 June 2013, NEA/CSNI/R(2014)9, Paris, Juli 2014, <https://www.oecd-nea.org/nsd/docs/2014/csni-r2014-9.pdf>.
- /NEA 15/ Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) Nuclear Energy Agency (NEA), Committee on the Safety of Nuclear Installations (CSNI) Working Group on Risk Assessment (WGRISK): Proceedings of International Workshop on Fire PRA, NEA/CSNI/R(2015)12, Paris, August 2015, <https://www.oecd-nea.org/nsd/docs/2015/csni-r2015-12.pdf>.

- /NEA 21/ Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) Nuclear Energy Agency (NEA), Committee on the Safety of Nuclear Installations (CSNI) Working Group on Risk Assessment (WGRISK): Human Reliability Analysis in External Events PSA — Survey of Methods and Practice, Task Report, Paris, in Vorbereitung, 2021.
- /NEA 21a/ Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) Nuclear Energy Agency (NEA), Committee on the Safety of Nuclear Installations (CSNI). March 2021. OECD/NEA FIRE Database, Version 2019:01. Paris, Mai 2021 (limited to FIRE Database Project member countries only).
- /NRC 01/ U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC): Risk Methods Insights Gained from Fire Incidents, NUREG/CR-6738, SAND2001-1676P, Washington; DC, USA, September 2001, <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/contract/cr6738/index.html>.
- /NRC 05/ U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC): The SPAR-H Human Reliability Analysis Method, NUREG/CR-6883, INL/EXT-05-00509, Washington; DC, USA, August 2005, <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/contract/cr6883/index.html>.
- /PES 95/ Peschke, J.: Methoden zur Gewinnung von Verteilungen für Zuverlässigkeitskenngrößen aus Vorinformation und anlagenspezifischer Betriebserfahrung, GRS-A-2220, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Garching, Januar 1995.
- /ROE 17/ Roewekamp, M., S. Sperbeck, M. Tuerschmann: Development of a Library Based Tool for Screening External Hazards and Hazard Combinations, Journal of Polish Safety and Reliability Association Summer Safety and Reliability Seminars, Volume 8, Number 1–2, 2017, <http://jpsra.am.gdynia.pl/wp-content/uploads/2017/06/JPSRA2017-v8-n1-11-Rowekamp.pdf>.

- /ROE 17a/ Roewekamp, 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 17b/ Roewekamp, M., S. Sperbeck, G. Gänssmantel, G.: Screening Approach for Systematically Considering Hazards and Hazards Combinations in PRA for a Nuclear Power Plant Site, in: Proceedings of ANS PSA 2017 International Topical Meeting on Probabilistic Safety Assessment and Analysis, Pittsburgh, PA, September 24–28, 2017, on CD-ROM, American Nuclear Society, LaGrange Park, IL, USA, 2017.
- /ROE 18/ Roewekamp, M., et al.: Probabilistische Risikoanalysen der Stufe 1 für Standorte mit mehreren kerntechnischen Anlagen, GRS-A-3935, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln, September 2018.
- /ROE 18a/ Roewekamp, M., et al.: Risk Analysis of External Hydrological Hazards with Flooding Potential for a German Nuclear Reference Site, Journal of Polish Safety and Reliability Association Summer Safety and Reliability Seminars, Volume 9, Number 3, 2018,
<http://jpsra.am.gdynia.pl/wp-content/uploads/2018/09/JPSRA2018-VOL9-NO3-paper8.pdf>.
- /ROE 21/ Röwekamp, M., et al.: The OECD/NEA FIRE Database: an update, Special Report, Nuclear Power Plant Fire Events, Nuclear Engineering International (NEI), April 2021, S. 26-30, London, Großbritannien, 2021, www.neimagazine.com.
- /RSK 11/ Reaktorsicherheitskommission (RSK): Anlagenspezifische Sicherheitsüberprüfung (RSK-SÜ) deutscher Kernkraftwerke unter Berücksichtigung der Ereignisse in Fukushima-I (Japan), RSK-Information, RSK-Stellungnahme, 11. – 14.05.2011 (437. RSK-Sitzung), Bonn, 16.05.2011.

- /SCH 75/ Schneider, G., Referenzanlage, Auslegung gegen Erdbeben, Institut für Geophysik der Universität Stuttgart an den Kernkraftwerksbetreiber der Referenzanlage, 11.12.1975.
- /SPE 18/ Sperbeck, S., et al.: Informationstool Hazards Library – Analysehilfsmittel zur Bereitstellung von Informationen und Daten zur systematischen Durchführung von PSA für übergreifende Einwirkungen GRS-A-3914, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln, März 2018.
- /STA 14/ Statista GmbH: Anzahl der Hubschrauber und Kampffjets der Bundeswehr nach Einsatzbereitschaft im Jahr 2014 (Internetseite), <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/348897/umfrage/hubschrauber-und-kampffjets-der-bundeswehr-nach-einsatzbereitschaft/>, zuletzt abgerufen am 15.06.2020.
- /STR 20/ Strack, C., 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.
- /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.
- /TEP 08/ Tokyo Electric Power Company (TEPCO): Lessons learned at Kashiwazaki-Kariwa NPP hit by the strong earthquake on July 16, 2007, in: Proceedings of ANS PSA 2008 International Topical Meeting on Probabilistic Safety Assessment and Analysis, Knoxville, TN, USA; September 7-11, 2008, ISBN 9781615670086, Curran Associates Inc., Red Hook, NY, USA, August 2009.
- /TRI 75/ Trifunac, M. D., A. G. Brady: On the correlation of seismic intensity scales with the peaks of recorded strong motions, Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 65, No. 1, Februar 1975.

- /UTS 19/ Utschick, M., et al.: Methodological Approach for a Hydrological Hazards PSA for a Multi-Unit Multi-Source Site, Paper 27162, 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.
- /WIE 17/ Wielenberg, A., et al.: Methodology for Selecting Initiating Events and Hazards for Consideration in an Extended PSA, Technical report ASAMPSA-E / WP30/D30.7/2017-31 volume 2, Reference IRSN PSN-RES/SAG/2017-00017, Advanced Safety Assessment Methodologies: Extended PSA (ASAMPSA_E), European Commission, Petten, Niederlande, 2017, <http://asampsa.eu>.
- /WIK 20/ Wikipedia, die freie Enzyklopädie, https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_von_Erdbeben_in_Deutschland, zuletzt abgerufen: 20. Mai 2020.

Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
ATWS	anticipated transient without scram
BE	Basisereignis (Englisch: basic event)
BHB	Betriebshandbuch
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
CCI	Englisch: common cause initiator; einleitende gemeinsame Ursache
CDF	Kernschadenshäufigkeit (Englisch: core damage frequency)
CDP	(bedingte) Kernschadenswahrscheinlichkeit (Englisch: core damage probability)
CSNI	Committee on the Safety of Nuclear Installations
CWS	Englisch: circulating water system
DE	Dampferzeuger
DH	Druckhalter
DWD	Deutscher Wetterdienst
DWR	Druckwasserreaktor
EC	Europäische Kommission (Englisch: European Commission)
EDM	Erweitertes dynamisches Magnetkernsystem
ENSI	Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat
EVA	Einwirkung von außen
EVI	Einwirkung von innen
FAK	Facharbeitskreis
FD	Frischdampf
FDF	Brennstabschadenshäufigkeit (Englisch: fuel damage frequency)
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH
GVA	gemeinsam verursachter Ausfall

HEAF	Hochenergetisches Versagen durch Störlichtbogen (Englisch: High Energy Arcing Fault))
HEP	human error probability
IAEA	International Atomic Energy Agency
IE	auslösendes Ereignis (Englisch: initiating event)
KatS-Stab	Katastrophenschutzstab
KHG	Kerntechnischer Hilfsdienst GmbH
LB	Leistungsbetrieb
LdA	Leiter der Anlage
LUBW	Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg
NEA	Nuclear Energy Agency
NFM	Notfallmaßnahme
NHB	Notfallhandbuch
NLB	Nichtleistungsbetrieb
NWA	Nachwärmeabfuhr
OECD	Organisation for Economic Cooperation and Development
PDE	primärseitiges Druckentlasten und Bespeisen
PSA	Probabilistische Sicherheitsanalyse
PSA	performance shaping factor
RDB	Reaktordruckbehälter
RESA	Reaktorschnellabschaltung
RP	Regierungspräsidium
SB	Sicherheitsbehälter
SBO	Station Blackout
SDE	sekundärseitiges Druckentlasten und Bespeisen
SSC	bauliche Anlagenteile, Systeme und Komponenten (Englisch: structures, systems, and components)
SWR	Siedewasserreaktor
SÜ	Sicherheitsüberprüfung

THW	Technisches Hilfswerk
TUSA	Turbinenschnellabschaltung
üNN	über Normal-Null
WGRISK	Working Group on Risk Assessment

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Schematische Darstellung des qualitativen und quantitativen Screeningverfahrens für übergreifende Einwirkungen und Einwirkungskombinationen /MAY 20/.....	15
Abb. 2.2	HST – vom Ersteller der Analyse eingegebene Begründung für den Ausschluss einer Einwirkung im qualitativen Screening	17
Abb. 2.3	HST – Beispielhafte Begründung für einen Ausschluss einer Einwirkung im quantitativen Screening	18
Abb. 2.4	HST – beispielhafte Begründung für den Ausschluss von Kombinationen kausal abhängiger Einwirkungen von der weiteren Betrachtung.....	19
Abb. 2.5	Schematische Skizze des Referenzkraftwerksblocks und seiner direkten Umgebung.....	27
Abb. 2.6	Hochwasserverläufe von beobachtetem (grün) und angenommenem Hochwasser (orange); bei gleicher Durchflussdifferenz dQ sind auch die Dauern dT etwa gleich und unabhängig vom Spitzendurchfluss.....	49
Abb. 2.7	Beobachtete Dauern aus Tab. 2.11 und modellierte, qualitative Häufigkeitsverteilungen von Überflutungsdauern $\Delta T_{FD} = p(\Omega)$ aus vier Verteilungstypen.....	50
Abb. 2.8	Verlauf der Überflutungshöhe zum relativen Zeitpunkt t (dimensionslose Zeitangabe relativ zur gesamten Überflutungsdauer	51
Abb. 2.9	Ereignisbaum für ein langandauerndes Hochwasser, bei dem ggf. ein Personal- bzw. Kraftstofftransport über die ergänzenden Notfallmaßnahmen ‘Versorgung über Luftbrücke’ und ‘Versorgung über Fährbetrieb’ sicherzustellen ist	73
Abb. 2.10	Erdbebengefährdungskarte /GRU 96/.....	82
Abb. 2.11	Geographischer Ausschnitt der Erdbebenereignisse seit 1994 in der Nähe (ca. 130 km) des Standorts der Referenzanlage /LGR 20/.....	83
Abb. 2.12	Graphische Auswertung der Erdbebenereignisse in der Region des Standorts der Referenzanlage /LGR 20/	84
Abb. 3.1	Anzahl der verfügbaren CH-53 und Amphibie M3 für deren Einsatz in der Luftbrücke und des Fährbetriebs	103
Abb. 3.2	Ereignisbaum für langandauerndes Hochwasser.....	116
Abb. 3.3	Definition von Exchange Events in den Fehlerbäumen.....	118

Abb. 3.4	Beispiel eines Fehlerbaums für die Verknüpfung von Personalwechsel und Handmaßnahmen	119
Abb. 4.1	Ergebnisse der Unsicherheitsanalyse, kumulative Verteilung der bedingten Wahrscheinlichkeit von Endzuständen mit Kernschaden bei unterschiedlichen Flutdauern	136
Abb. 4.2	Importanz und Sensitivitätswerte für Kernschadenzustände bei einer Flutdauer von 0 bis 2 Tagen	137
Abb. 4.3	Importanz und Sensitivitätswerte für Kernschadenzustände bei einer Flutdauer von 12 bis 18 Tagen	137

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Schutz von Gebäuden vor Hochwasser	29
Tab. 2.2	Maßnahmen bei Hochwasser laut Betriebshandbuch der Referenzanlage	30
Tab. 2.3	Für die Notnackkühlkette erforderliche Systeme in der Referenzanlage	30
Tab. 2.4	Gegen ein Bemessungserdbeben ausgelegte SSC /KKW 20/.....	32
Tab. 2.5	Vergleich von Erdbebenintensität und -magnitude	33
Tab. 2.6	Automatische Maßnahmen bei der naturbedingten Einwirkung von außen 'Erdbeben' /KKW 20/.....	34
Tab. 2.7	Vorgesehene Handmaßnahmen bei Erdbeben /BHB 20/	34
Tab. 2.8	Erforderliche Systemfunktionen zur Beherrschung eines Bemessungserdbebens /KKW 11b/	36
Tab. 2.9	Notfallmaßnahmen und -einrichtungen /KKW 11c/	37
Tab. 2.10	Zehn größte Hochwasserereignisse am Pegel der Referenzanlage (visuelle Ablesung der Daten, Unsicherheit ca. +1 Tag /BFG 20/).....	45
Tab. 2.11	Hochwasserkennwerte für einen Vergleichspegel am Kraftwerksstandort	46
Tab. 2.12	Wattiefen von Personen (Annahme für normale Bewegung; für wichtige Aufgaben aus /KKW 11a/, S. 101 und für Fahrzeuge u. a. entnommen aus allgemeinen Fahrzeugbeschreibungen im Internet)	52
Tab. 2.13	Zusammenfassung des Ereignisverlaufes Hochwasser.....	56
Tab. 2.14	Benötigte Ressourcen für den Betrieb der Notstromerzeugeranlage 1.....	59
Tab. 2.15	Erforderliche Ressourcen und maximale Überflutungshöhe, bis zu der die Versorgung noch möglich ist	61
Tab. 2.16	Auswahl möglicher Einsatzschwerpunkte während des angenommenen Hochwasserereignisses	62
Tab. 2.17	Angenommene Dauern der einzelnen Phasen während eines Transportes von Personen und Kraftstoff (Außenbehälter) über die Luftbrücke	65

Tab. 2.18	Angenommene zeitliche Organisation des Personalwechsels (je eine Stunde An- und Abtransport) und des Kraftstofftransportes (vor allem Diesel) mit Kraftstoffbehälter über die Luftbrücke mit dem Hubschrauber CH-53	66
Tab. 2.19	Angenommene Dauer der einzelnen Phasen während eines Transportes von Personen und Kraftstoff (im Container) über den Fährbetrieb	68
Tab. 2.20	Angenommene zeitliche Organisation des Personalwechsels (1 h Antransport, 1 h Abtransport) und des Kraftstofftransportes (vor allem Diesel) über den Fährbetrieb mit der Amphibie M3	68
Tab. 2.21	Ausfallwahrscheinlichkeiten p für die alternativen Versorgungswege	69
Tab. 2.22	Übersicht zu alternativen Versorgungswegen für Personalwechsel von 135 Personen und Kraftstofftransport für die Notstromerzeugeranlagen 1 und 2	72
Tab. 2.23	Einstufung unterschiedlicher gemachter Annahmen anhand ihrer zugrundeliegenden Wissensbasis /BER 16/	79
Tab. 2.24	Die zehn stärksten Erdbeben nahe dem Standort der Referenzanlage /LGR 20/, /KWU 81/ und /WIK 20/ (*Intensität wurde nach Tab. 2.5 abgeschätzt)	83
Tab. 2.25	Erfahrungsberichte weltweit – grundlegende Informationen	85
Tab. 2.26	Erfahrungsberichte weltweit – Auswirkungen	86
Tab. 3.1	Zusammenfassung der Faktoren mit Einfluss auf die erfolgreiche Versorgung der Referenzanlage mit Kraftstoff und Personal	96
Tab. 3.2	Angepasste Modelle der in Abschnitt 2.5.5 diskutierten Faktoren zur Untersuchung der zugrundeliegenden Annahmen	98
Tab. 3.3	Ausfallwahrscheinlichkeit des Personalwechsels p_{PW} über die gesamte Ereignisdauer	99
Tab. 3.4	Ausfallwahrscheinlichkeit der Kraftstoffversorgung p_{KSV} über die gesamte Ereignisdauer	100
Tab. 3.5	Mittels Monte-Carlo-Simulation berechnete bedingte Ausfallwahrscheinlichkeiten auf Anforderung bei einem langandauernden Hochwasser für die Personal-, Kraftstoff- und (frühzeitige) externe Stromversorgung	102

Tab. 3.6	Zusammenhang zwischen der Hochwasserdauer und der Ausfallwahrscheinlichkeiten der Personalversorgung und der Kraftstoffversorgung unter Verwendung der Standardmodelle	103
Tab. 3.7	Spearman's Korrelationskoeffizient der relevanten Faktoren mit Einfluss auf die Personal- und Kraftstoffversorgung sowie die externe Stromversorgung.....	104
Tab. 3.8	Anpassung der Ausfallwahrscheinlichkeiten für die relevanten menschliche Handlungsfehler (HEP) beim Ausfall der rechtzeitigen Personalversorgung (Basiselement PERSONAL_HWLAE)	106
Tab. 3.9	Verwendete Reparaturdauern in einer Sicherheitsanalyse der Referenzanlage /KKW 12/	121
Tab. 3.10	Faktoren, die Einfluss auf die Zuverlässigkeit und die Reparaturmöglichkeit der Notstromerzeugeranlage haben können.....	122
Tab. 3.11	Organisatorische Maßnahmen zur Erhöhung der Zuverlässigkeit der Stromversorgung bei einem langandauernden Hochwasserereignis	123
Tab. 4.1	Bedingte Wahrscheinlichkeiten für Endzustände bei langandauerndem Hochwasser für die untersuchten Flutdauern.....	126
Tab. 4.2	Anteile der Ereignisabläufe am Ergebnis mit dem Endzustand 'Kernschaden' für Flutdauern von 0 bis 2, 4 bis 8 und 12 bis 18 Tagen	129
Tab. 4.3	Anteile der Ereignisabläufe am Ergebnis mit dem Endzustand 'Brennstabschaden' für eine Flutdauer von 0 bis 2 und 4 bis 8 Tagen ...	130
Tab. 4.4	Anteile der Ereignisabläufe am Ergebnis mit dem Endzustand 'Rekritikalität' für eine Flutdauer von 0 bis 2 und 4 bis 8 Tagen.....	131
Tab. 4.5	Nichtverfügbarkeiten der Systemfunktionen und deren Hauptbeiträge...	132
Tab. 4.6	Fussel-Vesely-Importanzen der Basisereignisse (BEs) für Endzustände mit Kernschaden über die verschiedenen Flutdauern.....	138
Tab. 4.7	Fussel-Vesely-Importanzen der Basisereignisse für Endzustände mit Brennstabschaden über die verschiedenen Flutdauern.....	139
Tab. 4.8	Fussel-Vesely-Importanzen der Basisereignisse für Endzustände mit Rekritikalität über die verschiedenen Flutdauern	140

**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 978-3-949088-39-1