

# Ressortforschungsberichte zur kerntechnischen Sicherheit und zum Strahlenschutz

Methodische Ansätze zur Durchführung einer standortspezifischen PSA zu den Auswirkungen übergreifender Einwirkungen – Vorhaben 3612R01550

Auftragnehmer:  
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln

M. Türschmann  
S. Sperbeck  
W. Frey

Das Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) und im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) durchgeführt.



Bundesamt für Strahlenschutz

Dieser Band enthält einen Ergebnisbericht eines vom Bundesamt für Strahlenschutz im Rahmen der Ressortforschung des BMUB (UFOPLAN) in Auftrag gegebenen Untersuchungsvorhabens. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autoren. Das BfS übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung ganz oder teilweise vervielfältigt werden.

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

**BfS-RESFOR-118/16**

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:  
**urn:nbn:de:0221-2016120914205**

Salzgitter, Dezember 2016

**Methodische Ansätze  
zur Durchführung einer  
standortspezifischen PSA  
zu den Auswirkungen  
übergreifender  
Einwirkungen**

Michael Türschmann  
Silvio Sperbeck  
Walter Frey

August 2015  
Auftrags-Nr.:  
843000

**Anmerkung:**

Dieser Bericht ist von der GRS im Auftrag des BMUB im Rahmen des Vorhabens 3612R01550 erstellt worden. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung zitiert, ganz oder teilweise vervielfältigt werden bzw. Dritten zugänglich gemacht werden.

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



## Kurzfassung

Ziel des vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) geförderten Vorhabens 3612R01550 ist die Entwicklung einer Vorgehensweise zur systematischen Berücksichtigung von Abhängigkeiten bei Ereigniskombinationen übergreifender Einwirkungen bei der probabilistischen Modellierung.

Das Kernstück des vorliegenden Berichts besteht in der Beschreibung des grundsätzlichen Vorgehens bei der Durchführung einer standortspezifischen PSA der Stufe 1 für ein Kernkraftwerk unter Einbeziehung aller Risiken, die durch übergreifende Einwirkungen von innen und außen hervorgerufen werden.

Der erste Arbeitsschritt dieser Vorgehensweise beinhaltet die Festlegung derjenigen übergreifenden Einwirkungen, die an dem zu analysierenden Kraftwerksstandort auftreten können. Dazu wurden alle bekannten übergreifenden Einwirkungen und deren Kombinationen zusammengestellt. Auf der Grundlage dieser Zusammenstellung generischer übergreifender Einwirkungen kann mittels eines Auswahlverfahrens unter Einbeziehung von behördlichen Vorgaben und Erkenntnissen aus Standortbegehungen eine Liste der für den Standort zu bewertenden übergreifenden Einwirkungen begründet abgeleitet werden.

Alle am Standort zu betrachtenden übergreifenden Einwirkungen sind in Bezug auf die notwendige Tiefe der probabilistischen Untersuchungen zu klassifizieren in übergreifende Einwirkungen, deren Risikobeitrag vernachlässigbar ist, in übergreifende Einwirkungen, für die aufgrund des nachgewiesenen geringen Risikobeitrags eine quantitative Grobabschätzung ausreichend ist, sowie in übergreifende Einwirkungen, die im Detail probabilistisch zu analysieren sind.

Für die erforderlichen Detailanalysen wird auf der Grundlage eines vorhandenen PSA-Anlagenmodells der Stufe 1 ein systematisches Vorgehen vorgeschlagen. Dazu werden Listen erstellt, die alle baulichen Strukturen, Systeme und Komponenten enthalten, welche durch die entsprechende übergreifende Einwirkung in ihrer Funktionsweise beeinträchtigt werden können, wobei diese Beeinträchtigung zur Risikoerhöhung beiträgt. Dabei enthält eine Liste die einzelnen Einrichtungen und Ausrüstungen und eine weitere die Ausfallabhängigkeiten, die aufgrund der übergreifende Einwirkung zu berücksichtigen sind.

Zusätzlich zu dem allgemein beschriebenen Vorgehen bei der Durchführung standort-spezifischer PSA wird der Frage der Modellierung von Abhängigkeiten im Ausfallverhalten der Einrichtungen eines Kernkraftwerks durch die übergreifenden Einwirkungen nachgegangen. Es wird ein allgemeines Abhängigkeitsmodell konstruiert und gezeigt, wie die erkannten Abhängigkeiten in die Fehlerbaummodellierung übernommen werden können.

Zum besseren Verständnis der abgeleiteten methodischen Herangehensweisen sind mehrere Beispiele aufgeführt.

## **Abstract**

Main objective of the project 3612R01550 performed on behalf of the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety (BMUB) is the development of an approach for systematic consideration of dependencies in case of internal and external hazards and their combinations in the probabilistic plant model for nuclear power plants.

One of the major aspects of a site specific Level 1 PSA carried out for a nuclear power plant outlined in this report is taking comprehensively into account the entire risks resulting from internal and external hazards.

In a first step, all the hazards which may occur at the site under investigation have to be identified. This requires a compilation of the potential hazards and their possible combinations: Based on this compilation of generic hazards a site specific list of hazards to be considered in the analysis can be derived based on a screening process taking into account regulatory requirements and insights from site and plant walk-downs.

In a second step, the hazards to be considered for the specific site have to be classified with respect to the depth of the probabilistic analyses to be carried out. This classification covers three categories: hazards with a negligible contribution to the overall risk, hazards with such a low risk contribution that a rough quantitative assessment is sufficient, and hazards which need in-depth probabilistic analysis.

Based on the available Level 1 PSA model for internal events, a systematic approach for in-depth probabilistic analyses of hazards and their combinations is proposed. In this context, lists of those structures, systems and components, which can be impaired in their required function resulting in a risk increase, are provided. One of these lists contains the equipment, the other one the dependencies to be considered for the corresponding hazard.

In addition to the general approach for performing site specific PSA, a procedure for modelling dependencies in the behaviour of structures, systems and components of a nuclear power plant according to failures caused by hazards has been developed. A

generic dependency model has been built and it can be shown how the dependencies identified can be modelled in the fault trees.

Some examples are given for a better understanding of the methodological approach derived.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Durchführung einer standortspezifischen PSA zu den Folgen übergreifender Einwirkungen (HPSA) .....</b>	<b>5</b>
2.1	Durchführung einer standortspezifischen HPSA .....	8
2.1.1	Aufgabenstellung .....	10
2.1.2	Annahmen und Voraussetzungen .....	10
2.1.3	Vorgehen .....	11
2.1.4	HPSA bei Mehrblock-Standorten .....	16
2.2	Standortspezifische Klassifikation übergreifender Einwirkungen .....	19
2.2.1	Generische übergreifende Einwirkungen – die Liste $L_{gen}$ .....	20
2.2.1.1	Einzelne übergreifende Einwirkungen .....	22
2.2.1.2	Kombinationen übergreifender Einwirkungen .....	40
2.2.1.3	Die Liste $L_{gen}$ – Stand der Arbeiten und Ausblick .....	52
2.2.2	Standortspezifische übergreifende Einwirkungen – die Liste $L_{ges}$ .....	53
2.2.2.1	Allgemeine Regeln zur Klassifikation der Einwirkungen aus $L_{ges}$ .....	56
2.2.2.2	Beispiele zur Klassifikation der Einwirkungen aus $L_{ges}$ .....	59
2.3	PSA für übergreifende Einwirkungen aus der Liste $L_{Detail}$ .....	62
2.3.1	Auslösende Ereignisse infolge übergreifender Einwirkungen .....	62
2.3.2	Systematische Modellerweiterung mit den Listen $H-EL$ und $H-DL$ .....	68
2.3.2.1	Allgemeines .....	70
2.3.2.2	Aufstellung der Liste $H-EL$ .....	71
2.3.2.3	Aufstellung der Liste $H-DL$ .....	78
2.3.2.4	Aufstellung der Listen $S-EL$ und $S-DL$ bei seismischen Einwirkungen ....	79
2.3.2.5	Aufstellung der Listen $F-EL$ und $F-DL$ bei Brandanalysen .....	85
2.3.2.6	Anwendung des Vorgehens bei der Bewertung biologischer Phänomene .....	88
2.3.2.7	Anwendung des Vorgehens bei der Bewertung der Einwirkung „anlagenexterne Überflutung“ .....	95

<b>3</b>	<b>Modellierung von Abhängigkeiten bei PSA für übergreifende Einwirkungen .....</b>	<b>99</b>
3.1	Das allgemeine Abhängigkeitsmodell .....	99
3.1.1	Fehlerbaummodellierung von Abhängigkeiten .....	100
3.1.2	Das Abhängigkeitsmodell $\{M, A, C\}$ .....	103
3.1.3	Beispiele zum Abhängigkeitsmodell.....	104
3.1.3.1	GVA-Modellierung mit dem Kopplungsmodell.....	104
3.1.3.2	Modellierung mit dem Betafaktor-Modell.....	105
3.1.3.3	Ausfall eines Hilfssystems .....	107
3.1.3.4	Korrelation von Ausfällen bei seismischen Einwirkungen.....	108
3.1.3.5	Abhängigkeiten bei seismischen Einwirkungen.....	114
3.2	Erdbeben und Folgeereignis Brand .....	114
3.2.1	Allgemeines Vorgehen.....	114
3.2.2	Identifikation von Räumen mit erdbebenbedingter Brandgefahr .....	118
3.2.3	Quantitative Bewertung erdbebenbedingter Brände.....	124
<b>4</b>	<b>Aspekte der Quantifizierung von Erdbeben-PSA .....</b>	<b>129</b>
4.1	Rechentechnische Hilfsmittel.....	130
4.2	Datenbank zur Bereitstellung seismischer Eingabedaten.....	135
4.2.1	Allgemeine Datenbankanforderungen zur Unterstützung von SPSA.....	135
4.2.2	Fragilities von BSK .....	137
4.2.2.1	Eingabe von Fragilities.....	139
4.2.2.2	Nutzung der Daten für anlagenspezifische PSA .....	141
4.2.2.3	Nutzung der Fragilities zur Bewertung der seismischen Widerstandsfähigkeit von BSK.....	143
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>147</b>
<b>6</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>149</b>
<b>7</b>	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>165</b>

<b>8</b>	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>167</b>
<b>9</b>	<b>Abkürzungen und Begriffe.....</b>	<b>169</b>
<b>A</b>	<b>Aufarbeitung des Standes von Wissenschaft und Technik.....</b>	<b>183</b>
A.1	Literaturauswertungen zur Durchführung von HPSA.....	183
A.2	Stand von Wissenschaft und Technik .....	198
<b>B</b>	<b>Beispiele.....</b>	<b>203</b>
B.1	Einfaches Beispiel .....	203
B.2.1	Durchführung einer Brand-PSA .....	216
B.2.2	Modellierung seismischer Abhängigkeiten in deutschen SPSA.....	223
<b>C</b>	<b>Abbildungsverzeichnis (Anhänge) .....</b>	<b>231</b>
<b>D</b>	<b>Tabellenverzeichnis (Anhänge) .....</b>	<b>233</b>

# 1 Einführung

Im Rahmen des Vorhabens 3612R01550 des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) wurden Arbeiten zur Modellierung von Ereigniskombinationen übergreifender Einwirkungen von innen und außen in probabilistischen Sicherheitsanalysen (PSA) durchgeführt.

Zum Beginn des Vorhabens im Jahre 2012 wurde eine Reihe internationaler Aktivitäten zur Aufarbeitung der Ereignisse in den Reaktoranlagen von Fukushima Dai-ichi initiiert. Im Rahmen dieses Vorhabens wurden dazu mehrere Beiträge erarbeitet /SPE 13/, /TUE 13/, /TUE 14/. Dabei stellte sich heraus, dass die Entwicklung einer standardisierten Herangehensweise bei der Durchführung standortspezifischer PSA für Ereignisse aus übergreifenden Einwirkungen unter Einbeziehung von Abhängigkeiten auf allen Modellierungsebenen erforderlich ist. International existieren dazu verschiedene Ansätze, aber noch kein durchgängiges Konzept. Im Vorhaben 3612R01550 wurde ein derartiges Konzept erarbeitet, welches in Kapitel 1 dieses Berichts ausführlich dargestellt ist.

Der Methodenband zum PSA Leitfaden /FAK 05/ enthält für übergreifende Einwirkungen Vorgaben zur Durchführung von PSA der Stufe 1 bei Leistungsbetrieb. Dies betrifft sowohl übergreifende Einwirkungen von innen (EVI) als auch übergreifende Einwirkungen von außen (EVA) zivilisatorischer und naturbedingter Art.

Die sicherheitstechnischen Auswertungen zu den Reaktorunfällen von Fukushima Dai-ichi im März 2011 haben gezeigt, dass die Auslegung von Kernkraftwerken, insbesondere gegen übergreifende Einwirkungen und mögliche Kombinationen solcher Einwirkungen, überprüft werden muss. Dazu ist das tatsächliche Spektrum der am Standort möglichen übergreifenden Einwirkungen in all seinen Auftretensformen, Kombinationen und Konsequenzen zu betrachten. So ist z. B. bei Erdbeben-PSA der Grund für schwerwiegende Konsequenzen nicht unbedingt immer im seismisch bedingten Ausfall sicherheitstechnisch wichtiger Strukturen, Systeme und Komponenten auf dem Kraftwerksgelände zu suchen, sondern besteht häufig auch in der Zerstörung der externen Stromversorgung, einem entsprechenden Langzeitausfall und damit erhöhten Anforderungen an die Möglichkeiten der internen Stromversorgung (Eigenbedarf, Notstromversorgung) am Standort. Die interne Stromversorgung wird für einen längeren Zeitraum bedeutsamer für das Risiko als der direkte Einfluss eines Erdbebens auf die Anlagen-

komponenten. Solche komplexen Zusammenhänge sind nur mit einer sogenannten Hazards PSA (englisch für eine PSA für übergreifende Einwirkungen, siehe auch das Glossar in Tab. 9.1) zu beschreiben. In /KUM 15/ wird festgestellt, dass die Identifizierung relevanter übergreifender Einwirkungen für Kernkraftwerksstandorte in Europa nur eingeschränkt durchgeführt wurde. Häufig wurde die Identifizierung von Hazards, insbesondere von übergreifenden Einwirkungen von außen, mit der Standortanalyse im Sicherheitsbericht als abgeschlossen angesehen. Die Analysen wurden nicht aktualisiert.

Bei der Durchführung probabilistischer Untersuchungen zu den Auswirkungen von Erdbeben auf das Risiko von kerntechnischen Anlagen hat sich international eine Vorgehensweise etabliert, die auf der systematischen Erweiterung vorliegender Ereignis- und Fehlerbaummodelle unter Zuhilfenahme sogenannter seismischer Ausrüstungslisten beruht. Diese Ausrüstungslisten, kurz S-EL genannt, umfassen alle Ausrüstungen einer kerntechnischen Anlage, die bei seismischen Einwirkungen ausfallen und einen Beitrag zum Risiko der Anlage leisten können. Eine grundlegende Aufgabe bei der Bestimmung des seismischen Risikos besteht darin, eine systematische Vorgehensweise zur Zusammenstellung der S-EL abzuleiten, so dass keine Ausrüstungen mit seismischer Risikorelevanz übersehen werden können.

Bei der im vorliegenden Bericht beschriebenen Methode zur Durchführung von Risiko-untersuchungen weiterer übergreifender Einwirkungen wird die praktizierte Herangehensweise bei der Durchführung von Risikoanalysen in zwei Richtungen verallgemeinert:

- In Analogie zur seismischen Ausrüstungsliste kann für eine beliebige übergreifende Einwirkung  $H$  (Hazard) eine entsprechende Ausrüstungsliste abgeleitet und zur systematischen Modellerweiterung bei der Bestimmung des  $H$ -bedingten Risikos genutzt werden.
- Den Ausrüstungslisten werden sogenannte Abhängigkeitslisten zur Seite gestellt. Mit einer Abhängigkeitsliste für eine übergreifende Einwirkung  $H$  wird sichergestellt, dass keine  $H$ -bedingte Ausfallabhängigkeit zwischen den Ausrüstungen übersehen werden kann.

Das Kernstück des vorliegenden Berichts besteht in der Beschreibung des grundsätzlichen Vorgehens bei der Durchführung einer standortspezifischen PSA der Stufe 1 unter Einbeziehung aller Risiken, die durch übergreifende Einwirkungen von innen und

außen hervorgerufen werden (Kapitel 1). Die entsprechende Risikoanalyse wird für einzelne Kernkraftwerke durchgeführt und kurz HPSA (Hazards PSA) genannt.

Die Probleme bei der Durchführung von HPSA für Mehrblock-Standorte werden in Kapitel 2.1.4 erörtert, jedoch nicht im Detail ausgeführt.

Der erste Arbeitsschritt bei der Durchführung einer HPSA besteht in der Festlegung der übergreifenden Einwirkungen, die am konkreten Standort auftreten können. Dazu wurde eine Zusammenstellung aller bekannten übergreifenden Einwirkungen und ihrer Kombinationen vorgenommen (Kapitel 2.2.1). Auf der Grundlage dieser Zusammenstellung generischer übergreifender Einwirkungen lässt sich mittels eines Auswahlverfahrens unter Einbeziehung behördlicher Vorgaben und Erkenntnisse aus Standortbegehungen eine Liste der für den Standort zu bewertenden übergreifenden Einwirkungen begründet ableiten (Kapitel 2.2.2).

Alle am Standort zu betrachtenden übergreifenden Einwirkungen sind in Bezug auf die notwendige Tiefe der probabilistischen Untersuchungen zu klassifizieren (Kapitel 2.2.2.1). Dabei werden drei Klassen unterschieden:

- übergreifende Einwirkungen, deren Risikobeitrag vernachlässigbar ist,
- übergreifende Einwirkungen, für die aufgrund des nachgewiesenen geringen Risikobeitrags eine quantitative Grobabschätzung ausreichend ist sowie
- übergreifende Einwirkungen, die im Detail probabilistisch zu analysieren sind.

Zur quantitativen Bestimmung des Risikobeitrags einer übergreifenden Einwirkung auf der Grundlage eines vorhandenen PSA-Anlagenmodells der Stufe 1 wird ein methodisches Vorgehen vorgeschlagen (Kapitel 2.3). Dazu werden Listen erstellt, die alle Einrichtungen und Ausrüstungen enthalten, die durch die entsprechende übergreifende Einwirkung in ihrer Funktionsweise beeinträchtigt werden, wobei diese Beeinträchtigung zur Risikoerhöhung beiträgt (Kapitel 2.3.2). Davon enthält eine Liste die einzelnen Einrichtungen und Ausrüstungen (Kapitel 2.3.2.2) und eine weitere die Ausfallabhängigkeiten (Kapitel 2.3.2.3), die durch die übergreifende Einwirkung zu berücksichtigen sind.

Für die übergreifenden Einwirkungen Erdbeben (Kapitel 2.3.2.4), anlageninterner Brand (Kapitel 2.3.2.5), biologische Phänomene (Kapitel 2.3.2.6) und anlagenexterne

Überflutung (Kapitel 2.3.2.7) die Aufstellung und Anwendung dieser Listen beispielhaft diskutiert.

Zum besseren Verständnis der im vorliegenden Bericht beschriebenen methodischen Herangehensweisen sind mehrere Beispiele angegeben. Dazu wird zum einen ein einfaches Beispiel konstruiert (Anhang 0) und zum anderen auf Modellierungen in konkreten PSA (Anhang 0) zurückgegriffen.

Zusätzlich zu dem allgemein beschriebenen Vorgehen bei der Durchführung von HPSA wird der Frage der Modellierung von Abhängigkeiten im einwirkungsbedingten Ausfallverhalten der Einrichtungen eines Kernkraftwerks nachgegangen (Kapitel 3). Es wird ein allgemeines Abhängigkeitsmodell formuliert (Kapitel 3.1.2) und anhand diverser Beispiele gezeigt (Kapitel 3.1.3), wie die erkannten Abhängigkeiten in die Fehlerbaummodellierung übernommen werden können. In Kapitel 3.2 wird besonderes Augenmerk auf die Modellierung erdbebenbedingter Brände gelegt.

In Kapitel 4 werden schließlich einige Aspekte der Quantifizierung bei seismischen PSA wie rechentechnische Hilfsmittel (Kapitel 4.1) und Nutzung von Datenbanken (Kapitel 4.2) diskutiert.

Der vorliegende Bericht enthält auf Grund seines weitgefächerten fachlichen Spektrums eine Vielzahl von Fachtermini und Abkürzungen, die an entsprechender Stelle des Berichts definiert und erläutert werden. Eindeutige Begriffsbildungen und Definitionen sind die Grundlage jeder methodischen Arbeit (siehe Tab. 9.1)

Das Literaturverzeichnis hat bibliographischen Charakter, d. h. es dient dem interessierten Leser dazu, sich einen Überblick zum aktuellen Stand der internationalen Untersuchungen auf dem Gebiet der Risikobewertung übergreifender Einwirkungen zu verschaffen (vgl. insbesondere /ANS 03/, /GRS 90/, /HOL 04/, /HUA 11/, /NAR 11/, /VOS 08/, /WAT 03/ und /ZEN 10/). Die in diesem Literaturverzeichnis mit einem \* markierten Literaturangaben sind im Anhang A.2 zur Bestimmung des Standes von Wissenschaft und Technik näher beschrieben. Dabei wurden insbesondere solche Beiträge im Detail betrachtet, die interessante Aspekte zu den wesentlichen Inhalten des vorliegenden Berichts beitragen.

## **2 Durchführung einer standortspezifischen PSA zu den Folgen übergreifender Einwirkungen (HPSA)**

Der Methodenband zum PSA Leitfaden /FAK 05/ enthält für übergreifende Einwirkungen Vorgaben zur Durchführung von PSA der Stufe 1 bei Leistungsbetrieb. Das betrifft sowohl übergreifende Einwirkungen von innen (EVI) als auch übergreifende Einwirkungen von außen (EVA) zivilisatorischer und naturbedingter Art.

Nachfolgend wird, vor allem der Kürze halber, oft der englische Begriff 'Hazard' anstatt des deutlich längeren Begriffs 'übergreifende Einwirkung' verwendet; Einwirkungen von innen, auch als 'EVI' bezeichnet, sind anlageninterne, Einwirkungen von außen, mit 'EVA' abgekürzt, sind Hazards, die außerhalb des Anlagengeländes entstehen. Für eine standortspezifische PSA wird die Abkürzung 'HPSA' (für Hazards PSA) verwendet.

Entsprechend dem Fachband zu PSA-Methoden /FAK 05/ des deutschen PSA-Leitfadens sind folgende Einwirkungen von innen im Detail probabilistisch zu untersuchen:

- anlageninterner Brand und
- anlageninterne Überflutung.

Entsprechend /FAK 05/ sind folgende Einwirkungen von außen einer probabilistischen Untersuchung zu unterziehen:

- Flugzeugabsturz,
- Explosionsdruckwelle,
- Hochwasser,
- Erdbeben,
- Giftgaswolke,
- anlagenexterner Brand,
- Schiffskollision mit dem Einlaufbauwerk,
- extreme Wettersituationen (genannt sind Blitz, Sturm, Schnee, Eis sowie Kombinationen extremer Wettersituationen) und

- biologische Phänomene.

Für die Einwirkungen von außen Flugzeugabsturz, Explosionsdruckwelle, Hochwasser und Erdbeben sind in /FAK 05/ die möglichen Vorgehensweisen für probabilistische Analysen beschrieben. Die Verfahren werden ausnahmslos gestaffelt durchgeführt, d. h. bevor Detailanalysen durchgeführt werden, wird mittels Screening- bzw. Grobanalysen entschieden, ab welchem Umfang der übergreifenden Einwirkung mit auslösenden Ereignissen und damit mit risikorelevanten Beiträgen zu rechnen ist.

Die Veröffentlichung eines weiteren Ergänzungsbandes zu Methoden und Daten zur probabilistischen Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke ist geplant, im Entwurf /FAK 15/ liegt dieser bereits vor. In Hinblick auf die Durchführung probabilistischer Analysen zu übergreifenden Einwirkungen sind z. B. folgende Ergänzungen zu berücksichtigen:

- Naturbedingte Einwirkung von außen ‘Hochwasser’:  
Die gestaffelte Nachweisführung wurde beibehalten und die Beschreibung des Analyseumfangs präzisiert. Die Notwendigkeit qualifizierter Anlagenbegehungen und die Betrachtung möglicher Kombinationen mit den Ereignissen Erdbeben und Brand wurde neu aufgenommen /FAK 15/.
- Naturbedingte Einwirkung von außen ‘Erdbeben’:  
Das internationale Vorgehen, bei dem insbesondere die Aspekte Gefährdungsanalyse, Ereigniskombinationen, seismische Nichtverfügbarkeiten, Auswahlverfahren und Anlagenbegehungen betrachtet werden, wird explizit hervorgehoben. Die Auswahl von EVA-Ereignissen und deren Kombinationen wird nicht behandelt, sondern es wird auf die einschlägige Literatur verwiesen.  
Gemäß der international etablierten Vorgehensweise werden für die Auswahl der relevanten baulichen Anlagenteile, Systeme und Komponenten (deutsch: BSK, oder englisch: SSC für structures, systems and components) Erkenntnisse aus qualifizierten Anlagenbegehungen herangezogen. Da diese Vorgehensweise bereits erfolgreich bei Erdbeben-PSA (kurz: SPSA) in Deutschland verwendet wurde, wird ein Verfahren zur Auswahl der relevanten BSK eingeführt und zugehörige Kriterien hierzu definiert. Die Bedeutung der Rolle von Anlagenbegehungen wurde hervorgehoben /FAK 15/.
- Einwirkung von innen ‘Brand’ für Zustände des Nichtleistungsbetriebs:  
In /FAK 05/ ist die Methodik der Durchführung für Brand-PSA im Leistungsbetrieb beschrieben. Bei der Anwendung der Methodik für Brand-PSA auf Zustände des

Nichtleistungsbetriebs sind insbesondere die Unterschiede in den Eingangsdaten und -informationen gegenüber denen des Leistungsbetriebs zu beachten.

Diese Ergänzungen basieren u. a. auf Erkenntnissen der sicherheitstechnischen Auswertungen zu den Reaktorunfällen von Fukushima Dai-ichi. Die Auslegung von Kernkraftwerken, insbesondere gegen übergreifende Einwirkungen, ist zu überprüfen, das Methodenarsenal zur probabilistischen Bewertung der Einwirkungen ist zu verbessern und es sind alle Möglichkeiten von Kombinationen übergreifender Einwirkungen zu betrachten. Es hat sich gezeigt, dass nur mit einer standortspezifischen HPSA das tatsächliche Risiko des Standorts im Hinblick auf übergreifende Einwirkungen von innen und außen und deren Kombinationen eingeschätzt werden kann. Im Mittelpunkt der Untersuchungen steht dabei die methodisch umfassende Behandlung möglicher Abhängigkeiten auf allen Ebenen der Analyse. Auf der Ebene der übergreifenden Einwirkungen ist zu analysieren, welche übergreifenden Einwirkungen am Standort abhängig voneinander eintreten können; auf der Ebene der auslösenden Ereignisse ist zu berücksichtigen, dass übergreifende Einwirkungen mehrere auslösende Ereignisse fast gleichzeitig hervorrufen können und auf der Ebene der Systemanalyse sind schließlich in den Fehlerbaumanalysen die spezifischen Ausfallabhängigkeiten von BSK auf Grund übergreifender Einwirkungen zu modellieren.

Nachfolgend wird ein Konzept zur Durchführung einer standortspezifischen HPSA abgeleitet. Dabei konnte weder jeder Arbeitsschritt einer HPSA durch detaillierte methodische Hinweise gestützt werden, noch war es möglich, den gesamten Prozess an einem Referenzstandort zu überprüfen. Nichtsdestotrotz sind in den vorliegenden Bericht eine Reihe von Beispielen eingeflossen, die die Wirksamkeit des Konzeptes nachweisen (siehe insbesondere Anhang 0 und 0).

Erste Ansätze und Anwendungen zum nachfolgend im Detail ausgeführten Konzept wurden im Verlauf des Vorhabens veröffentlicht /SPE 13/, /TUE 13/, /TUE 14/, /BAB 15/, /TUE 15/, /TUE 15a/, /TUE 15b/.

Auch international werden gegenwärtig in der Folge der Ereignisse von Fukushima Anstrengungen unternommen, den Umfang von PSA vor allem in Bezug auf übergreifende Ereignisse auszuweiten. Die GRS nimmt derzeit an dem internationalen Projekt der EU ASAMPSA\_E (*Advanced Safety Assessment Methodologies: Extended PSA*) zu fortgeschrittenen Methoden probabilistischer Sicherheitsbewertung teil /ASA 13/. Thematischer Schwerpunkt ist die Durchführung sogenannter „erweiterter PSA“ (eng-

lich: extended PSA). Eine erweiterte PSA wird für einen Standort mit einem oder mehreren Kernkraftwerksblöcken unter Einbeziehung der Umgebungsgegebenheiten durchgeführt. Dabei wird das Risiko der wesentlichen Quellen von Radioaktivität (Reaktorkern und Brennelementlagerung) am Standort unter Einbeziehung aller Anlagenbetriebszustände und aller am Standort möglichen auslösenden Ereignisse bewertet.

Eine erweiterte PSA im Sinne des Projekts ASAMP<sub>SA</sub>\_E geht über die hier vorgestellte Konzeption einer HPSA hinaus. Eine HPSA ist eine standortspezifische PSA der Stufe 1 für ein vorab festgelegtes Risikomaß der Stufe 1 (Brennstoffschaden) unter Einbeziehung aller Einwirkungen von innen und außen sowie deren Kombinationen.

## **2.1 Durchführung einer standortspezifischen HPSA**

Für alle deutschen Kernkraftwerke wurden PSA der Stufe 1 für alle Anlagenbetriebszustände des Leistungs- und Nichtleistungsbetriebs durchgeführt. Entsprechende quantifizierbare PSA-Modelle liegen für alle anlageninternen auslösenden Ereignisse vor. Für Zustände des Leistungsbetriebs gibt es weiterhin Analysen für übergreifende Einwirkungen von innen und außen entsprechend den Vorgaben im Methodenband des Leitfadens zur Durchführung von PSA /FAK 05/.

Zur Quantifizierung von PSA der Stufe 1 für einen gegebenen Anlagenbetriebszustand werden in den meisten deutschen Kernkraftwerken mehrere PSA-Modelle genutzt:

- PSA-Modell für alle anlageninternen auslösenden Ereignisse,
- PSA-Modelle für (übergreifende) Einwirkungen von innen (Brand, Überflutung),
- PSA-Modelle für (übergreifende) Einwirkungen von außen, die am Standort des jeweiligen Kernkraftwerks im Detail zu analysieren sind (standortspezifische Auswahl entsprechend dem im Methodenband /FAK 05/ zum PSA-Leitfaden beschriebenen Vorgehen).

Im Folgenden wird auf die Erarbeitung eines Konzepts zur Durchführung einer standortspezifischen PSA der Stufe 1 eingegangen unter Einbeziehung der Risiken, die durch übergreifende Einwirkungen von innen bzw. außen hervorgerufen werden. Dabei soll auf die oben genannten vorhandenen PSA-Modelle zurückgegriffen werden.

Zum besseren Verständnis der Ausführungen zum Konzept einer HPSA sind nachfolgend einige grundlegende Definitionen aufgeführt (siehe auch das umfangreiche Glossar in Kapitel 9).

Ein PSA-Modell der Stufe 1 umfasst die Menge der relevanten auslösenden Ereignisse mit den zugehörigen Eintrittshäufigkeiten. Die möglichen Ereignisverläufe sind durch Ereignisbäume beschrieben. Die Ereignisbaumverzweigungen entstehen durch die Frage nach der Wirksamkeit von Sicherheitsfunktionen. Die Verzweigungswahrscheinlichkeiten können mit der Fehlerbaummethode berechnet werden. Die Menge der Ereignis- und Fehlerbäume bildet das sogenannte PSA-Modell. Die kleinsten Einheiten im PSA-Modell heißen Basisereignisse.

Bei PSA der Stufe 1 für anlageninterne Ereignisse beschreiben Basisereignisse meist den Ausfall einer speziellen Funktion technischer Komponenten. In solchen Fällen werden durch das Basisereignis der Komponentenumfang (Welche Bauteile gehören zur Komponente, welche nicht? Wo sind die Komponentengrenzen?), die komponentenbezogene Ausfallart und die zur Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit benötigten Zuverlässigkeitsparameter (Wie wird die Komponente eingesetzt? Art des Betriebs- und Wartungsregimes) beschrieben.

Es wird im Folgenden vorausgesetzt, dass ein PSA-Modell der Stufe 1 für anlageninterne auslösende Ereignisse vorliegt. Diese PSA soll nun auf der Ebene der Basisereignisse so erweitert werden, dass auch die durch eine übergreifende Einwirkung bedingten Ausfälle von BSK berücksichtigt werden. Dazu wird eine Liste von BSK aufgestellt, deren Fehlfunktion infolge einer übergreifenden Einwirkung einen Beitrag zur Häufigkeit der Schadenszustände liefern kann. Diese Liste wird Ausrüstungsliste bezüglich der betrachteten übergreifenden Einwirkung genannt.

Die Abkürzung HPSA steht in diesem Zusammenhang für Hazards PSA. Der Begriff Hazard umfasst in diesem Zusammenhang eine übergreifende Einwirkung von innen, eine übergreifende Einwirkung von außen oder eine Kombination von zwei oder mehreren übergreifenden Einwirkungen. Eine HPSA ist eine standortspezifische PSA der Stufe 1 für ein vorab festgelegtes Risikomaß der Stufe 1 (Brennstoffschaden) unter Einbeziehung aller Einwirkungen von innen und außen sowie deren Kombinationen.

### **2.1.1 Aufgabenstellung**

An einem Standort mit einem oder mehreren Kernkraftwerksblöcken ist der Einfluss von Ereignissen übergreifender Einwirkungen von innen und außen in Bezug auf die Häufigkeit von Schadenszuständen probabilistisch zu bewerten. Bei den Schadenszuständen handelt es sich um Schäden des Brennstoffs in Abhängigkeit vom betrachteten Anlagenbetriebszustand (Leistungsbetrieb, Nichtleistungsbetrieb, Reaktorkern, Brennelemente-Lagerbecken).

Es gibt grundsätzlich zwei Möglichkeiten der Ableitung von PSA für Standorte mit mehr als einem Reaktorblock: zum einen kann eine vollständig neue Multi-Reaktor-PSA erstellt werden /FLE 05/, zum anderen können bereits erstellte PSA für die einzelnen Reaktoren am Standort in eine PSA für mehrere Reaktorblöcke integriert werden /PLG 83/. Im vorliegenden Bericht wird allerdings davon ausgegangen, dass eine HPSA für einen Standort mit nur einem Kernkraftwerksblock durchgeführt werden soll. Das Vorgehen bei Mehrblock-Standorten und die sich dabei ergebenden Fragestellungen werden in Kapitel 2.1.4 kurz umrissen.

### **2.1.2 Annahmen und Voraussetzungen**

Es wird angenommen, dass für einen gegebenen Anlagenbetriebszustand eines Kernkraftwerks eine probabilistische Sicherheitsanalyse der Stufe 1 (PSA) für anlageninterne auslösende Ereignisse vorliegt, d. h. zur Berechnung der Schadenshäufigkeit wurde ein PSA-Anlagenmodell bestehend aus Ereignis- und Fehlerbäumen abgeleitet. Die Basisereignisse sind Funktionsausfälle bzw. Nichtverfügbarkeiten von Bauwerken und deren Strukturen, von Systemen und von Komponenten (BSK).

Die Schadenshäufigkeit ist ein Maß für das Risiko, welches vom Kernkraftwerk ausgeht, und ist die Zielgröße einer PSA der Stufe 1. Die zu betrachtenden Schadenszustände sind vor Beginn der Analyse zu definieren. Beim Leistungsbetrieb der Anlage wird als Risikomaß die Kernschadenshäufigkeit genutzt, im Nichtleistungsbetrieb oft die Häufigkeit von Brennstabschäden.

Bei Mehrblockanlagen ist ein geeignetes Risikomaß vorab festzulegen.

Das Konzept umfasst aber nicht die Behandlung übergreifender Ereignisse, die ihren Ursprung in kriegerischen Auseinandersetzungen, in Sabotageakten oder terroristischen Anschlägen haben (sogenannte sonstige Einwirkungen Dritter, SEWD).

Der Sicherheitsbericht, insbesondere mit Informationen zur Auslegung der Anlage in Bezug auf übergreifende Einwirkungen liegt vor.

Für die Reihenfolge der Abarbeitung der übergreifenden Einwirkungen wird empfohlen, mit den übergreifenden Einwirkungen von innen Brand und Überflutung zu beginnen. Bei den Analysen der übergreifenden Einwirkungen von außen ist auf Informationen aus diesen EVI-Untersuchungen zurückzugreifen.

### **2.1.3 Vorgehen**

Die systematische Durchführung einer HPSA umfasst mehrere Modellierungsebenen, die im Wesentlichen durch die unterschiedliche Behandlung von Abhängigkeiten voneinander abgegrenzt werden können:

- **Übergreifende Einwirkungen**

In der 'Modellierungsebene Einwirkungen' ist standortbezogen festzulegen, welche übergreifenden Einwirkungen und welche Kombinationen von Einwirkungen von innen und außen relevant sind, d. h. es ist zu entscheiden, welche der am Standort möglichen übergreifenden Einwirkungen messbar zur jährlichen Häufigkeit von Schadenszuständen beitragen und welche bei der weiteren Modellierung vernachlässigt werden können. Die Anzahl der Kraftwerksblöcke pro Standort ist zu berücksichtigen.

Es wird ein Auswahlverfahren angewendet, mit dem zum einen entschieden wird, welche übergreifenden Ereignisse für den Standort in Frage kommen, und zum anderen festgelegt wird, mit welchem Detaillierungsgrad die bedingte Schadenshäufigkeit berechnet werden muss.

Dieses Vorgehen ist in Kapitel 2.2 ausführlich beschrieben. Zur Durchführung von HPSA bei Mehrblock-Standorten ist Grundsätzliches in Kapitel 2.1.4 angemerkt.

- **Auslösende Ereignisse AE**

Ein Ereignis wird als auslösendes Ereignis (AE) bezeichnet, wenn ein Schadenszustand nur durch die Einleitung von Maßnahmen verhindert werden kann, die nicht zum Normalbetrieb der Anlage gehören.

In der 'Modellierungsebene AE' sind für jede relevante übergreifende Einwirkung die möglichen auslösenden Ereignisse zu analysieren. Dabei ist insbesondere zu untersuchen, ob die AE als CCI (englisch: **common cause Initiators**) modelliert werden müssen und inwieweit mehrere AE gleichzeitig (bzw. nahezu gleichzeitig) hervorgerufen werden können. CCI sind AE, die auf Grund einer gemeinsamen Ursache (hier auf Grund einer übergreifenden Einwirkung) entstanden sind und deren Beherrschung erschwert wird, weil durch die übergreifende Einwirkung auch Ausfälle bei den erforderlichen Gegenmaßnahmen zu verzeichnen sind. Derartige Fälle sind zu identifizieren und adäquat zu modellieren. Einige Aspekte der 'Modellierungsebene AE' werden in Kapitel 2.3.1 diskutiert.

– Erweiterung des Anlagenmodells auf BSK-Ebene

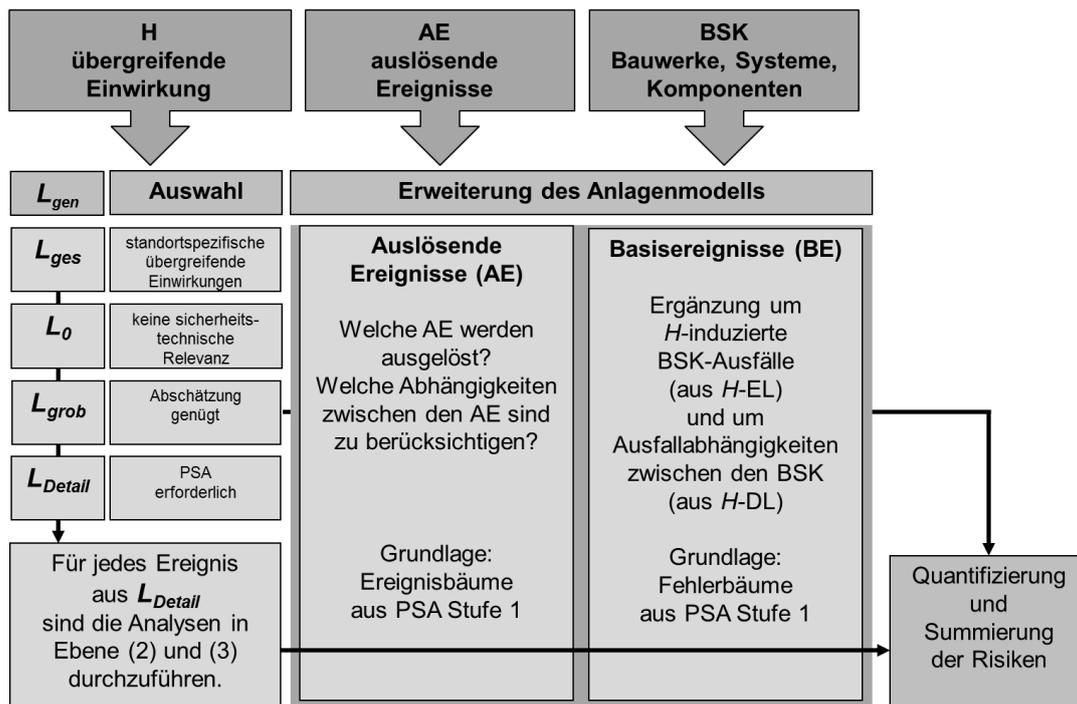
In der 'Modellierungsebene BSK' wird das PSA-Anlagenmodell für jede relevante übergreifende Einwirkung H um die H-bedingten Funktionsausfälle bzw. Nichtverfügbarkeiten erweitert. Diese Erweiterung wird systematisch auf der Grundlage der zuvor abgeleiteten Listen H-EL und H-DL vorgenommen.

H-EL, die sogenannte „Hazard Equipment List“, enthält alle BSK, die bedingt durch übergreifende Einwirkungen ausfallen können und dadurch einen Beitrag zur Kernschadenshäufigkeit liefern.

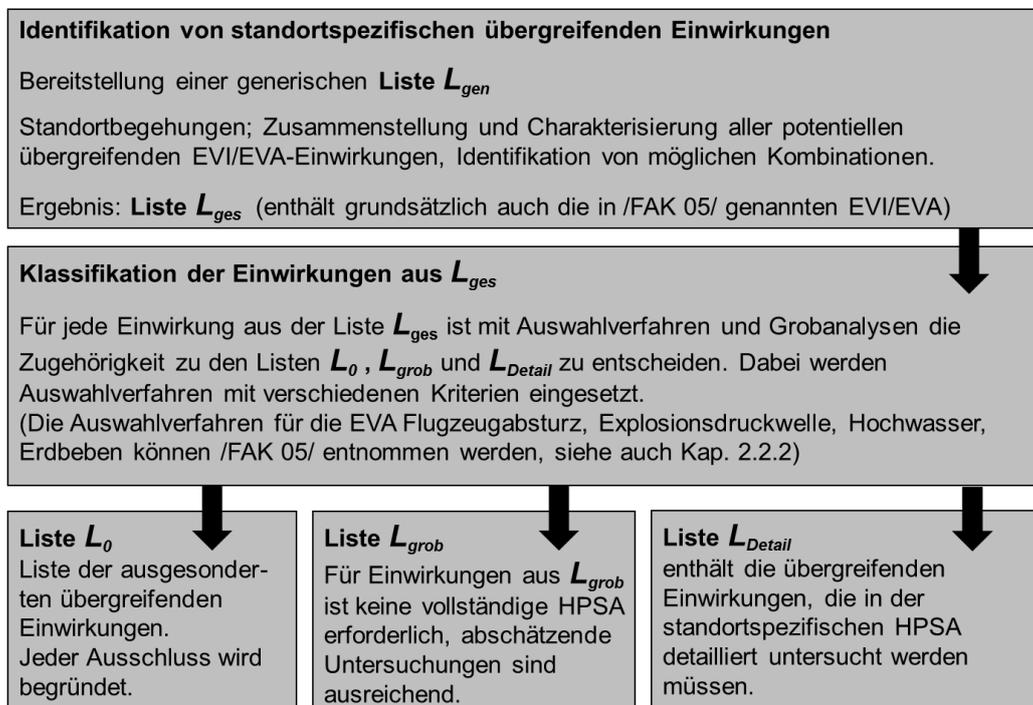
H-DL, die sogenannte „Hazard Dependency List“, enthält alle Abhängigkeiten, die bei H-bedingten Ausfällen von BSK zu berücksichtigen sind.

H-EL und H-DL werden in einem umfassenden Auswahlprozess unter Einbeziehung von Anlagenbegehungen abgeleitet. Eine detaillierte Beschreibung befindet des Vorgehens ist in Kapitel 2.3 enthalten.

In Abb. 2.1 ist das Vorgehen bei der Erweiterung des Modells einer PSA der Stufe 1 zusammengefasst dargestellt; zu den verwendeten Begriffen und Abkürzungen wird auf den nachfolgenden Text und das umfangreiche Glossar in Kapitel 9 verwiesen. In Abb. 2.2 ist die Klassifizierung der übergreifenden Einwirkungen schematisch dargestellt.



**Abb. 2.1** Durchführung einer standortspezifischen HPSA unter Berücksichtigung von Abhängigkeiten



**Abb. 2.2** Klassifikation der übergreifenden Einwirkungen aus der Liste  $L_{ges}$

Zur standortspezifischen Bewertung des Risikos durch übergreifende Einwirkungen sind alle am Standort möglichen übergreifenden Einwirkungen in einer Liste  $L_{ges}$  zu-

sammenzustellen. Zur Unterstützung bei der Auswahl wird eine generische Liste  $L_{gen}$  zur Verfügung gestellt. Die Liste  $L_{gen}$  enthält Informationen zu weltweit aufgetretenen oder in der Fachliteratur erwähnten übergreifenden Einwirkungen. In Kapitel 2.2.1 wird ein erster Ansatz einer generischen Liste diskutiert. Die Liste  $L_{gen}$  enthält auch alle gemeinsam aufgetretenen übergreifenden Einwirkungen. In der Endfassung der Liste  $L_{gen}$  ist jedes Ereignis umfassend kommentiert. Die Liste  $L_{gen}$  wird flexibel fortgeführt und immer auf dem aktuellen Stand gehalten.

Die Liste  $L_{gen}$  enthält

- alle tatsächlich aufgetretenen oder theoretisch diskutierten übergreifenden Einwirkungen von innen,
- alle tatsächlich aufgetretenen oder theoretisch diskutierten übergreifenden Einwirkungen von außen sowie
- alle tatsächlich aufgetretenen oder theoretisch diskutierten Kombinationen übergreifender Einwirkungen.

Als Ergebnis der hier vorgestellten Konzeption zur Durchführung einer standortspezifischen HPSA ist in einem Folgevorhaben vorgesehen, die Liste  $L_{gen}$  durch vielfältige zusätzliche Informationen zu ergänzen und zu einem wichtigen Ausgangspunkt bei der Durchführung von standortspezifischen HPSA zu gestalten. Zu diesen Informationen gehört z. B. die Häufigkeit des weltweiten Auftretens von speziellen übergreifenden Einwirkungen, die Festlegung von Referenzfällen für jede übergreifende Einwirkung oder die Herstellung eines Bezugs von Standorteigenschaften zu den möglichen auftretenden übergreifenden Einwirkungen.

Ist eine HPSA für einen gegebenen Standort zu erstellen, dient die Liste  $L_{gen}$  für die PSA-Ersteller als Grundlage zur Aufstellung der Liste  $L_{ges}$ . Die Liste  $L_{ges}$  enthält alle am Standort möglichen übergreifenden Ereignisse und deren mögliche Kombinationen. Zur Begründung der Auswahl werden die Kommentare zu den einzelnen übergreifenden Einwirkungen in der Liste  $L_{gen}$  herangezogen und zu den Gegebenheiten des Standorts in Beziehung gesetzt. Einige übergreifende Einwirkungen gelten als gesetzt, dazu gehören die bisher im Methodenband des PSA-Leitfadens genannten übergreifenden Einwirkungen, mehr dazu in Kapitel 2.2.2. Die übergreifenden Einwirkungen von innen aus der Liste  $L_{gen}$  werden vollständig in die Liste  $L_{ges}$  übernommen.

Die übergreifenden Einwirkungen der Liste  $L_{ges}$  sind zu klassifizieren, sie werden nach Risikorelevanz weiteren drei Listen zugeordnet:

– Liste  $L_0$

Nach der standortbezogenen Klassifikation enthält die Liste  $L_0$  alle übergreifenden Einwirkungen aus der Liste  $L_{ges}$ , die – obwohl erst einmal für den Standort nicht ausgeschlossen, der Liste  $L_{gen}$  entnommen und  $L_{ges}$  zugeordnet – bei näherer Betrachtung keine sicherheitstechnische Relevanz für den Standort haben, d. h. keine auslösenden Ereignisse induzieren.

– Liste  $L_{grob}$

Die Liste  $L_{grob}$  enthält die übergreifenden Einwirkungen, für die eine grobe konservative Abschätzung des Risikos ausreicht.

– Liste  $L_{Detail}$

Die Liste  $L_{Detail}$  enthält alle übergreifenden Einwirkungen, für die detaillierte und systematische probabilistische Analysen erforderlich sind.

Die Klassifikation der übergreifenden Einwirkungen aus der Liste  $L_{ges}$  kann durch vorgegebene Entscheidungsverfahren erleichtert werden, mehr dazu findet sich in Kapitel 2.2. Es ist natürlich möglich, alle übergreifenden Einwirkungen von vornherein im Detail zu analysieren, dies würde jedoch eine Zuordnung aller übergreifenden Einwirkungen aus  $L_{ges}$  in  $L_{Detail}$  und einen erhöhten Arbeitsaufwand bedeuten. In manchen Fällen ist es nicht möglich, Kriterien für die Zuordnung zu  $L_{grob}$  anzugeben. In diesem Fall erfolgt zuerst eine Zuordnung zu  $L_{grob}$ , wobei erst das Ergebnis der Grobanalyse aufzeigt, ob auch im Detail analysiert werden muss.

Das Gesamtrisiko in Hinblick auf übergreifende Einwirkungen am Standort ergibt sich aus der Summe der einzelnen Risiken aller übergreifenden Einwirkungen der Liste  $L_{ges}$  (siehe auch Abb. 2.1). Dabei ist anzumerken, dass diese Liste neben einzelnen übergreifenden Einwirkungen auch Kombinationen übergreifender Einwirkungen enthält, die am Standort für möglich gehalten werden. Das Problem der Abhängigkeiten zwischen übergreifenden Einwirkungen ist also für den Standort schon bei der Zusammenstellung der Liste  $L_{ges}$  zu diskutieren. Für übergreifende Einwirkungen aus der Liste  $L_0$  ist das Risiko vernachlässigbar klein (für die Quantifizierung wird der Häufigkeitswert Null angenommen). Für übergreifende Einwirkungen aus der Liste  $L_{grob}$  wird angenommen, dass das Risiko bei konservativer Abschätzung kleiner als ein vorgegebener Schwellenwert SW ist. Für n übergreifende Einwirkungen in der Liste  $L_{grob}$  ergibt sich also ein

maximaler Risikobeitrag von  $n \times SW$ . Für jede übergreifende Einwirkungen aus der Liste  $L_{Detail}$  wird der Risikobeitrag mittels einer detaillierten probabilistischen Analyse berechnet.

Es gehört zu den Annahmen für das beschriebene Vorgehen, dass für den gegebenen Anlagenbetriebszustand eine PSA der Stufe 1 für anlageninterne auslösende Ereignisse vorliegt, d. h. zur Berechnung der Schadenshäufigkeit steht ein PSA-Anlagenmodell, bestehend aus Ereignis- und Fehlerbäumen, zur Verfügung. Dieses Anlagenmodell ist nun für jede übergreifende Einwirkung aus der Liste  $L_{Detail}$  zu erweitern. Die erste Erweiterung betrifft die Ebene der auslösenden Ereignisse. Für ein übergreifendes Ereignis ist zu fragen, welche auslösenden Ereignisse hervorgerufen werden können und ob diese auch abhängig voneinander auftreten. Das Anlagenmodell ist entsprechend zu modifizieren. Dies betrifft in der Mehrzahl der Fälle die Ereignisbaummodellierung (siehe Kapitel 2.3.1).

Eine zweite Erweiterung findet auf der Ebene der Fehlerbaummodellierung statt. Für jedes BSK muss gefragt werden, ob ein abhängiger oder unabhängiger Ausfall auf Grund einer gegebenen übergreifenden Einwirkung möglich ist. Diese BSK werden in den Ausrüstungslisten  $H-EL$  und Abhängigkeitslisten  $H-DL$  zusammengestellt. Dieses Vorgehen ist in Kapitel 2.3.2 ausführlich erläutert. Mit Hilfe dieser Listen ist es möglich, die Fehlerbäume systematisch (und teilweise automatisch) zu erweitern.

#### **2.1.4 HPSA bei Mehrblock-Standorten**

Bei der Aufstellung des Anlagenmodells zur Quantifizierung des Risikos übergreifender Einwirkungen für einen Standort mit nur einem Kraftwerksblock wird in Kapitel 2.1.2 bei einer HPSA von drei Ebenen bezüglich der Modellierung von Abhängigkeiten gesprochen. Bei Mehrblockanlagen sind bei der Modellierung noch die Abhängigkeiten zu berücksichtigen, die zwischen den Kernkraftwerksblöcken bestehen.

Nachfolgend sind einige wichtige Gesichtspunkte aufgeführt, die bei Mehrblock-Analysen zu beachten sind. Dazu wurden insbesondere folgende Literaturstellen ausgewertet: /KLU 15/, /FLE 15/, /HAK 07/, /HIR 07/, /SCH 13/, /PLG 83/ und /MIT 13/. In /SCH 13/ ist eine Klassifikation übergreifender Einwirkungen vorgenommen worden, um das Risiko an einem Standort mit mehreren Kernkraftwerksblöcken abschätzen zu können.

Die maximale Anzahl von Kernkraftwerken an einem Standort ist acht, ungefähr 50 % der weltweit gebauten Kernkraftwerke befinden sich an einem Standort mit mehr als drei Reaktorblöcken /HAK 07/. Die maximale Anzahl von Kraftwerksblöcken an einem Standort beträgt z. B. drei in den USA und sieben in Japan (siehe auch Tab. 2.1). Es ist absehbar, dass international in Zukunft neue Kernkraftwerke an Standorten gebaut werden, wo bereits ein oder mehrere Reaktoren in Betrieb sind.

**Tab. 2.1** Standorte von Kernkraftwerken mit großer Blockzahl

Land	Anlage	Reaktortyp	Anzahl Blöcke
Kanada	Bruce	PHWR	8 (2 abgeschaltet)
Kanada	Pickering	PHWR	8 (3 abgeschaltet)
Japan	Kashiwazaki-Kariwa	SWR	7
Südkorea	Ulchin	DWR	6
Südkorea	Yonggwang	DWR	6
Ukraine	Saporoshje	DWR	6
Frankreich	Gravelines	SWR	6
Indien	Rajasthan	PHWR	6 (2 im Bau)

Unser aktuelles Wissen zum Risiko von Kernkraftwerken ergibt sich aus den weltweit durchgeführten detaillierten probabilistischen Sicherheitsanalysen (PSA aller Stufen, Risikoanalysen) für einzelne Kernkraftwerksblöcke. Tatsächlich wurde für die meisten Mehrblock-Standorte das standortspezifische Risiko auf der Grundlage probabilistischer Bewertungen für die einzelnen Anlagen am Standort bewertet. Risikoanalysen für Mehrblockanlagen müssen aber unbedingt die Abhängigkeiten zwischen den Kraftwerksblöcken berücksichtigen. So wird aktuell bei der Risikoanalyse eines einzelnen Kraftwerksblocks, insbesondere bei Notfallmaßnahmen, auf die Ressourcen eines Nachbarblocks zurückgegriffen, allerdings wird das Fehlen dieser Ressourcen im Nachbarblock nicht berücksichtigt.

Es ist bisher nur für die Risikoanalysen für das Kernkraftwerk Seabrook /PLG 83/ bekannt, dass auch Auswirkungen von Störfällen betrachtet wurden, die gleichzeitig mehr als einen Kraftwerksblock betrafen. In /FLE 05/ ist eine Zusammenfassung zu den Erkenntnissen aus Seabrook gegeben (siehe dazu die Ausarbeitung in Anhang A.1). In der Zusammenfassung der historischen Bewertung der Seabrook-Ergebnisse wird insbesondere hervorgehoben, dass die allgemein anerkannten Risikomaße der probabilis-

tischen Analysen für einzelne Kraftwerksblöcke für die Nutzung bei Standortanalysen von Standorten mit mehr als einem Reaktor umdefiniert werden müssen.

Bei einer standortbezogenen PSA sind risikobezogene Abhängigkeiten zwischen den Kernkraftwerksblöcken am Standort zu berücksichtigen. Die Abhängigkeiten haben verschiedene Ursachen:

- Die Kraftwerksblöcke befinden sich am selben Standort und sind somit denselben Umgebungsbedingungen ausgesetzt.
- Es gibt Systeme, die von mehreren Kraftwerksblöcken genutzt werden. Man unterscheidet drei Typen solcher Systeme:
  - Angenommen, jedem Kraftwerksblock ist ein spezielles System zugeordnet. Dieses System ist bei jedem Kraftwerksblock identisch aufgebaut und hat für jeden Block die gleichen Aufgaben zu erfüllen. Dies ist fast so zu behandeln wie die klassischen GVA (gemeinsam verursachten Ausfälle) auf Komponentenebene.
  - Systeme, deren Dienste von mehreren Blöcken in Anspruch genommen werden können;
  - standardisierte Systeme, die im Prinzip bei jedem Kraftwerksblock vorhanden sind, die aber auf Grund von Verbindungen zwischen den Blöcken auch vom Nachbarblock des Kraftwerks genutzt werden können;
- Gemeinsame oder verbindende Räume zwischen zwei Kraftwerksblöcken;
- Gemeinsame Ressourcen (Betriebsmannschaften, Instandhaltungsteams).

Auf Grund dieser risikobezogenen Abhängigkeiten ergibt sich das Standortrisiko nicht durch Addition der (einzeln berechneten) Risiken aller Kraftwerksblöcke am Standort. Allerdings ist schwer abzuschätzen, welche Auswirkungen eine Vernachlässigung der beschriebenen Abhängigkeiten bei der Summenbildung auf das Standortrisiko haben. Die PSA für das Kernkraftwerk Seabrook zeigt, dass das Standort-Risikoniveau nur geringfügig niedriger ist, als die Summe der einzelnen Risiken, siehe Tab. A.2.

Das PSA-Anlagenmodell muss erweitert werden, um das Standortrisiko korrekt zu beschreiben. Dabei geht es vor allem um Folgendes:

- Festlegung der Zielgröße  
(z. B.: Bestimmung der Kernschadenshäufigkeit am Standort);
- anlageninterne auslösende Ereignisse und übergreifende Einwirkungen von innen pro Kraftwerksblock und deren eventuelle Auswirkungen auf andere Blöcke am Standort (z. B. Risikoerhöhung durch Bereitstellung sicherheitstechnischer Ressourcen);
- übergreifende Einwirkungen von außen und die (gleichzeitige) Entstehung auslösender Ereignisse;
- Modellierung sicherheitstechnischer Ressourcen (Komponenten, Systeme, Personal), die von den Kraftwerksblöcken im Störfall gemeinsam genutzt werden können (Abhängigkeiten!);
- zur Modellierung der durch die auslösenden Ereignisse hervorgerufenen Prozesse sind die Abhängigkeiten zu identifizieren, zu klassifizieren und entsprechend korrekt im PSA-Anlagen- oder hier besser Standortmodell umzusetzen;
- anhand der PSA für die einzelnen Kraftwerksblöcke ist zu überprüfen, ob die Fehlundlungswahrscheinlichkeiten für Personalhandlungen angemessen sind;
- Auswertung der Analysen  
(Ausgewogenheit der Risikoverteilung am Standort, Bewertung der Abhängigkeiten zwischen Kraftwerksblöcken am Standort).

## **2.2 Standortspezifische Klassifikation übergreifender Einwirkungen**

In Abb. 2.1 ist das Vorgehen bei der Erweiterung des Modells einer PSA der Stufe 1 zusammengefasst dargestellt. Im vorliegenden Kapitel wird insbesondere auf die 'Modellierungsebene Einwirkungen', in Abb. 2.1 in der linken Spalte dargestellt, eingegangen. Auf dieser Modellierungsebene wird das Ziel verfolgt, alle am Standort möglichen übergreifenden Einwirkungen und deren mögliche Kombinationen zusammenzustellen und festzulegen, in welcher Tiefe sie bearbeitet werden müssen. In Abb. 2.2 ist dieser Arbeitsschritt im Überblick dargestellt. Um Missverständnisse zu vermeiden, wird hier nochmals darauf hingewiesen, dass eine übergreifende Einwirkung eine Einwirkung von außen, eine Einwirkung von innen oder eine Kombination einzelner übergreifenden Einwirkungen sein kann.

Ausgangspunkt der Durchführung einer standortspezifischen HPSA bildet eine Liste  $L_{gen}$  generischer übergreifender Einwirkungen. Der Aufbau dieser Liste und ihre Nutzung sind in Kapitel 2.2.1 beschrieben. Aus dieser Liste sind für einen gegebenen Standort all diejenigen übergreifenden Einwirkungen herauszufinden, die in irgendeiner Weise einen Beitrag zur Häufigkeit von Schadenszuständen leisten können. Diese übergreifenden Einwirkungen werden in der Liste  $L_{ges}$  zusammengefasst. Für den Nutzer der Liste, dem Ersteller einer standortspezifischen HPSA, wird in Kapitel 2.2 eine Hilfestellung bei der Auswahl gegeben. Sämtliche übergreifenden Einwirkungen aus /FAK 05/ gehören von vornherein zur Liste  $L_{ges}$ .

In Kapitel 2.2.2 wird die Klassifikation aller übergreifenden Einwirkungen aus der Liste  $L_{ges}$  behandelt. Es ist für jede übergreifende Einwirkung standortbezogen begründet festzustellen, in welchem Umfang Analysen zur Bestimmung der Häufigkeit bedingter Schadenszustände durchgeführt werden müssen. Dazu erfolgt eine Klassifikation der übergreifenden Ereignisse in die Listen  $L_0$ ,  $L_{grob}$  oder  $L_{Detail}$ .

Nach Abschluss einer standortspezifischen HPSA ist folgende Übersicht zu allen übergreifenden Einwirkungen aus  $L_{ges}$  anzufertigen:

- $H_i$ ,  $i = 1, \dots, n$  (bei  $n$  übergreifenden Einwirkungen in  $L_{ges}$ ),
- Listenzuordnung von  $H_i$  (d. h. Zuordnung zu  $L_0$ ,  $L_{grob}$  oder  $L_{Detail}$ ),
- $H_i$ -bedingte jährliche Schadenshäufigkeit.

Durch geeignete Gruppierungen erhält man Aussagen darüber, welche übergreifenden Einwirkungen am Standort betrachtet wurden, welche vernachlässigt werden konnten, bei welchen eine konservative Abschätzung ergab, dass sie nicht sicherheitstechnisch relevant sind und welche im Detail analysiert werden mussten. Diese Liste gibt ein Schadensprofil im Hinblick auf übergreifende Einwirkungen für den Anlagenstandort.

### **2.2.1 Generische übergreifende Einwirkungen – die Liste $L_{gen}$**

Im vorliegenden Kapitel werden erste Schritte zur Ableitung einer umfassenden generischen Liste  $L_{gen}$  (siehe Kapitel 2.1.3) getan. Dazu werden zum einen entsprechende Listen aus der internationalen Fachliteratur herangezogen und durch eigene Untersuchungen ergänzt, zum anderen die möglichen Kombinationen und Folgen von übergreifenden Einwirkungen dargestellt.

Im Rahmen des EU-Projekts ASAMPSA\_E /PIH 14/ wurde eine internationale Umfrage zur Durchführung von PSA für übergreifende Einwirkungen ausgewertet. Den Fragebogen haben innerhalb des Projekts mehr als 20 europäische Organisationen beantwortet. Im ersten Teil des Fragebogens geht es darum, welche übergreifenden Einwirkungen tatsächlich aufgetreten sind und für welche von ihnen Erfahrungen in Hinblick auf die Durchführung probabilistischer Analysen vorliegen. An tatsächlich aufgetretenen übergreifenden Ereignissen von außen wurden von den befragten Ländern

- Erdbeben,
- Hochwasser (externe Überflutung),
- niedriger Pegelstand auf Grund langanhaltender Trockenheit,
- starke Stürme,
- hohe Temperaturen,
- Blitzeinschlag,
- Verstopfung der Pumpstation (Nebenkühlwasser),
- Eisbildung und Netzstörungen

genannt. Folgende Kombinationen von übergreifenden Einwirkungen wurden in den Antworten als tatsächlich aufgetreten hervorgehoben:

- Hochwasser und Sturm,
- Tröpfchenbildung bei hohen Lufttemperaturen kombiniert mit hoher Luftfeuchtigkeit,
- Kombination von Eisbildung und Wind.

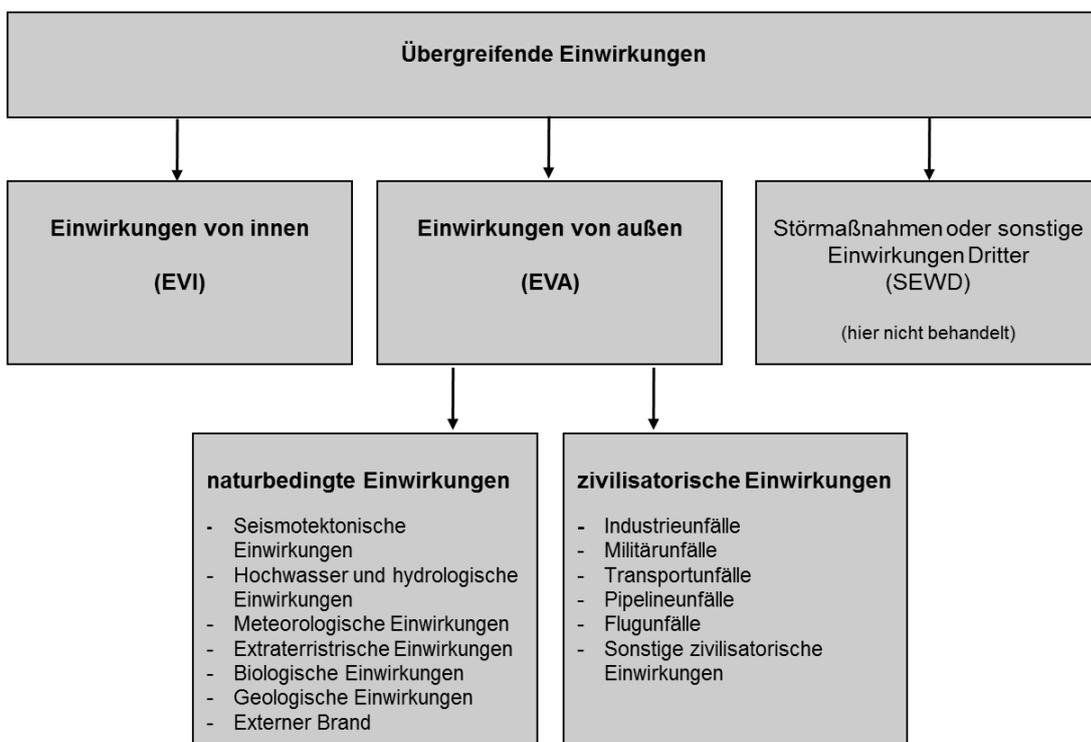
In den PSA wurden allerdings diese Kombinationen von übergreifenden Einwirkungen nicht ins Kalkül gezogen. Eine Organisation gab an, eine vollständige PSA für Einwirkungen von außen erstellt zu haben. Antworten anderer Organisationen lassen darauf schließen, dass diese vollständige PSA für Einwirkungen von außen (ausgenommen Erdbeben) durchführt haben, und zwar Organisationen aus drei Ländern eine PSA der Stufe 1, aus zwei Ländern eine PSA der Stufe 2 und aus einem Land eine PSA der Stufe 3.

Im Rahmen dieses Vorhabens wird per Definition unter einer übergreifenden Einwirkung der Liste  $L_{gen}$  eine Einwirkung von außen (EVA), eine Einwirkung von innen (EVI) oder eine Kombination einzelner übergreifender Einwirkungen verstanden. Die Abfolge bzw. Nummerierung der Einwirkungen oder Einwirkungskombinationen der folgenden Listen stehen in keinerlei Zusammenhang zu deren Bedeutung oder Wichtigkeit.

Für eine HPSA wird angestrebt, dass die Liste  $L_{gen}$  entsprechend dem Stand von Wissenschaft und Technik alle übergreifenden Einwirkungen und deren Kombinationen enthält, die bereits aufgetreten sind (nationale und internationale Betriebserfahrung) oder durch Überlegungen und Fachdiskussionen erkannt wurden. Im Rahmen dieses Vorhabens kann dafür nur ein Anfang gemacht werden. Eine Vollständigkeit ist nie ganz zu erreichen, da immer wieder neue Erkenntnisse und Erfahrungen hinzukommen oder neue Gefährdungsarten (z. B. durch neue Technologien) auftreten können.

### 2.2.1.1 Einzelne übergreifende Einwirkungen

Die einzelnen übergreifenden Einwirkung der Liste  $L_{gen}$  werden zunächst in Einwirkungen von außen (EVA) und eine Einwirkung von innen (EVI) unterteilt. Weitere Unterteilungen sind in Abb. 2.3 dargestellt.



**Abb. 2.3** Unterteilung übergreifender Einwirkungen

‘Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter‘ (SEWD) werden im Rahmen dieses Berichts nicht behandelt, seien aber hier zur Vollständigkeit erwähnt.

### **Übergreifende Einwirkungen von außen (EVA)**

Gemäß den ‘Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke‘ /BMU 15/ handelt es sich bei Einwirkungen von außen um Einwirkungen, die durch Umgebungsbedingungen, naturbedingte Ereignisse oder sonstige zivilisatorisch bedingte Einwirkungen außerhalb des Anlagengeländes hervorgerufen werden. Die Definition der Einwirkungen von außen (EVA) in den ‘Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke‘ /BMU 15/ umfasst nicht die als Notstandsfälle bezeichneten seltene zivilisatorischen Einwirkungen.

Zur Erstellung der EVA-Listen wurden das nationale und insbesondere auch das internationale Regelwerk sowie weitere internationale Literatur /DEC 14/, /IAE 02/, /IAE 03/, /IAE 03a/, /IAE 03b/, /IAE 03c/, /IAE 03d/, /IAE 03e/, /IAE 04a/, /IAE 04b/, /IAE 10/\*, /IAE 10a/, /IAE 11a/, /IAE 12/, /IAE 12a/, /KUR 14/, /NRC 12/, /WEN 13/ genutzt. Die Listen für EVA und EVI finden sich in den Tabellen Tab. 2.2 bis Tab. 2.9.

Die Einwirkungen von außen sind in naturbedingte und zivilisatorische Einwirkungen unterteilt (siehe Abb. 2.3). Die naturbedingten Einwirkungen werden in folgende Untergruppen gegliedert:

- a) seismotektonische Einwirkungen,
- b) Hochwasser und hydrologische Einwirkungen (Hoch- und Niedrigwasser),
- c) meteorologische Einwirkungen,
- d) extraterrestrische Einwirkungen,
- e) biologische Einwirkungen (einschließlich Befall),
- f) geologische Einwirkungen,
- g) naturbedingter Brand.

Die Gruppe ‘extraterrestrische Einwirkungen‘ findet sich selten in Unterteilungen der EVA. Sie wird jedoch von den Autoren als sinnvoll erachtet, da sie zum einen die zugehörigen Phänomene vereint. Zum anderen unterscheidet sich die Gruppe ‘extraterrestrische Einwirkungen‘ von allen anderen durch die nicht ortsgebundene durch die nicht ortsgebundene Auftretenswahrscheinlichkeit.

Nachstehend findet sich die Zuordnung der naturbedingten Einwirkungen von außen in den Tabellen **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** bis Tab. 2.9.

**Tab. 2.2** Gruppe A 'seismotektonische Einwirkungen

Nr.	Einwirkung	Kommentar	Quelle
A1	Erdbeben aus natürlicher Ursache (einschließlich langperiodischer Bodenbewegung)	Gleichzeitiges Einwirken von Bodenerschütterung auf alle BSK der Anlage und ihre Umgebung; inklusive Nachbeben	/WEN 13/ /IAE 04/ /IAE 10a/ /IAE 10/ /IAE 04b/ /IAE 03e/
A2	Erdbeben, durch Handlungen von Menschen bedingt oder begünstigt (z. B. Öl- und Gasförderung, Bergbau)	Erdbeben, die durch Handlungen von Menschen bedingt oder begünstigt werden (z. B. Öl- und Gasförderung, Bergbau). Gleichzeitiges Einwirken von Bodenerschütterungen auf alle BSK der Anlage und ihre Umgebung	/ASA 13/
A3	Durchpausung des Herdprozesses an definierter Bruchfläche (englisch: capable fault, surface rupture)	Diese Beben sind in der Lage die Erdoberfläche an einer definierten Bruchfläche zu versetzen (z. B. Bildung einer Stufe), da sich Versätze an den Verwerfungen bis zur Oberfläche durchpausen können. Zu den Auswirkungen auf die Anlage gehören Erdoberflächenverschiebung, sowie Oberflächenbrüche an begleitenden/sekundären Verwerfungen.	/IAE 03/ /IAE 10a/ /IAE 04b/
A4	Bodenverflüssigung, Dehnung	Kennzeichnend ist der Verlust der Schubfestigkeit des Baugrunds und dessen Auswirkungen auf Bauwerke, unterirdische Installationen (z. B. Rohrleitungen und Kabelkanäle)	/WEN 13/ /IAE 03/ /IAE 04b/
A5	Seismisch bedingte Setzung	Setzungen des Baugrunds durch Seismizität und deren Auswirkungen auf Bauwerke, unterirdische Installationen (z. B. Rohrleitungen und Kabelkanäle), sowie Risse der Erdoberfläche	/WEN 13/ /IAE 10a/
A6	Permanente Bodenverschiebung nach Erdbeben, die ganze Landteile betreffen kann	Langzeitliche (bzgl. der Erdgeschichte) bzw. permanente (bzgl. der Nutzungszeit des Kernkraftwerks) Bodenverschiebung (Geländesetzung oder -hebung) nach Erdbeben, die ganze Landteile betreffen kann (d. h. nicht nur die definierte Bruchfläche)	/IAE 10a/

**Tab. 2.3** Gruppe B 'Hochwasser und hydrologische Einwirkungen'

Nr.	Einwirkung	Kommentar	Quelle
B1	Tsunamiwelle (durch Seismizität, Vulkanismus, Unterseerutschungen, Meteoriteneinschlag)	Tsunamiwellen verursacht durch Seismizität, Vulkanismus, Unterseerutschungen oder Meteoriteneinschlag. Die Phänomene selbst werden separat behandelt Erdbeben (A1), Erdbeben (F1, F2), Vulkanismus (F9, F10) und D2.	/WEN 13/ /IAE 04/ /IAE 03a/ /IAE 11a/ /IAE 03e/
B2	Sturzflut durch lokal extreme Niederschläge	Aufgrund hoher Niederschlagsdichte (z. B. Starkregen) oder zeitlich langanhaltende Niederschläge	/WEN 13/ /IAE 03/ /IAE 03/ /IAE 03a/ /IAE 11a/ /IAE 03e/
B3	Hochwasser durch Schneeschmelze	Aufgrund großer Schmelzwassermengen durch schnelles Abschmelzens von Schnee- oder Eismassen oder/und großer Volumina jener. Schnelle Schneeschmelzen aufgrund Vulkanismus werden unter F9 behandelt.	/IAE 03/ /IAE 03c/ /IAE 03d/ /IAE 03a/ /IAE 03e/
B4	Hochwasser durch extreme Niederschläge außerhalb des Anlagengeländes, was jenes jedoch erreicht	Hochwasser durch Wasser aus extremen Niederschlägen außerhalb des Anlagengeländes, was jenes jedoch erreicht	/IAE 03c/ /IAE 03a/ /IAE 11a/ /IAE 03e/
B5	Extremer Grundwasseranstieg	Extremer Grundwasseranstieg, der zu Schäden an der Anlage führen kann	/WEN 13/ /IAE 11a/
B6	Hoch- oder Niedrigwasser durch Behinderung von Flussläufen	Hochwasser durch Behinderung von Flussläufen (z. B. durch Hangrutsch, Eisbarrieren, Treibgut, Vulkanismus, Wasseranstauung aufgrund Schlamm, Geröll und sonstigem Unrat)	/IAE 03c/ /IAE 03a/ /IAE 03e/
B7	Hoch- oder Niedrigwasser durch natürlich bedingte Veränderung des Flusslaufs	Hochwasser durch natürlich bedingte Veränderung des Flusslaufs aufgrund Erosion oder Sedimentation, Stromumleitung	/IAE 03/ /IAE 03c/ /IAE 03a/ /IAE 03e/
B8	Hochwasser durch hohe Wellen in Binnengewässern aufgrund Vulkanismus, Hangrutschung und Lawine	Hochwasser durch sehr hohe Wellen in Binnengewässern aufgrund Vulkanismus, Hangrutschung und Lawinen. windbedingte Wellen werden separat behandelt	/IAE 03c/ /IAE 03a/
B9	Hoch- oder Niedrigwasser und Wellen durch Versagen von Wasserregulierungssystemen oder Wasserrückhaltungsanlagen (z. B. Dämme, Deiche oder natürliche Uferdämme)	Hochwasser und Wellen durch Versagen von Wasserregulierungssystemen oder Wasserrückhaltungsanlagen (z. B. Dämme, Deiche oder natürliche Uferdämme) aufgrund natürlicher Ursachen (z. B. hydrologisch oder seismisch).	/WEN 13/ /IAE 03/ /IAE 03a/ /IAE 11a/

Nr.	Einwirkung	Kommentar	Quelle
B10	Seiche (Schaukelwelle durch Resonanzschwingung)	Es handelt sich um schwankende Höchstwasserstände infolge sogenannter. stehender Wellen, d. h. ihre Auslenkung bleibt an bestimmten Stellen immer bei null. Das Phänomen kann in geschlossen oder teilgeschlossen Wasserkörpern, wie Seen, Buchten oder Hafenbecken, auftreten.	/WEN 13/ /IAE 04/ /IAE 03/ /IAE 03a/ /IAE 03e/ /NRC 12/
B11	Bore durch Tide (extreme flussaufwärts laufende Gezeitenwelle an Flussmündungen)	Es handelt sich um eine extreme flussaufwärts laufende Gezeitenwelle an Flussmündungen und beschränkt sich auf Regionen, in denen der Tidenhub besonders stark ist. Spezielle Mündungsformen und Gezeiten können ihre Entstehung begünstigen. Boren können als einzelne Welle auftreten oder auch von mehreren kleineren Wellen gefolgt werden. Dies Phänomen kann aber auch durch die Wasserwirtschaft verursacht werden, was an dieser Stelle nicht Gegenstand ist.	/IAE 03c/ /IAE 11a/
B12	Gezeitenhochwasser, Springflut	Die Gezeiten werden durch Gravitationskräfte von Mond und Sonne beeinflusst. Wenn Mond und Sonne in einer Linie mit der Erde stehen, tritt die maximale Anziehungskraft auf, was als Springflut bezeichnet wird. Dabei werden besonders hohe Wasserstände erreicht.	/WEN 13/ /IAE 03/ /IAE 03/ /IAE 11a/ /IAE 03e/
B13	Sturmbedingte Wellen und Monsterwellen in Meeren, Seen und Flüssen	Es handelt sich um sturmbedingte Wellen in Meeren, Seen und Flüssen einschließlich Monsterwellen. Auch letztere können auf Küsten treffen und benötigen zur Entstehung auch Wind.	/WEN 13/ /IAE 03/ /IAE 03/ /IAE 03a/ /IAE 11a/
B14	Sturmflut	Es handelt sich um ein Zusammenwirken von astronomischen Gezeiten (schlimmstenfalls Springflut) und Windeinwirkung in Küstenrichtung. Besonders gefährlich sind dabei lang-anhaltende Stürme und trichterförmige Küstenteile.	/WEN 13/ /IAE 03/ /IAE 03/ /IAE 03a/ /IAE 11a/ /IAE 03e/ /NRC 12/
B15	Salzwasserkontakt und resultierende Korrosion	Durch Salzwasser verursachte Korrosion an BSK der Anlage, infolge höherer Wasserstände als normal. Beinhaltet sowohl von Salzwasser überflutete BSK, als auch durch Wellen, Sprühnebel oder sonstige benetzte BSK.	/IAE 10/

Nr.	Einwirkung	Kommentar	Quelle
B16	Instabilität von Küstenregionen durch Erosion aufgrund starker Wasserströmungen oder Sedimentation (Meer oder Flüsse)	Instabilität von Küsten- und Uferregionen durch Erosion aufgrund starker Wasserströmungen oder Sedimentation an Meeren und Flüssen.	/IAE 03/ /IAE 10/ /IAE 11a/
B17	Wassertreibgut (Schlamm, Geröll und Unrat)	Nichtbiologisches (Unter-) wasser-treibgut, wie Sedimentationen (z. B. Schlamm), Geröll und Unrat, was zur Beeinträchtigung der Kühlwasserzu- oder -abfuhr hinsichtlich Unverfügbarkeit der gesicherten Nebenkühlwasserversorgung führen kann.	/IAE 03a/

**Tab. 2.4** Gruppe C 'meteorologische Einwirkungen'

Nr.	Einwirkung	Kommentar	Quelle
C1	Niederschlag (Regen, Schnee, Hagel) häufig, langzeitlich, große Mengen in kurzer Zeit	Niederschläge (Regen, Schnee, Hagel) die durch häufiges oder/und langzeitiges Auftreten oder/und aufgrund großer Niederschlagsmengen (Platzregen) zu großen Wassermengen, Schneehöhe und Schäden an Bauwerken und Infrastruktur führen können. Hochwasser durch Starkregen oder Schneeschmelze werden separat in der Gruppe 'Hochwasser' behandelt.	/IAE 03/ /IAE 10/ /IAE 11a/
C2	Extreme Lufttemperaturen (heiß oder kalt)	Extrem hohe oder niedrige Lufttemperaturen, die die Anlage z. B. durch Versagen des Lüftungssystems (heiß) oder Einfrieren von Rohrleitungen beeinflussen können. Vereisung selbst ist in C10 behandelt.	/WEN 13/ /IAE 04/ /IAE 03/ /IAE 03a/ /IAE 10/ /IAE 11a/
C3	Extreme Bodentemperaturen (heiß oder kalt)	Extrem hohe oder niedrige Bodentemperaturen, die die Anlage beeinflussen können, z. B. Einfrieren von unterirdischen Rohrleitungen. Extremere Bodenfrost wird unter C14 behandelt.	/WEN 13/
C4	Extreme Wassertemperaturen (heiß oder kalt)	Jegliche Auswirkungen auf die Anlage infolge extrem hoher oder niedriger Wassertemperaturen, außer Eis, was in C24 und C25 behandelt ist	/WEN 13/ /IAE 10/ /IAE 11a/
C5	Extreme Feuchtigkeit (hoch oder niedrig)	Auswirkungsmöglichkeiten von extrem hoher oder niedriger Feuchtigkeit auf sicherheitstechnisch wichtige BSK (z. B. Kondensation in elektrischen und elektronischen Geräten)	/WEN 13/ /IAE 03a/ /IAE 11a/

Nr.	Einwirkung	Kommentar	Quelle
C6	Extremer Luftdruck	Auswirkungsmöglichkeiten von extrem hohem oder niedrigem Luftdruck bzw. schnellen Luftdruckänderungen auf die Druckmanometer (z. B. im Containment), die zu unbeabsichtigten Vorgängen führen könnten.	/WEN 13/ /IAE 10/
C7	Extreme Dürre: niedriger Fluss- oder Seewasserstand	Extreme Dürreperioden, die zu niedrigem Wasserstand von Flüssen, Seen usw. führen, und somit die Verfügbarkeit von Kühlwasser beeinträchtigen können. Hohe Luft- und Wassertemperaturen sind separat in C2 bzw. C4 behandelt, sowie niedriger Grundwasserstand in C8.	/WEN 13/ /IAE 10/
C8	Niedriger Grundwasserstand	Niedriger Grundwasserstand, der die Verfügbarkeit von Kühlwasser beeinträchtigen könnte.	
C9	Niedriger Meerwasserstand	Enthalten sind niedrige Tidewasserstände, Offshore-Winde, hoher Luftdruck und anormale Änderungen in den Trendentwicklungen	/WEN 13/ /IAE 03d/ /KUR 14/
C10	Vereisung	Vereisung durch gefrierenden Regen oder Nebel. Hier sind Vergrößerungen der Lasten auf BSK (z. B. Vereisung von Kabeln und Schaltanlagen, Bauwerken) zu berücksichtigen, sowie Blockieren der Lüftung.	/WEN 13/ /IAE 11a/
C11	Raureif, Reif	Auswirkungen von Raureif, Reif auf die Anlage einschließlich Schaltanlagen, elektrische Leitungen sowie Blockieren der Lüftung	/IAE 10/
C12	Hagel	Extremer Hagel, der Schäden an der Anlage verursachen könnte, insbesondere durch Hagellasten und große Hagelkörner. Hochwasser durch Hagelschmelzen ist unter C2 und C3 berücksichtigt, mögliche Auswirkungen auf die gesicherte Nebenkühlwasserversorgung unter C24.	/WEN 13/ /IAE 10/ /IAE 11a/
C13	Permafrost	Auswirkungen hinsichtlich des Auftauens und erneuten Einfrierens bei Permafrost auf die Anlage	/WEN 13/ /IAE 04b/
C14	Wiederkehrender Bodenfrost	Auswirkungen von wiederkehrendem Bodenfrost auf die Anlage insbesondere unterirdische Leitungen (z. B. für Wasser)	/IAE 10/

Nr.	Einwirkung	Kommentar	Quelle
C15	Blitz (einschließlich elektromagnetischer Störungen)	Schädigung der Anlage durch Blitze (mechanischer Schaden und Überspannung, einschließlich elektromagnetischer Störungen (englisch: electromagnetic interference (EMI))). Die Auswirkungen können z. B. Bauwerksschäden sein oder der Verlust der externen Stromversorgung.	/WEN 13/ /IAE 03/ /IAE 02/ /IAE 10/ /IAE 11a/ /IAE 03e/
C16	Starke Winde, Sturm einschließlich Hurrikane, tropischer Zyklon, Taifun)	Starke Winde, Sturm (einschließlich Hurrikane, tropische Zyklone, Taifun), die durch direkte Einwirkung Schäden an der Anlage hervorrufen können. Hier gar nicht enthalten sind Tornados (C17) aufgrund ihrer anderen Charakteristik. Ebenfalls separat behandelt werden die differenzierten Auswirkung von Sturmflut (B14), Salzsprühnebel bzw. Salzsturm (C19), Schneesturm (C20), Sandsturm (C21) und Trümmerflug durch Windböen (C22); ihre Windlasten sind jedoch hier zu berücksichtigen.	/WEN 13/ /IAE 04/ /IAE 03/ /IAE 10/ /IAE 11a/ /IAE 03e/
C17	Tornado	Schäden an der Anlage durch Tornados, einschließlich der Druckdifferenzen und rotierenden Winde. Starke Wind usw. werden separat in C16 behandelt, auf Grund ihrer unterschiedlichen Charakteristik (Dauer, Windgeschwindigkeit, und Eintrittshäufigkeit). Auf Schädigung durch Trümmerflug durch Windböen wird ebenfalls separat unter C22 eingegangen.	/WEN 13/ /IAE 04/ /IAE 10/ /IAE 11a/ /IAE 03e/
C18	Wasserhose	Auswirkungen auf die Anlage hinsichtlich der Rotationsenergie von Wasserhosen (einschließlich Wasserdampf). Ausgenommen sind Wasserstrahl und Eis.	/WEN 13/ /IAE 03e/
C19	Schneesturm	Auswirkungen von Schneestürmen auf die Anlage einschließlich außen befindlicher Hochspannungs-BSK und Blockierung des Lufteinlasses	/IAE 04/
C20	Sandsturm	Auswirkungen von wind- bzw. sturmbedingtem Sand oder Staub und deren abrasiven Effekten auf die Anlage einschließlich außen befindlicher Hochspannungs-BSK und Blockierung des Lufteinlasses	/WEN 13/ /IAE 03a/ /IAE 10/ /IAE 11a/ /IAE 03e/

Nr.	Einwirkung	Kommentar	Quelle
C21	Salzsprühnebel, Salzsturm	Salzsprühnebel, Salzstürme, die Salzablagerungen auf BSK und Korrosion verursachen (einschließlich außen befindlicher Hochspannungs-BSK) sowie dielektrischer Durchschlag (sogenannter Körperchluss) durch Salzpartikel	/WEN 13/ /IAE 03a/ /IAE 10/ /KUR 14/
C22	Trümmerflug durch Wind und Tornados	Auswirkungen auf die Anlage von Trümmerflug durch Wind und Tornados (z. B. Verkleidungsbleche, Bretter, Gerüststangen, Bäume, Autos, etc.)	/IAE 11a/
C23	Schneelawine	Auswirkungen auf die Anlage durch Schneelawinen, die z. B. durch starken Schneefall oder Schneeschmelze ausgelöst werden.	/WEN 13/ /IAE 10/ /IAE 03e/
C24	Oberflächeneis auf Gewässern	Oberflächeneis auf Gewässern, das Schäden am Kühlwasserzulauf oder -ablauf bzw. dessen Zusetzen hinsichtlich Unverfügbarkeit der gesicherten Nebenkühlwasserversorgung verursachen kann. Treibeis und dicke Oberflächeneisschichten sind hier eingeschlossen. Nadeleis und Schelfeis sind in C25 bzw. C26 behandelt.	/IAE 10/
C25	Nadeleis	Bei Nadeleis handelt es sich um eine Ansammlung von nadelförmigen Eiskristallen in flüssigem Wasser. Es entsteht i. A. sporadisch in unterkühltem Wasser (z. B. in Flüssen, Seen und Ozeanen bei Lufttemperaturen unter – 6 °C. Es könnten Schäden an Staubauwerken, Kühlwasserzulauf oder dessen Zusetzen bewirken.	/IAE 10/
C26	Schelfeis (Eisfront)	Schelfeis (Eisfront), das sich auf die Anlage auswirkt, z. B. durch Blockieren des Kühlwasserzulaufs	/IAE 10/
C27	Nebel, Rauch	Auswirkungen infolge Nebel oder Rauch auf die Anlage, elektrische Leitungen und Freiluftschaltanlagen, einschließlich reduzierter Sicht auf der Anlage	/WEN 13/ /IAE 10/

**Tab. 2.5** Gruppe D 'extraterrestrische Einwirkungen'

Nr.	Einwirkung	Kommentar	Quelle
D1	Sonneneruption und Folgen	Sonneneruption und Folgen (z. B. koronale Massenauswürfe (englisch: coronar mass ejection (CME)), Sonnensturm (englisch: solar particle event (SPE)), elektromagnetischen Störungen (EMI))	/WEN 13/ /IAE 02/
D2	Meteoriteneinschlag und Folgewirkungen	Natürliche Himmelskörper des Weltalls, die - oder deren Teile - die Anlage direkt durch ihren Einschlag oder indirekt (z. B. durch Druckwelle) beschädigen können. Ausgenommen sind hier Satelliten.	/WEN 13/ /IAE 10/ /KUR 14/

**Tab. 2.6** Gruppe E 'biologische Einwirkungen einschließlich Befall'

Nr.	Einwirkung	Kommentar	Quelle
E1	Wasserpflanzen, biologischer Bewuchs in Gewässern	Starkes Auftreten von Wasserpflanzen (z. B. Seegras, Algen), Bakterien, biologischem Bewuchs und Sonstigem in Gewässern, was zur Unverfügbarkeit der gesicherten Nebenkühlwasserversorgung führen kann.	/WEN 13/ /IAE 03a/
E2	Schalen- oder Weichtierzunahme (Schrimps, Muscheln, Schnecken)	Starkes Auftreten von Wasserpflanzen (z. B. Seegras, Algen), Bakterien, biologischem Bewuchs und Sonstigem in Gewässern, was zur Unverfügbarkeit der gesicherten Nebenkühlwasserversorgung führen kann.	/WEN 13/
E3	Fische, Quallen	Unverfügbarkeit der gesicherten Nebenkühlwasserversorgung durch Fische, Quallen oder deren anormale Population. Zusetzen durch Wasserpflanzen, biologischem Bewuchs in Gewässern (E1) und biologischem Treibgut (E6) wird separat behandelt.	/WEN 13/ /IAE 03a/ /IAE 10/
E4	Flugschwärme (Insekten, Vögel) oder Blätter	Schäden an der Anlage durch Vögel, die den Lufteinlass zusetzen, oder Blätter sowie Insekten, die das Belüftungssystem (z. B. die Filter) verstopfen.	/WEN 13/ /IAE 03a/

Nr.	Einwirkung	Kommentar	Quelle
E5	Nagetierplage oder andere Tiere	Schäden an Kabeln und Drähten durch Nagetierplage (Ratten, Mäuse) oder andere Tiere, sowie das Unterhöhlen von Bauwerken durch grabende Tiere.	/WEN 13/ /IAE 03a/
E6	Biologisches Treibgut (Baumstämme, Blätter, Gras, Kadaver etc.)	Unverfügbarkeit der gesicherten Nebenkühlwasserversorgung durch biologisches Treibgut (Baumstämme, Blätter, Gras, Kadaver etc.) in großen Ansammlungen	/ASA 13/
E7	Mikrobiologische Korrosion	Schäden an der Anlage durch mikrobiologische Korrosion	/ASA 13/

**Tab. 2.7** Gruppe F 'geologische Einwirkungen'

Nr.	Einwirkung	Kommentar	Quelle
F1	Subärische Hanglabilität (Erdbeben, Felssturz; einschließlich meteorologisch und seismisch ausgelöster Ereignisse)	Auswirkungen auf die Anlage durch subärische Hanglabilität (Erdbeben, Felssturz; einschließlich meteorologisch und seismisch ausgelöster Ereignisse) einschließlich Unverfügbarkeit der gesicherten Nebenkühlwasserversorgung aufgrund Behinderung der Kühlwasserzu- oder abfuhr. Separat wird behandelt: Massive Rutschungen die zu Hochwasser, die Hoch- oder Niedrigwasser durch Behinderung von Flussläufen (B6) und daraus resultierende Tsunamiwellen (B1)	/IAE 03/ /IAE 10/ /IAE 04/ /IAE 03e/
F2	Unterwasser- Erdbeben, Gravitationsfließen (einschließlich seismisch bedingter Ereignisse)	Auswirkungen auf die Anlage durch Unterwassererdbeben und Gravitationsfließen (einschließlich erdbebenbedingter Ereignisse). Unterwassererosion wird separat in B16 behandelt, sowie resultierende Tsunamis in B7.	/IAE 10/
F3	Muren, Schuttströme (einschließlich seismisch bedingter Ereignisse)	Auswirkungen auf die Anlage durch Muren oder Schuttströme (einschließlich erdbebenbedingter Ereignisse). Die Auswirkungen können auch Behinderung der Kühlwasserzu- oder abfuhr sein. Pyroklastische Ströme (Lahar) werden separat in F9 'vulkanische Einwirkungen' behandelt.	/IAE 04b/
F4	Bodensetzungen (aus natürlicher Ursache)	Auswirkungen auf die Anlage durch Bodensetzungen (aus natürlicher Ursache)	/WEN 13/ /IAE 03/ /IAE 04b/

Nr.	Einwirkung	Kommentar	Quelle
F5	Bodenhebungen	Auswirkungen auf die Anlage durch Bodenhebungen (aus natürlicher Ursache)	/WEN 13/ /IAE 10/ /IAE 04b/
F6	Karst, saugendes oder lösliches Gestein (Kalkstein, Gips, Anhydrit, Steinsalz)	Auswirkungen auf die Anlage durch Karst, saugendes oder lösliches Gestein (Kalkstein, Gips, Anhydrit, Steinsalz) durch z. B. Klüfte, Spalten, Sinklöcher, unterirdische Wasserläufe, Kavernen. Karst steht für die Gesamtheit der Formen von durchlässigen, wasserlöslichen Gesteinen, die durch Oberflächen- und Grundwasser ausgelaugt werden (Verkarstung). Durch Lösungsvorgänge kommt es zur Korrosion der Gesteine. Unterirdische Karsterscheinungen sind oft auch weit verzweigte Höhlen sowie unterirdische Flussläufe, Karstseen und Karstquellen.	/WEN 13/ /IAE 10/ /IAE 04b/
F7	Sinklöcher (Einsturz von natürlichen oder künstlichen Kavernen)	Auswirkungen auf die Anlage durch unterirdische Einstürze von natürlichen oder künstlichen Kavernen.	/WEN 13/ /IAE 03/ /IAE 04b/
F8	Nichttragfähiger Boden (z. B. Fließton)	Auswirkungen auf die Anlage durch nichttragfähigem Boden (z. B. Fließton)	/WEN 13/
F9	Vulkanische Einwirkungen: Phänomene nahe dem Vulkanzentrum		/WEN 13/ /IAE 03a/ /IAE 12a/ /IAE 04b/ /IAE 03e/
F10	Vulkanische Einwirkungen: Phänomene fern dem Vulkanzentrum		/WEN 13/ /IAE 03a/ /IAE 12a/
F11	Methanaustritt		/ASA 13/
F12	Natürliche Strahlung		/ASA 13/

**Tab. 2.8** Gruppe H 'naturbedingter Brand'

Nr.	Einwirkung	Kommentar	Quelle
H1	Brand von Wald, Grasnarbe, Torf, Großflächenbrand	Natürlich ausgelöster Brand von Wald, Grasnarbe (z. B. Steppe, Heide), Torf, Großflächenbrand usw., z. B. durch extreme meteorologische Bedingungen (hohe Temperaturen, Dürre), Meteoriteneinschlag oder Vulkanismus. Diese Einwirkung enthält neben Funkenflug, Übergreifen auf die Anlage auch Rauch, Gift- und Verbrennungsgase. Brand aus menschlicher oder technischer Ursache hier nicht enthalten.	/IAE 03a/ /IAE 10/

Die zivilisatorischen Einwirkungen lassen sich in folgende Untergruppen unterteilen:

- Industrieunfälle,
- Militärunfälle,
- Transportunfälle,
- Pipelineunfälle,
- Flugunfälle,
- sonstige zivilisatorische Einwirkungen.

Auf Grund der geringen Anzahl von Einwirkungsarten in den Untergruppen wird auf eine Unternummerierung verzichtet, alle zivilisatorischen Einwirkungen werden in der Gruppe Z zusammengefasst.

**Tab. 2.9** Gruppe Z 'zivilisatorische Einwirkungen'

Nr.	Einwirkung	Kommentar	Referenz
Z1	Industrieunfall: Explosion		/IAE 03a/ /IAE 02/ /IAE 03e/
Z2	Industrieunfall: Chemische Freisetzung (explosive, entzündliche, Sauerstoff verdrängende oder verzehrende, giftige, korrosive oder radioaktive Stoffe)		/IAE 10/ /IAE 03e/

Nr.	Einwirkung	Kommentar	Referenz
Z3	Industrieunfall: Bruchstücken von rotierenden hochenergetischen Geräten		/IAE 02/ /IAE 10/
Z4	Militäreinrichtungen (permanente und temporäre): Explosion, Projektile, Flugkörper, Feuer		/IAE 02/
Z5	Militäreinrichtungen (permanente und temporäre): Chemische Freisetzung (explosive, entzündliche, Sauerstoff verdrängende oder verzehrende, giftige, korrosive oder radioaktive Stoffe)		/IAE 02/
Z6	Militäraktivitäten (z. B. Explosion, Feuer, Drohnen etc.)		/ASA 13/
Z7	Schiffsunfall: Direkte Einwirkung		/IAE 02/ /IAE 03e/
Z8	Schiffsunfall: Kollision mit Wassereinlaufbauwerk und/oder Komponenten der gesicherten Nebenkühlwasserversorgung (Schiff, Ponton, Fischernetze)		/IAE 03a/ /IAE 02/ /IAE 03e/
Z9	Schiffsunfall: Freisetzung von Feststoffen oder Flüssigkeiten (keine Gase)		/IAE 03a/ /IAE 02/
Z10	Überlandtransportunfall: Direkte Einwirkung		/IAE 02/
Z11	Transportunfall: Explosion		/IAE 02/ /IAE 10/ /IAE 03e/
Z12	Transportunfall: Chemische Freisetzung (explosive, entzündliche, Sauerstoff verdrängende oder verzehrende, giftige, korrosive oder radioaktive Stoffe)		/IAE 03a/ /IAE 02/ /IAE 10/ /IAE 03e/
Z13	Externer Pipelineunfall: Explosion, Feuer		/IAE 02/ /IAE 10/
Z14	Externer Pipelineunfall: Chemische Freisetzung		/IAE 02/ /IAE 10/
Z15	Flugzeugabsturz: Flughafenbereich		/IAE 03a/ /IAE 02/ /IAE 03e/
Z16	Flugzeugabsturz: Flugverkehrskorridore und Flugzonen, zivil und militärisch)		/IAE 03a/ /IAE 02/ /IAE 03e/

Nr.	Einwirkung	Kommentar	Referenz
Z17	Satellitenabsturz	Technische Himmelskörper (vorrangig Satelliten oder deren Teile), die die Anlage direkt durch ihren Einschlag oder indirekt (z. B. durch Bodenerschütterungen, Druckwelle) beschädigen können.	/IAE 03a/
Z18	Drohnenabsturz (ziviler Drohnen)	Unfallbedingte Abstürze von so genannten Drohnen (z. B. Transportdrohnen, Erste-Hilfe-Drohnen)	/ASA 13/
Z19	Erd- und Bauarbeiten		/IAE 10/ /KUR 14/
Z20	Fremdnetzstabilität		/ASA 13/
Z21	Industrielle Verunreinigung von Isolierungen von Hochspannungsschaltanlage und -leitungen		/ASA 13/
Z22	Elektromagnetische Beeinflussung (EMI), Funkfrequenzbeeinflussung oder Fremdstörungen	Zivilisatorisch verursachte elektrische oder magnetische Felder sowie magnetische Störungen und Funkstörungen. Wichtige Beispiele sind solche Felder, die Radar-, Funk- oder Mobilfunksystemen zuzuschreiben sind, sowie der Aktivierung von Hochspannungsschaltanlagen.	/IAE 03a/ /IAE 02/ /IAE 10/ /IAE 03e/
Z23	Hochspannungswirbelstrom im Boden durch Fremdquellen	Das Phänomen kann hervorgerufen werden durch Korrosion von unterirdischen metallischen Bodenkomponenten und Erdungsproblemen.	/IAE 02/
Z24	Hochwasser durch Fehlfunktion oder Missbewirtschaftung von Wasserregulierungsbauwerken, oder durch Wellen in Binnengewässern aufgrund Flugzeugabsturz in Gewässer	Hohe Wasserstände und Wasserwellen aufgrund zivilisatorisch verursachter Beschädigung und Fehlfunktionen von Wasserregulierungsbauwerken oder deren Missbewirtschaftung (z. B. zu spätes Schließen von Wehranlagen, Versagen von Schleusen oder Dämmen durch unzureichende oder fehlerhafte Instandhaltung)	/IAE 10/
Z25	Brand durch menschliche/ technologische Aktivitäten (einschließlich Brand von Wald, Grasnarbe, Torf und Großflächenbrand)	Die Entstehungsursache ist außerhalb des Anlagengeländes aufgrund menschlicher oder technologischer Aktivitäten. Brand von Wald, Grasnarbe (z. B. Steppe, Heide), Torf, Großflächenbrand usw., z. B. durch Zigaretten, Brandstiftung, Autounfälle, Satellitenabsturz etc. Diese Einwirkung enthält neben Funkenflug, Übergreifen auf die Anlage auch Rauch, Gift- und Verbrennungsgase. Brand aus natürlicher Ursache hier nicht enthalten.	/IAE 10/ /KUR 14/

Nr.	Einwirkung	Kommentar	Referenz
Z26	Verklauung (z. B. durch Treibholz)	Verklauung ist die teilweise oder vollständige Verschießung von Fließgewässerquerschnitten aufgrund angeschwemmten Totholzes, Treibgutes usw. Folgeereignisse können Ausuferungen und/oder Überschwemmungen sein. Verklauungen entstehen vorrangig an Gewässerengstellen, wie Durchlässen, zwischen Brückenpfeilern oder an verrohrten Bachstrecken. Hohes Gefahrenpotenzial liegt bei Verklauungen in Hochwasserentlastungsanlagen von Talsperren oder in deren Grundablässen vor.	/WEN 13/
Z27	Bore durch Wasserwirtschaft (extreme flussaufwärts laufende Wellen an Flussmündungen)	Es handelt sich um eine extreme flussaufwärts laufende Welle an Flussmündungen, die durch die Wasserwirtschaft verursacht werden. Spezielle Mündungsformen können ihre Entstehung begünstigen. Boren können als einzelne Welle auftreten oder auch von mehreren kleineren Wellen gefolgt werden. Gezeiten sind ebenfalls Entstehungsursache, was unter einem anderen Punkt behandelt wird.	/IAE 03c/ /IAE 11a/
Z28	Hoch- oder Niedrigwasser beeinflusst durch Bauwerke des Menschen (Wellenbrecher, Molen, Landungszungen)	Hoch- oder Niedrigwasser (in Meer, See oder Fluss) beeinflusst durch Bauwerke des Menschen (Wellenbrecher, Molen, Landungszungen)	/IAE 03d/ /IAE 11a/
Z29	Bodensetzungen (aus menschlicher Ursache z. B. Bergbau, Grundwassersenkung, Öl- und Gasförderung)		/WEN 13/ /IAE 03/ /IAE 04b/

### Übergreifende Einwirkungen von innen (EVI)

Gemäß den 'Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke' /BMU 15/ handelt es sich um Einwirkungen, die aus Ereignissen auf dem Anlagengelände, innerhalb oder außerhalb von Gebäuden, (z. B. anlageninterner Brand, anlageninterne Überflutung) resultieren.

Übergreifende Einwirkungen von innen sind nicht standortabhängig, jedoch abhängig von Kraftwerkstyp und -auslegung. In deutschen PSA werden im Wesentlichen nur Brand und Überflutung als übergreifende Einwirkungen von innen analysiert. Die Auswertung des Fragebogens zur Vorbereitung der Arbeiten in ASAMP\_SA\_E /PIH 14/

zeigt, dass dies auch international in den meisten Fällen so gehandhabt wird. Es wird nur über wenige Ausnahmen im Rahmen von PSA der Stufe 1 berichtet (Lastabstürze, anlageninterne Explosionen, Geschosswirkungen und Rohrleitungsversagen). Zwei von 24 der teilnehmenden Organisationen geben an, dass eine umfassende PSA im Hinblick auf übergreifende Einwirkungen von innen durchgeführt wurde.

**Tab. 2.10** Auflistung der Einwirkungen von innen

Nr.	Einwirkung	Kommentar	Quelle
11	Anlageninterner Brand	Auf Grund der internationalen Unterschiede ist zu definieren, wann ein Brand als übergreifende Einwirkung von innen gilt, z. B. kann die Grenze beim Anlagenzaun gezogen werden. In Deutschland sind alle Brände, die auf dem Anlagengelände, d. h. innerhalb des Anlagenzauns entstehen, als anlageninterner Brand zu analysieren. Der anlageninterne Brand wird grundsätzlich in die Liste $L_{ges}$ aufgenommen, da in /FAK 05/ gefordert.	/IAE 10/ /BMU 15/ /FAK 05/
12	Anlageninterne Überflutung	Die anlageninterne Überflutung wird grundsätzlich in die Liste $L_{ges}$ aufgenommen, da dies in /FAK 05/ gefordert ist.	/IAE 03a/ /IAE 10/ /BMU 15/ /FAK 05/
13	Komponentenversagen mit potenziellen Auswirkungen auf ‚sicherheitstechnisch wichtige Einrichtungen‘		/BMU 15/
14	Leck/Bruch im Frischdampf- oder Speisewassersystem sowie in anderen hochenergetischen Rohrleitungen im Ringraum und in der Armaturenkammer (DWR) bzw. zwischen Sicherheitsbehälter und erster Absperrmöglichkeit außerhalb des Sicherheitsbehälters (SWR)		/BMU 15/ /IAE 04a/
15	Absturz und Anprall von Lasten mit potenzieller Gefährdung sicherheitstechnisch wichtiger Einrichtungen in der Anlage oder auf dem Anlagengelände		/BMU 15/
16	Kollision von Fahrzeugen auf dem Anlagengelände mit sicherheitstechnisch wichtigen baulichen Anlagenteilen, Systemen oder Komponenten		/IAE 10/ /BMU 15/ /IAE 04a/

Nr.	Einwirkung	Kommentar	Quelle
17	Einstürze von Gebäuden bzw. Gebäudeteilen (nicht auf Grund seismischer Einwirkungen!)		/IAE 04a/
18	Anlageninterne Explosionen		/IAE 10/ /BMU 15/
19	Gegenseitige Beeinflussung von Mehrblockanlagen		/IAE 10/ /BMU 15/
110	Elektromagnetische Einwirkungen (einschließlich Funkbeeinflussung)		/IAE 03a/ /IAE 02/ /IAE 10/ /BMU 15/
111	Hochenergetische elektrische Einwirkungen (z. B. Störlichtbögen)		/IAE 10/ /KTA 15/
112	Geschosswirkungen	einschließlich umherfliegender und fallender Bruchstücke (Trümmer)	/IAE 10/ /IAE 04a/
113	Freisetzung explosiver, entzündlicher, Sauerstoff verdrängender oder verzehrender, giftiger, korrosiver oder radioaktiver Stoffe		/IAE 10/ /IAE 04a/ /BMU 15/
114	Freisetzung radioaktiver Stoffe	Erhöhter Strahlenpegel	/IAE 10/
115	Verlust der externen Stromversorgung	Bei Versagen von BSK auf dem Anlagengelände, die zu einem Ausfall des Fremdnetz führen können (z. B. Masten von Fremdnetzleitungen auf dem Anlagengelände)	/BMU 15/
116	Verlust der internen Stromversorgung	Bei Versagen von BSK oder Vorgängen auf dem Anlagengelände, die zu einem Ausfall der internen Stromversorgung führen können	/DEC 14/
117	Erd- und Bauarbeiten innerhalb des Anlagenzaunes (d. h. auf dem Anlagengelände oder in der Anlage selbst)		/IAE 10/
118	Hochspannungswirbelstrom im Boden durch Fremdquellen	Das Phänomen kann hervorgerufen werden durch Korrosion von unterirdischen metallischen Bodenkomponten und Erdungsproblemen.	/IAE 02/
119	elektrische, leittechnische oder verfahrenstechnische Fehlfunktionen	Dies sind gemäß /BMU 15/ auch Folgewirkungen	/BMU 15/
120	Druckaufbau, Druckdifferenzen	Dies sind gemäß /BMU 15/ auch Folgewirkungen	/BMU 15/

Nr.	Einwirkung	Kommentar	Quelle
I21	Temperatur- und Feuchteanstieg	Dies sind gemäß /BMU 15/ auch Folgewirkungen	/BMU 15/
I22	Strahl- und Reaktionskräfte	Dies sind gemäß /BMU 15/ auch Folgewirkungen	/BMU 15/

### 2.2.1.2 Kombinationen übergreifender Einwirkungen

Die Aufgabe des Vorhabens ist es unter anderem aufzuzeigen, welche externen übergreifenden Einwirkungen das Potenzial einer Überlagerung haben. Gemäß den 'Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke' /BMU 15/ sind bei Einwirkungen von innen und außen folgende Kombinationen zu berücksichtigen:

„Kombinationen mehrerer zu unterstellender Einwirkungen von außen (z. B. Erdbeben, Hochwasser, Sturm, Blitz) sowie aus Notstandsfällen untereinander oder Kombinationen dieser Einwirkungen mit anlageninternen Ereignissen (z. B. Rohrleitungsbruch, Brände in der Anlage, Notstromfall). Diese Kombinationen müssen dann unterstellt werden, wenn die zu kombinierenden Ereignisse in einem kausalen Zusammenhang stehen können oder wenn ihr gleichzeitiges Eintreten auf Grund der Wahrscheinlichkeit und des Schadensausmaßes in Betracht zu ziehen ist.“

Daran orientiert sich z. B. auch der aktuelle Regeländerungsentwurf der KTA 2101.1 für Brand /KTA 15/. Dort heißt es:

*„Kombinationen eines Brandes mit einem anderen Ereignis müssen dann unterstellt werden, wenn die zu kombinierenden Ereignisse in einem kausalen Zusammenhang stehen oder wenn die Gleichzeitigkeit der Ereignisse auf Grund der Wahrscheinlichkeit und des Schadensausmaßes in Betracht gezogen werden muss.“*

Folgende Kombinationsarten sind diesbezüglich nach KTA 2101.1 /KTA 15/ zu unterscheiden:

- Kombination kausal abhängiger Ereignisse:
  - Brand und daraus folgendes Ereignis,
  - angenommenes Ereignis und daraus folgender Brand,
- Kombination unabhängiger Ereignisse:

- angenommenes Ereignis und davon unabhängiger Brand.

Viele der Ereignisse aus Einwirkungen von außen gehören zu den seltenen Ereignissen. Das Zusammentreffen mehrerer solcher Ereignisse als zufallsbedingte Koinzidenz ist unwahrscheinlich, dass die meisten dieser Ereigniskombinationen in der Vergangenheit ausgeschlossen wurden, sofern nicht weitere, besondere Randbedingungen erfüllt waren. Hierzu wird die Koinzidenz von Ereignissen, die zu einem multiplen Ereignis führen, im Folgenden näher präzisiert:

Eine Kombination von zwei oder mehreren Ereignissen ist immer dann nicht mehr per se zu vernachlässigen, wenn eine Koinzidenz vorliegt, die wie folgt charakterisiert ist:

- Die Dauer von zwei oder mehreren Ereignissen überlappen sich, oder
- ein bzw. mehrere Sekundärereignisse treten nach dem Primärereignis auf, bevor Schäden aus dem primären Ereignis instandgesetzt wurden.

Mit den Schäden aus den primären Ereignissen sind solche Schäden zu diskutieren, die zu einer Schwächung, einem teilweisen oder vollständigen Ausfall von Barrieren und Systemen führen, die zur Beherrschung der sekundären Ereignisse benötigt würden. Nach einer beendeten Instandsetzung bilden das primäre und das sekundäre Ereignis kein multiples Ereignis mehr.

Die unter dem zweiten Spiegelstrich genannte Variante erweitert den Überlappungszeitraum der im ersten Spiegelstrich genannten Variante. Demzufolge sind in die zunächst deterministischen Voruntersuchungen der probabilistischen Analyse folgende Merkmale einzubeziehen:

- Häufigkeit einer Einwirkung von innen oder außen,
- mögliche Schädigung von Barrieren durch andere Einwirkungen von innen oder außen,
- Dauer der Wiederherstellung der Barrieren,
- Mögliche Einschränkungen des Betriebs der Anlage, also z. B. ein Verbot der Leistungsproduktion und das notwendige Halten des abgeschalteten Zustandes.

Soweit die Behebung von Schäden lange andauert, sind somit auch zufallsbedingt auftretende Ereignisse in ihren Kombinationen ggf. individuell zu untersuchen.

Im Folgenden werden kurz einige interessante Ansätze der internationalen Literatur zum Umgang mit Ereigniskombinationen von übergreifenden Einwirkungen aufgezeigt.

### **Vorgehen gemäß der Schweizer Aufsichtsbehörde ENSI**

Das Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) fordert in der Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen ENSI-A05 /ENS 09/, explizit die folgenden Gefährdungen in kombinierter Form zu betrachten:

- „außerordentlich raue Winterbedingungen mit Schnee(-verwehungen), niedrigen Temperaturen und Vereisung,
- ausgeprägt harte Sommerbedingungen mit hohen Temperaturen, Trockenheit, Waldbrand und niedrigem Flusswasserspiegel.“

Diese müssen nicht im PSA-Modell abgebildet werden, wenn qualitativ gezeigt werden kann, dass diese Ereignisse durch andere abgedeckt sind oder eine quantitative Abschätzung eine Kernschadenshäufigkeit  $< 10^{-9}/a$  ergibt.

### **Vorgehen gemäß der schwedischen Aufsichtsbehörde SKI (jetzt SSM)**

Die schwedische Aufsichtsbehörde Swedish Nuclear Power Inspectorate (SKI) – jetzt SSM – beschreibt im SKI Report 02:27 “Guidance for external events analysis“ /KNO 03/ ein Verfahren, wie Kombinationen aus Einwirkungen von außen identifiziert werden können. Nachfolgend sind einige wichtige Informationen in kurzer Form extrahiert und in einem Fazit beurteilt:

- Berücksichtigung möglicher Abhängigkeiten;
- Die kombinierten Ereignisse müssen Auswirkungen auf verschiedene Sicherheitsfunktionen der Anlage haben (z. B. beeinträchtigt ein Ereignis die Energieversorgung, das andere die Kühlwasserversorgung);
- Bei Einwirkung auf dieselbe Sicherheitsfunktion muss der Effekt durch die Kombination größer sein, als bei einzelnen Einwirkungen;
- Die Kriterien für unabhängige Ereignisse gelten auch für potenzielle kombinierte Ereignisse (siehe z. B.: Table 3-1 in /KNO 03/).

Mit den folgenden Kriterien (nach Table 4-1 aus /KNO 03/) können potenzielle Ereigniskombinationen von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen werden:

- Die Ereignisse sind voneinander zeitlich unabhängig und die Wahrscheinlichkeit für ein gemeinsames Auftreten ist gering (/KNO 03/ gibt keinen Hinweis, was mit „gering“ gemeint ist).
- Die Ereignisse sind zeitlich voneinander abhängig und sind bereits durch die Definition eines unabhängigen Ereignisses, das für die Anlage untersucht wird, abgedeckt.
- Die Ereignisse sind zeitlich voneinander abhängig und wirken auf dieselben Sicherheitsfunktionen ein und sind zusammen nicht schwerwiegender als die größte Einwirkung eines unabhängigen Ereignisses.
- Die Kriterien für unabhängige Ereignisse gelten auch für kombinierte Ereignisse. (dieser Punkt widerspricht dem letzten Punkt der obigen Verfahrensliste).

Beispiele für kombinierte auslösende Ereignisse (aus /KNO 03/) sind:

- Trockenheit und starke Winde und Rauch (verursacht durch Waldbrand),
- starke Winde und (Algenbefall oder Wasserverschmutzungen mit Feststoffen),
- starke Winde und Blitzschlag,
- hohe Lufttemperatur und hohe Wassertemperatur,
- Schneefall und starke Winde,
- Schneetreiben und starke Winde,
- Schneetreiben und starke Winde und Nadeleis.

Zusammenfassend kann nach Auswertung der vorgenannten Literatur das Fazit gezogen werden, dass eine anlagenspezifische Liste aller relevanten unabhängigen externen Ereignisse herangezogen werden muss und jene Ereignisse ggf. miteinander kombiniert werden müssen. Um diese Ereignisse sinnvoll miteinander zu kombinieren, sind folgende Kriterien zu beachten:

- Die kombinierten Ereignisse müssen voneinander abhängig sein, oder bei unabhängigen Ereignissen darf die Wahrscheinlichkeit für ein gleichzeitiges Auftreten nicht zu gering sein.

- Die Einwirkungen müssen unterschiedliche Sicherheitsfunktionen beeinflussen.

Hierbei bietet sich die Matrixdarstellung (wie im Beispiel für das Kernkraftwerk Ringhals, siehe /KNO 03/, Appendix 4.1) an.

### **Vorgehen gemäß den Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke /BMU 15/**

Im Anhang 3 der ‘Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke’ /BMU 15/ wird bzgl. der zu berücksichtigenden Kombinationen übergreifender Einwirkungen festgelegt:

*„3.1 (1) Die auf Grund der anlagenspezifischen Gegebenheiten möglichen Einwirkungen von innen sowie deren möglichen Kombinationen untereinander oder mit Einwirkungen von außen sowie aus Notstandsfällen sind vollständig zu erfassen.*

*Hinweis:*

*Beachte hierzu auch in den „Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke“ die Nummern 2.4 und 4.2 sowie in Anhang 5 zu den „Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke“ die Nummern 3.2.1 (3) und 3.2.1 (4).“*

### **Darstellung von Ereigniskombinationen**

Die nachfolgende Einwirkungsmatrix (siehe Tab. 2.11) zeigt mögliche Einwirkungskombinationen für eine fiktive Beispielanlage anhand der Einwirkungslisteliste aus dem PSA-Methodenband /FAK 05/. Kombinationen von Einwirkungen werden dabei mittels Ursachen und Folgen direkt in der Matrix dargestellt. Die Spalten enthalten die Primäreinwirkungen, die Zeilen die Sekundäreinwirkungen.

**Tab. 2.11** Beispiel für eine Ereignismatrix anhand der EVA-Liste aus dem PSA-Methodenband /FAK 05/

K <sub>p,s</sub>		Primäreinwirkung (Einleitende Einwirkung)													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
Sekundäreinwirkung (Folgeeinwirkung)		Flugzeug-absturz	Explosions-druckwelle	Hoch-wasser	Erdbeben	Gas-wolke	Anlagen-externer Brand	Schiffs-kollision mit dem Einlaufbauwerk	Blitz	Sturm	Schnee	Eis	Kombinationen extremer Wettersituationen	biologische Phänomene	
	1	Flugzeug-absturz		-	-	-	-	-	(x)	(x)	-	-	(x)	-	
	2	Explosions-druckwelle	x		-	x	(x)	x	-	(x)	-	-	-	-	
	3	Hochwasser	x	-		x	-	-	-	-	x	-	-	(x)	
	4	Erdbeben	-	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	
	5	Gaswolke	x	x	-	x		x	-	-	-	-	-	-	
	6	Anlagen-externer Brand	x	x	-	x	(x)		-	x	x	x	-	(x)	
	7	Schiffskollision mit dem Einlaufbauwerk	-	-	x	-	-	x		x	x	x	x	(x)	(x)
	8	Blitz	-	-	-	-	-	-	-		NK	-	-	NK	-
	9	Sturm	-	-	-	-	-	-	-	NK		-	-	NK	-
	10	Schnee	-	-	-	-	-	-	-	-	-		NK	NK	-
	11	Eis	-	-	-	-	-	-	-	-	-	NK		NK	-
	12	Kombinationen extremer Wettersituationen	-	-	-	-	-	-	-	NK	NK	NK	NK		-
	13	biologische Phänomene	-	-	x	-	-	-	-	-	x	-	-	(x)	

NK: Natürliche Kausalität (hohe Wahrscheinlichkeit des zeitgleichen Auftretens)

p: Primäreinwirkung (Einleitende Einwirkung)

s: Sekundäreinwirkung (Folgeeinwirkung)

- Flugzeugabsturz führt zu direkter Einwirkung auf die Strukturen und zur
  - Kombination K<sub>1,2</sub>: Explosionsdruckwelle (Treibstoff, Ladung),
  - Kombination K<sub>1,3</sub>: Hochwasser (Aufschlag in Gewässer am Standort kann eine hohe Welle erzeugen),
  - Kombination K<sub>1,5</sub>: Gaswolke (Verbrennungsgase von Treibstoff, Ladung),
  - Kombination K<sub>1,6</sub>: Externer Brand (Treibstoff, Ladung).
- Explosionsdruckwelle führt zu direkter Einwirkung auf die Strukturen und zur
  - Kombination K<sub>2,5</sub>: Gaswolke (Explosionsgase, Verbrennungsgase von in Brand gesetztem Dieseltreibstoff etc.),
  - Kombination K<sub>2,6</sub>: Externer Brand (Entzündung von Dieseltreibstoff, etc.).
- Hochwasser führt zu direkter Einwirkung auf die Strukturen und zur
  - Kombination K<sub>3,7</sub>: Möglicher Schiffskollision mit dem Einlaufbauwerk (Neckar ist schiffbar),
  - Kombination K<sub>3,13</sub>: Biologische Phänomene (Treibgut) mit Beeinträchtigung des Einlaufbauwerkes.
- Erdbeben führt zu direkter Einwirkung auf die Strukturen und zur
  - Kombination K<sub>4,2</sub>: Explosionsdruckwelle,
  - Kombination K<sub>4,3</sub>: Hochwasser durch Beeinträchtigung von Wasserzu- bzw. -ablauf (Erdbeben, Wehrbruch etc.),
  - Kombination K<sub>4,5</sub>: Gaswolke (Verbrennungsgase von in Brand gesetztem Dieseltreibstoff etc.),
  - Kombination K<sub>4,6</sub>: Externer Brand (Entzündung von Dieseltreibstoff etc.).
- Gaswolke kann ggf. führen zur
  - Kombination K<sub>5,2</sub>: Externer Brand (bei Entzündung der Gaswolke),
  - Kombination K<sub>5,6</sub>: Externer Brand (bei Entzündung der Gaswolke)
- Externer Brand kann zu direkter Einwirkung auf die Strukturen führen und zur
  - Kombination K<sub>6,2</sub>: Explosionsdruckwelle,

- Kombination K<sub>6,5</sub>: Gaswolke (Verbrennungsgase von in Brand gesetztem Dieseltreibstoff etc.),
  - Kombination K<sub>6,7</sub>: mögliche Schiffskollision mit dem Einlaufbauwerk durch Rauchentwicklung.
- Schiffskollision mit dem Einlaufbauwerk führt zu keinen kombinierten Ereignissen.
- Blitzschlag führt zu direkter Einwirkung auf die Anlage und zusätzlich zur
- Kombination K<sub>8,1</sub>: Blitzschlag kann auch Flugzeugabsturz herbeiführen (das ein Blitzschlag gleichzeitig eine Einwirkung auf die Anlage ist, ist zwar unwahrscheinlich, aber ein großflächiges schweres Gewitter mit sehr vielen Blitzen könnte sowohl einen Flugzeugabsturz herbeiführen, als auch Einwirkungen auf die Anlage haben),
  - Kombination K<sub>8,2</sub>: Blitzschlag könnte auch Explosionsdruckwellen herbeiführen (wenn z. B. Explosive Stoffe durch einen Blitz entzündet werden),
  - Kombination K<sub>8,6</sub>: externem Brand,
  - Kombination K<sub>8,7</sub>: Schiffskollision mit dem Einlaufbauwerk.
- Sturm führt zu direkter Einwirkung auf die Strukturen und zusätzlich zur
- Kombination K<sub>9,1</sub>: Sturm kann auch einen Flugzeugabsturz herbeiführen,
  - Kombination K<sub>9,3</sub>: Hochwasser (durch Starkregen oder Sturmflut),
  - Kombination K<sub>9,6</sub>: Externer Brand (durch elektrischen Kurz-/Erdschluss, Abriss von Stromleitungen),
  - Kombination K<sub>9,7</sub>: Schiffskollision mit dem Einlaufbauwerk,
  - Kombination K<sub>9,13</sub>: Biologische Phänomene (Treibgut) mit Beeinträchtigung des Einlaufbauwerkes.
- Schnee führt zu direkter Einwirkung auf die Strukturen und zusätzlich zur
- Kombination K<sub>10,6</sub>: Anlagenexterner Brand (durch elektrischen Kurz- oder Erdschluss, Abriss von Stromleitungen),
  - Kombination K<sub>10,7</sub>: Schiffskollision mit dem Einlaufbauwerk (eingeschränkte Sicht).

- Eis führt zu direkter Einwirkung auf die Strukturen und zusätzlich zur
  - Kombination  $K_{11,7}$ : Schiffskollision mit dem Einlaufbauwerk (könnte unter Umständen durch Eis begünstigt werden, z. B. durch Eisfronten oder Treibeis).
- Die Kombinationen extremer Wettersituationen könnte Sekundärereignisse der nachstehende Einwirkungskombinationen auslösen:
  - Kombination  $K_{12,1}$ : Flugzeugabsturz (wetterbedingt),
  - Kombination  $K_{12,3}$ : Hochwasser (wetterbedingt durch z. B. enorme Niederschläge),
  - Kombination  $K_{12,6}$ : Externer Brand (durch große Hitze und Trockenheit),
  - Kombination  $K_{12,7}$ : Schiffskollision mit dem Einlaufbauwerk (eingeschränkte Sicht),
  - Kombination  $K_{12,13}$ : wetterbedingt biologische Phänomene (z. B. Sturm und Starkregen spülen Heu, Blätter, o. ä. in den Kühlwasserzufluss).
- Biologische Phänomene (mit Beeinträchtigung des Einlaufbauwerkes):
  - Kombination  $K_{13,7}$ : Es wird als möglich erachtet, dass biologische Phänomene eine Schiffskollision mit dem Einlaufbauwerk verursachen könnten.

In Bezug auf die so genannte natürliche Kausalität (NK) zwischen beispielsweise 8 (Blitz) und 9 (Sturm) oder 10 (Schnee) und 11 (Eis) ist anzumerken, dass hier nicht in Primär- und Sekundäreinwirkung unterschieden wird, da eine gemeinsame Ursache vorliegen kann. Daher wird die Wahrscheinlichkeit des zeitgleichen Auftretens als hoch erachtet.

Die verschiedenen Möglichkeiten des unabhängigen Eintretens übergreifender Einwirkungen sind in der Korrelationstabelle nicht enthalten. Grundsätzlich wird angenommen, dass nur bei langanhaltenden übergreifenden Einwirkungen überprüft werden muss, ob eine weitere übergreifende Einwirkung in diesem Einwirkungszeitraum unabhängig davon wirksam werden kann. So kann z. B. in einem Sommer während einer langanhaltenden Hitzeperiode ein Erdbeben auftreten. Die Lüftungseinrichtungen sind nicht gegen ein Erdbeben ausgelegt, d. h. man kann davon ausgehen, dass die Lüfter bei einer seismischen Einwirkung ausfallen. Dadurch kann es zu Störungen in relevanten leittechnischen Einrichtungen kommen (Beispiel entnommen aus /GRO 15/), auch

wenn die Anlage aufgrund der kurzfristigen Erdbebenwirkung nicht abgefahren werden muss. In /KUM 15/ wird in derartigen Fällen von einer zeitlich begründeten Abhängigkeit gesprochen, siehe die entsprechende Auswertung der Literaturstelle im Anhang A.1.

Die fachspezifische Analyse möglicher Einwirkungskombinationen ist sehr aufwändig. Dies wird nachstehend am Beispiel Brand illustriert. In der aktuellen Fassung der Brand KTA 2101.1 /KTA 15/ erarbeitete das Fachgremium im Kapitel 3.3 „*Kombinationen eines Brandes mit einem anderen Ereignis*“ folgenden Kenntnisstand zu derartigen Ereigniskombinationen:

### **„3.3 Kombinationen eines Brandes mit einem anderen Ereignis**

#### **3.3.1 Allgemeines**

*(1) Kombinationen eines Brandes mit einem anderen Ereignis müssen dann unterstellt werden, wenn die zu kombinierenden Ereignisse in einem kausalen Zusammenhang stehen oder wenn die Gleichzeitigkeit der Ereignisse auf Grund der Wahrscheinlichkeit und des Schadensausmaßes in Betracht gezogen werden muss.*

*(2) Kombinationen eines Brandes mit einem anderen Ereignis sind ausschließlich hinsichtlich der Einhaltung des in Abschnitt 1 Absatz (2) Aufzählung a) genannten Zieles zu betrachten. Für die zu betrachtenden Kombinationen sind Brandschutzmaßnahmen zu treffen, sofern nicht bereits wirksame und zuverlässige Vorsorgemaßnahmen als getroffen nachgewiesen sind.*

*Hinweis:*

*Diese Forderung konkretisiert das in 3.3.1 (1) genannte Schadensausmaß.*

*(3) Folgende Kombinationen sind zu unterscheiden:*

*a) Kombination kausal abhängiger Ereignisse:*

*aa) Brand und daraus folgendes Ereignis und*

*ab) angenommenes Ereignis und daraus folgender Brand und*

*b) Kombination unabhängiger Ereignisse:*

*Angenommenes Ereignis und davon unabhängiger Brand.*

#### **3.3.2 Kombination kausal abhängiger Ereignisse**

##### **3.3.2.1 Brand und daraus folgendes Ereignis**

*(1) Nachfolgende Kombinationen eines Brandes mit daraus folgendem Ereignis sind zu betrachten:*

*a) Brand und daraus folgendes Komponentenversagen:*

aa) Versagen (einschließlich des hochenergetischen Versagens) elektrischer Komponenten und Einrichtungen.

ab) Versagen mechanischer Komponenten (z. B. schnell rotierende Teile, vorgespannte Federn).

ac) Versagen (einschließlich des hochenergetischen Versagens) druckführender Leitungen und Behälter, deren Eigenversagen nicht ausgeschlossen werden kann.

aca) Bei druckführenden Behältern und Komponenten sowie Anlagenteilen, deren Eigenversagen aufgrund ihrer Qualitätsmerkmale ausgeschlossen werden kann oder deren Versagensart eingeschränkt ist, sind entweder Maßnahmen zur Verhinderung eines Brandes im Bereich dieser Behälter und Komponenten sowie Anlagenteile zu treffen oder es sind Maßnahmen zum Schutz gegen Brandeinwirkung durchzuführen oder es ist nachzuweisen, dass im Falle eines Brandes die Qualitätsmerkmale, die ein Versagen ausschließen oder eine Versagensart einschränken, nicht unzulässig beeinflusst werden.

*Hinweis:*

Solche druckführenden Behälter und Komponenten sind z. B. Reaktordruckbehälter, Dampferzeuger, Druckhalter, Hauptkühlmittelpumpen und Druckspeicher bei Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktoren sowie Reaktordruckbehälter und Schnellabschaltbehälter bei Kernkraftwerken mit Siedewasserreaktoren. Entsprechende Anlagenteile sind z. B. Sicherheitsbehälter, sicherheitstechnisch wichtige Abstützungen und zugehörige bauliche Anlagenteile sowie das Lagerbecken für die abgebrannten Brennelemente. Solche Qualitätsmerkmale können z. B. die Spannungsausnutzung sein. Eine eingeschränkte Versagensart liegt z. B. bei basissicherer Auslegung entsprechend „Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke“ vor.

acb) Bei druckführenden Behältern und Komponenten sowie Anlagenteilen, deren Eigenversagen nicht ausgeschlossen wird, sind entweder Maßnahmen zur Verhinderung eines Brandes zu treffen oder es sind Maßnahmen zum Schutz dieser Behälter und Komponenten sowie Anlagenteile gegen Brandeinwirkung durchzuführen. Alternativ sind Maßnahmen zum Schutz von Einrichtungen des Sicherheitssystems gegen das gleichzeitige Einwirken eines Brandes und eines durch den Brand an den vorgenannten Behältern und Anlagenteilen verursachten Folgeereignisses zu treffen.

b) Brand und daraus folgende anlageninterne Explosion, einschließlich Radiolyse-gasexplosion in Systemen und Komponenten.

### 3.3.2.2 Angenommenes Ereignis und daraus folgender Brand

Nachfolgende Kombinationen eines angenommenen Ereignisses mit daraus folgendem Brand sind zu betrachten:

a) Komponentenversagen und daraus folgender Brand:

aa) Hochenergetisches Versagen (u. a. Störlichtbögen) elektrischer Komponenten und Einrichtungen (z. B. Schaltanlagen, Transformatoren, Hochspannungskabel).

ab) Hochenergetisches Versagen mechanischer Komponenten (z. B. schnell rotierende Teile, vorgespannte Federn).

ac) Hochenergetisches Versagen druckführender Leitungen und Behälter, deren Eigenversagen nicht ausgeschlossen wird. In diesem Zusammenhang braucht

eine Brandentstehung bei Wasserdampffreisetzung nicht unterstellt zu werden.

b) *Anlageninterne Explosion und daraus folgender Brand. Ein aus anlageninterner Explosion folgender Brand, der die Sicherheitsfunktionen unzulässig beeinträchtigt, ist auszuschließen. Eine unzulässige Beeinträchtigung der Sicherheitsfunktionen darf ausgeschlossen werden, wenn die Regelungen in KTA 2103 berücksichtigt werden.*

c) *Erdbeben und daraus folgender Brand:*

ca) *In den baulichen Anlagen, die aufgrund ihrer sicherheitstechnischen Bedeutung gemäß KTA 2201.1 gegen Bemessungserdbeben auszulegen sind, ist im Hinblick auf einen aus Erdbeben folgenden Brand sicherzustellen, dass dessen Auswirkungen ausreichend begrenzt werden, so dass die bestimmungsgemäße Funktion von Sicherheitseinrichtungen nicht unzulässig beeinträchtigt wird. Dies gilt als erfüllt, wenn entweder die Einrichtungen, die bei Verlust ihrer Integrität brennbare Stoffe freisetzen, oder die Einrichtungen, die eine Entzündung ermöglichen können, durch geeignete Werkstoffwahl und Konstruktion gegen Bemessungserdbeben ausgelegt sind. Kann ein Brand nicht ausgeschlossen werden, ist der Schutz der jeweils nach einem Erdbeben erforderlichen Sicherheitsfunktionen durch bauliche Brandschutzmaßnahmen sicherzustellen. Sofern dies aufgrund systemtechnischer oder nutzungstechnischer Erfordernisse nicht möglich ist, muss durch geeignete anlagentechnische Brandschutzmaßnahmen (z. B. Brandmeldeanlage) oder durch eine Kombination dieser Maßnahmen ein gleichwertiger Schutzzustand sichergestellt werden. Die vorgenannten baulichen und anlagentechnischen Brandschutzmaßnahmen sind ihrerseits durch geeignete Baustoff- und Werkstoffwahl sowie Konstruktion gegen Bemessungserdbeben auszulegen. Aufgrund der kurzen Starkbebendauer in Deutschland darf davon ausgegangen werden, dass ein Folgebrand erst nach Abklingen des Erdbebens wirksam wird.*

cb) *Sofern die Anlage für ein Erdbeben mit einer maximalen Intensität des Bemessungserdbebens von I gleich VI (EMS-98) ausgelegt ist, darf auch ohne die Einhaltung besonderer konstruktiver Maßnahmen von der Verfügbarkeit der baulichen und anlagentechnischen Brandschutzmaßnahmen ausgegangen werden.*

d) *Blitzeinwirkung und daraus folgender Brand:*

*Ein aus Blitzeinwirkung folgender Brand, der die Sicherheitsfunktionen unzulässig beeinträchtigt, ist auszuschließen. Eine unzulässige Beeinträchtigung der Sicherheitsfunktionen darf ausgeschlossen werden, wenn die Regelungen in KTA 2206 berücksichtigt werden.*

### **3.3.3 Kombinationen unabhängiger Ereignisse**

(1) *Für Kombinationen von einem angenommenen Brand und einem davon unabhängig auftretenden Ereignis brauchen grundsätzlich keine Maßnahmen ergriffen zu werden.*

*Hinweis:*

*Hierbei wurde davon ausgegangen, dass:*

a) *die Eintrittswahrscheinlichkeiten von Kombinationen unabhängiger Ereignisse kleiner als  $1 \times 10^{-5}$  pro Jahr sind,*

- b) Kombinationen unabhängiger Ereignisse durch geeignete Vorsorgemaßnahmen ausgeschlossen sind oder
- c) das unabhängig auftretende Ereignis die Brandschutzmaßnahmen nicht unzulässig beeinträchtigt.

(2) Für die Kombinationen von einem angenommenen Brand mit einem der nachfolgend genannten angenommenen Ereignisse müssen Maßnahmen ergriffen werden:

- a) Anlageninterne Überflutung,
- b) elektromagnetische Einwirkungen von innen oder außen (außer Blitz),
- c) Erdbeben (einschließlich Folgewirkungen),
- d) Hochwasser oder
- e) weitere standortabhängige Einwirkungen von außen.

(3) Innerhalb einer Woche nach Eintritt eines unter (2) genannten angenommenen Ereignisses sind die Brandschutzmaßnahmen, die für die Erhaltung der Funktionsfähigkeit der jeweils für die Kombination dieses Ereignisses mit davon unabhängigem Brand erforderlichen Systeme mit Sicherheitsfunktionen notwendig sind, entweder wieder verfügbar zu machen oder durch geeignete Maßnahmen zu ersetzen.

*Hinweis:*

Bei Einhaltung einer Karenzzeit von einer Woche ist die Eintrittswahrscheinlichkeit der Kombination von Brand mit den unter (2) genannten angenommenen Ereignissen kleiner als  $1 \times 10^{-5}/a$ .

(4) Es darf davon ausgegangen werden, dass für die Kombinationen von einem angenommenen Brand mit einem der unter (2) genannten angenommenen Ereignisse die unter (3) genannten Maßnahmen innerhalb einer Woche getroffen werden können.“

### 2.2.1.3 Die Liste $L_{gen}$ – Stand der Arbeiten und Ausblick

Zur Erstellung der Liste  $L_{gen}$  zu generischen übergreifenden Einwirkungen von innen und außen (siehe das Ergebnis in den Tabellen Tab. 2.2 bis Tab. 2.10) wurden vorrangig folgende Literaturstellen genutzt /DEC 14/, /FAK 05/, /IAE 02/, /IAE 03a/, /IAE 03b/, /IAE 03c/, /IAE 04a/, /IAE 10/\*, /IAE 10a/, /IAE 11a/, /IAE 12a/, /IAE 03d/, /IAE 03e/, /IAE 12a/, /IAE 04b/, /KUR 14/, /NRC 12/, /WEN 13/.

Die Liste  $L_{gen}$  und die bisher nur teilweise durchgeführten Untersuchungen zu standortbezogenen möglichen Einwirkungskombinationen werden im Abgleich mit behördlichen Vorgaben und einer Standortbewertung genutzt, um eine Liste  $L_{ges}$  abzuleiten, die sämtliche am Standort zu betrachtenden übergreifenden Einwirkungen (und deren Kombinationen) enthält (siehe dazu Kap. 2.2.2).

Die Durchführung dieses Analyseprozesses erfordert zu jeder übergreifenden Einwirkung aus der Liste  $L_{gen}$  eine Vielzahl weiterer Informationen, z. B.:

- Angabe von Referenzfällen für jede übergreifende Einwirkung sowie für relevante Einwirkungskombinationen,
- Angabe von Referenzfällen für durchgeführte PSA bezüglich ausgewählter übergreifender Einwirkungen und deren Besonderheiten bei der Durchführung,
- Aussagen zur Häufigkeit des Auftretens in der weltweiten Betriebserfahrung für jede übergreifende Einwirkung sowie für relevante Einwirkungskombinationen,
- Angaben zu Ursachen und Schadenswirkungen für jede übergreifende Einwirkung sowie für relevante Einwirkungskombinationen,
- Bewertung des Zusammenhangs zwischen Standorteigenschaften und Relevanz einzelner übergreifender Einwirkungen.

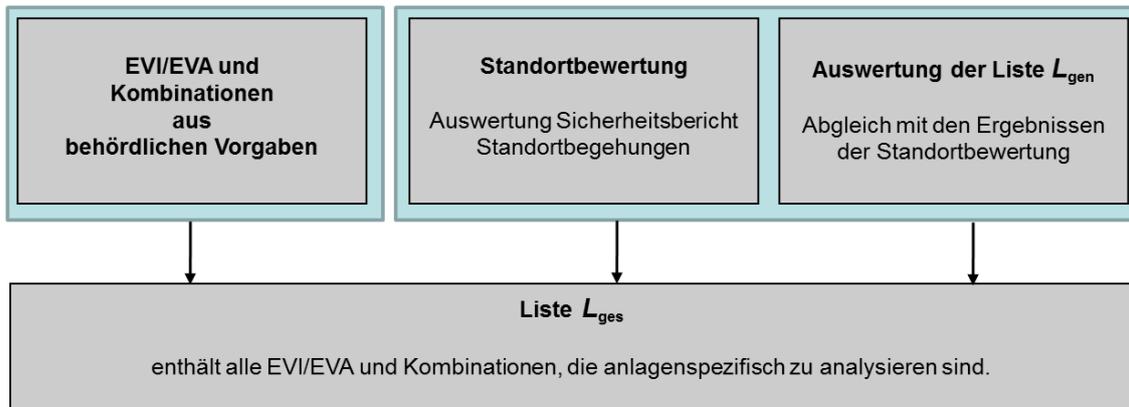
Die Liste  $L_{gen}$  bildet im Zusammenhang mit den genannten Erweiterungen die Grundlage zur Erstellung der Liste  $L_{ges}$ . Zur Recherche und automatischen Abfrage steht gegenwärtig noch kein rechentechnisches Hilfsmittel zur Verfügung. Im diesem Vorhaben sind allein die Liste  $L_{gen}$  von einzelnen übergreifenden Einwirkungen abgeleitet (Tab. 2.2 bis Tab. 2.10) und erste Überlegungen zu Einwirkungskombinationen durchgeführt worden. Zur Vervollständigung des Vorgehens sind alle genannten Daten, Informationen und Erkenntnisse in einem Informationstool 'übergreifende Einwirkungen' zusammenzuführen.

### 2.2.2 Standortspezifische übergreifende Einwirkungen – die Liste $L_{ges}$

Die Liste  $L_{ges}$  enthält alle übergreifenden Einwirkungen von innen und außen einschließlich aller denkbaren Kombinationen von übergreifenden Einwirkungen, die am Standort auftreten könnten. Die in der Liste  $L_{ges}$  enthaltenen übergreifenden Einwirkungen sind eine Teilmenge der Gesamtheit aller übergreifenden Einwirkungen. Es werden alle übergreifenden Einwirkungen der Liste  $L_{gen}$  ausgeschlossen, die nicht am Standort auftreten können oder die aus verschiedenen Gründen nicht relevant sind. Der Ausschluss übergreifender Einwirkungen wird begründet.

Die Aufstellung der Liste  $L_{ges}$  entspricht dem sogenannten „*Relevancy Screening*“ für Einwirkungen von außen in /KNO 03/. Das Ziel der Auswahl besteht darin, alle übergreifenden Einwirkungen auszusortieren, die nicht relevant für den Standort sind. Das bedeutet, dass diese übergreifenden Einwirkungen entweder nicht am Standort und

einer angemessenen Umgebung auftreten können oder ihre Wirkungsmechanismen nur zu vernachlässigbaren Schäden führen.



**Abb. 2.4** Ableitung der Liste  $L_{ges}$  aller standortspezifischen übergreifenden Einwirkungen

Die Liste  $L_{ges}$  aller standortspezifischen übergreifenden Einwirkungen wird auf der Grundlage folgender Informationen erstellt (siehe auch Abb. 2.4):

- Behördliche Vorgaben  
Die im Methodenband des PSA-Leitfadens /FAK 05/ beschriebenen Einwirkungen von innen und außen werden in die Liste  $L_{ges}$  übernommen.  
Die im Anhang 3 der ‘Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke’ /BMU 15/ genannten übergreifenden Einwirkungen werden übernommen.
- Standortbewertung  
Eine aktuelle Standortbewertung zur Durchführung einer standortspezifischen PSA setzt sich aus der Standortanalyse im Sicherheitsbericht, aus einer Auswertung der standortbezogenen Betriebsdaten (z. B. besondere Vorkommnisse auf den Verkehrswegen in Anlagennähe oder Veränderungen in der Boden- und Wassernutzung) sowie umfassenden und weiträumigen Standortbegehungen zusammen. Bei Notwendigkeit werden Einwirkungen von innen bzw. außen und Kombinationen, die über die behördlichen Vorgaben hinausgehen, hinzugefügt.
- Auswertung der generischen Liste  $L_{gen}$   
Es werden alle Einwirkungen von innen und außen sowie Kombinationen der generischen Liste mit den Ergebnissen der Standortbewertung abgeglichen. Die Liste  $L_{gen}$  wird entsprechend ergänzt.

Die Liste  $L_{ges}$  enthält alle übergreifenden Einwirkungen von innen und außen einschließlich aller denkbaren Kombinationen übergreifender Einwirkungen, die am Standort auftreten könnten. Es wird bei diesem Schritt der Analyse noch keine Aussage darüber getroffen, ob die übergreifenden Einwirkungen in der Liste  $L_{ges}$  überhaupt und wenn ja, in welchem Detaillierungsgrad analysiert werden müssen.

Jede übergreifende Einwirkung der Liste  $L_{ges}$  ist bei der Durchführung einer HPSA detailliert zu beschreiben. Es ist zu erläutern, warum die übergreifende Einwirkung auf Grund der Standortbedingungen eintreten und möglicherweise risikorelevant werden könnte. Diese Beschreibungen bilden die Grundlage der Zuordnung der übergreifenden Einwirkungen aus  $L_{ges}$  in die Listen  $L_0$ ,  $L_{grob}$  und  $L_{Detail}$  (siehe dazu auch Kapitel 2.2.2.1 und im Überblick in Kapitel 2.2). Diese Klassifikation der einzelnen übergreifenden Einwirkungen in die Listen  $L_0$ ,  $L_{grob}$  und  $L_{Detail}$  stellt eine Verallgemeinerung des sogenannten „*Impact Screenings*“ für Einwirkungen von außen in /KNO 03/ dar.

Es gibt Beispiele übergreifender Einwirkungen, die für jeden Kraftwerksstandort in die Liste  $L_{ges}$  aufzunehmen sind. Dazu gehören z. B. die im Methodenband des PSA-Leitfadens näher beschriebenen übergreifenden Einwirkungen Flugzeugabsturz, Erdbeben Hochwasser und Explosionsdruckwelle. Erst im Zusammenhang mit detaillierten Standortanalysen kann entschieden werden, in welcher Tiefe diese Ereignisse zu behandeln sind (siehe dazu die Beispiele in Kapitel 2.2.2.2).

Andererseits gibt es übergreifende Einwirkungen aus der Liste  $L_{gen}$ , die nicht in die Liste  $L_{ges}$  übernommen werden. Dazu lassen sich verschiedene Gründe anführen:

- Die übergreifende Einwirkung kann für den Standort vernünftigerweise ausgeschlossen werden, z. B. kann bei einem Kernkraftwerk in bergigen Regionen die übergreifende Einwirkung Tsunami auf dem Kraftwerksgelände keinen Schaden anrichten.
- Es gibt übergreifende Einwirkungen, von denen bekannt ist, dass sie Schäden anrichten können, allerdings gibt es dazu noch keine wissenschaftlich-technischen Untersuchungen. Derartige übergreifende Einwirkungen können in einer HPSA, mit der das Risiko am Standort auf der Grundlage des internationalen Standes von Wissenschaft und Technik quantifiziert werden soll, nicht behandelt werden.
- Das Risiko, das durch eine übergreifende Einwirkung entsteht, setzt sich zusammen aus der Eintrittshäufigkeit der Einwirkung und der Wahrscheinlichkeit für den

durch die Einwirkung angerichteten Schaden. Eine Abwägung dieser Größen kann zum Ausschluss von übergreifenden Einwirkungen führen.

In der Dokumentation einer HPSA sind die Ausschlusskriterien für übergreifende Einwirkungen zu nennen und diese den ausgeschlossenen Einwirkungen aus Liste  $L_{gen}$  zuzuordnen.

In /DEC 14/ sind die Erkenntnisse der sicherheitstechnischen Auswertungen zum Reaktorunglück in Fukushima Dai-ichi in Bezug auf die Durchführung von PSA zusammengefasst. Dabei geht es auch um die Erstellung der Liste  $L_{ges}$ .

### **2.2.2.1 Allgemeine Regeln zur Klassifikation der Einwirkungen aus $L_{ges}$**

In einer frühen Anleitung /BOH 90/ zur Durchführung probabilistischer Analysen für übergreifende Einwirkungen werden Kriterien formuliert, wann eine übergreifende Einwirkung von weiteren Analysen ausgeschlossen werden kann (siehe auch die aktuellere Kriterien der IAEA in /IAE 06/ oder die Anwendung der Kriterien des ASME/ANS PRA Standards für den AP1000 in /TEO 15/):

- Die Einwirkung hat höchstens das Zerstörungspotenzial der Ereignisse, für die das Kraftwerk ausgelegt wurde. Dies erfordert eine Bewertung der Auslegungsgrundlagen, um die Widerstandsfähigkeit der Anlagenstrukturen und Systeme gegen eine spezielle Einwirkung abschätzen zu können.  
(Folgendes Beispiel ist angegeben: Es konnte gezeigt werden, dass sicherheitsrelevante Strukturen, die gegen Erdbeben und Tornados einer bestimmten Klasse ausgelegt sind, einem Explosionsdruck von 3,0 psi widerstehen können. Wenn also der PSA-Ersteller zeigen kann, dass der Überdruck aus Explosionen bestimmter kraftwerksnaher Quellen (z. B. Eisenbahn- oder Schiffstransporte) 3,0 psi nicht übersteigen kann, sind derartige Explosionen nicht zu analysieren.)
- Die Einwirkung hat eine signifikant kleinere mittlere Eintrittshäufigkeit als die anderen Ereignisse (mit vergleichbarer Unsicherheit) und erzeugt keine darüber hinausgehenden größeren Schäden.
- Die Einwirkung kann nicht in ausreichender Nähe der Anlage auftreten, um Schäden anzurichten.
- Die Einwirkung ist in der Definition eines anderen Ereignisses enthalten.

Es heißt in /BOH 90/, dass diese Kriterien normalerweise ausreichend sind, um die meisten übergreifenden Einwirkungen auszuschließen. Anzumerken ist, dass diese Kriterien in /KNO 03/ für das „*Relevancy Screening*“ übernommen wurden. Kriterien dieser Art werden in der vorliegenden Konzeption auch genutzt, um zu entscheiden, ob übergreifende Einwirkungen aus der Liste  $L_{ges}$  der Liste  $L_0$  zugeordnet werden können.

Eine übergreifende Einwirkung ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn die Wirkungsschäden direkt oder indirekt eine oder mehr Sicherheitsfunktionen betreffen und zur gleichen Zeit die entsprechenden Sicherheitssysteme angefordert werden, um die Anlage in einen sicheren Zustand zu halten oder zurückzuführen /KNO 03/.

In /KNO 03/ werden neun Kriterien beschrieben, nach denen übergreifende Einwirkungen der Liste  $L_0$  zugeordnet werden können:

- Entfernung:  
Die übergreifende Einwirkung kann in den kommenden Jahrzehnten (Betriebsdauer von Kernkraftwerken am Standort) nicht in der näheren Umgebung des Standorts auftreten.  
Die Anwendung dieser Regel ist auch schon bei der Auswahl aus der Liste  $L_{gen}$  möglich.
- Einordnung, Definition:  
Die übergreifende Einwirkung wird per Definition durch eine übergeordnete übergreifende Einwirkung abgedeckt.
- Anwendbarkeit:  
Die übergreifende Einwirkung kann nicht auf den Standort angewendet werden. Entsprechende Gründe sind zu nennen.  
Diese Regel ist bereits bei der Auswahl aus der Liste  $L_{gen}$  und der Erstellung der Liste  $L_{ges}$  anzuwenden.
- Umfang der HPSA:  
Die übergreifende Einwirkung ist schon in probabilistische Studien analysiert worden.  
Dieses Kriterium wird hier nicht herangezogen. Es geht darum, ein Konzept zur umfassenden Durchführung einer HPSA vorzugeben. Dabei kann zwar teilweise auf bereits vorhandene Ergebnisse zurückgegriffen werden, grundsätzlich sind die vorhandenen Ergebnisse jedoch anhand der Vorgehensweise in der Konzeption

kritisch zu hinterfragen. Dies gilt insbesondere auch für die Betrachtung aller Arten von Abhängigkeiten.

– Auswirkung:

Die übergreifende Einwirkung hat ein Zerstörungspotenzial, das kleiner oder gleich dem eines Ereignisses ist, für das das Kraftwerk ausgelegt wurde. Dazu ist die Auslegung der Anlage probabilistisch zu hinterfragen und nachzuweisen, dass das Zerstörungspotenzial der übergreifenden Einwirkung kleiner oder gleich dem Potenzial des Auslegungsereignisses ist.

– Vorwarnung:

Die Vorwarnzeit für eine übergreifende Einwirkung ist kleiner als die spezifizierte Zeit, oder es ist genügend Zeit vorhanden, um vorgeplante Maßnahmen zum Schutz vor der übergreifenden Einwirkung durchzuführen (z. B. rechtzeitiges Abfahren).

Es wird angemerkt, dass die spezifizierte Zeit anlagenspezifisch zu bestimmen ist. Diese Zeit hängt im Wesentlichen von der Zeitdauer ab, die benötigt wird, um das Kraftwerk in einen sicheren Zustand abzufahren. Die vorhandenen Prozeduren und Notfallpläne müssen berücksichtigt werden.

– Verschiebung der Analyse:

Das ist ein organisatorisches Kriterium. Die Bedeutung der übergreifenden Einwirkung ist bekannt, die Analyse wird trotzdem verschoben, weil umfangreiche Maßnahmen vorgesehen sind, die erhebliche Auswirkungen auf die Widerstandsfähigkeit der Anlage haben.

Dieses Kriterium wird hier nicht herangezogen. Die Aufgabenstellung besteht in der Durchführung einer HPSA zu einem festgelegten Zeitpunkt.

– Common Cause Initiator (CCI):

Die maximalen Schadenseffekte der übergreifenden Einwirkung sind durch die Auslegung abgedeckt, d. h. dass die Einwirkung keine Reaktorschnellabschaltung (RESA) oder kein kontrolliertes Abfahren und keinen Ausfall von Sicherheitsfunktionen erzwingt.

– Risiko:

Der Risikobeitrag der übergreifenden Einwirkung ist vernachlässigbar oder kann akzeptiert werden.

### 2.2.2.2 Beispiele zur Klassifikation der Einwirkungen aus $L_{ges}$

Die nachfolgenden Beispiele sind dem PSA-Methodenband /FAK 05/ entnommen.

#### Klassifikation Flugzeugabsturz

In der Liste  $L_{ges}$  für einen gegebenen Standort ist die übergreifende Einwirkung Flugzeugabsturz enthalten. Die nachfolgende Zuordnung der zivilisatorisch bedingten Einwirkung von außen Flugzeugabsturz folgt den Vorgaben von /FAK 05/.

Sowohl Grobanalyse als auch Detailanalyse umfassen dieselben Arbeitsschritte. In der Detailanalyse werden verfeinerte Nachweisverfahren angewendet.

**Tab. 2.12** Standortspezifische Klassifikation des übergreifenden Ereignisses Flugzeugabsturz

Liste	Zuordnung, Kriterien und Grobanalysen
$L_0$	Für Anlagen, die gemäß den Anforderungen der RSK-Leitlinien /RSK 81/ gegen die Einwirkungen ausgelegt sind und die nicht im Einflussbereich militärischer Übungszonen liegen, ist eine probabilistische Analyse nicht erforderlich.
$L_{grob}$	Das übergreifende Ereignis Flugzeugabsturz wird $L_{grob}$ zugeordnet, sofern keine Zuordnung zu $L_0$ möglich ist. Ergibt sich bei der entsprechenden Grobanalyse ein Wert, der vernachlässigbar gegenüber allen anderen Risikobeiträgen ist, kann auf eine vertiefte Analyse verzichtet werden; andernfalls ist eine detaillierte probabilistische Analyse durchzuführen (Zuordnung zu $L_{Detail}$ ).
$L_{Detail}$	Durchführung einer detaillierten probabilistischen Analyse

Am Standort werden drei Gefährdungsbereiche unterschieden:

- Bereich A  
enthält Systeme, bei deren Schädigung unmittelbar ein Schadenszustand eintreten kann oder Auslösende Ereignisse eintreten können, die nicht durch das Notstandskühlsystem auslegungsgemäß beherrscht werden (z. B. Primärkreislauf).
- Bereich B  
enthält Systeme, bei deren Schädigung störfallauslösende Ereignisse (SAE) eintreten können, die durch das Notstandskühlsystem auslegungsgemäß beherrscht werden (z. B. Schaltanlagegebäude, Maschinenhaus).
- Bereich C  
umfasst das Notstandskühlsystem.

Sofern der Flugzeugabsturz nicht der Liste  $L_o$  zugeordnet werden kann (siehe Tab. 2.12), ist für die Bereiche A, B, C der Anteil an der Häufigkeit von Schadenszuständen zu ermitteln. Das erfolgt zuerst mittels einer Grobanalyse. Das entsprechende Vorgehen ist in /FAK 05/, Kapitel 3.6.1 ausgeführt.

### **Klassifikation Explosionsdruckwelle**

In der Liste  $L_{ges}$  für einen gegebenen Standort ist die übergreifende Einwirkung Explosionsdruckwelle enthalten. Die nachfolgende Zuordnung (siehe Tab. 2.13) der zivilisatorisch bedingten Einwirkung von außen Explosionsdruckwelle folgt den Vorgaben von /FAK 05/.

Am Standort werden drei Gefährdungsbereiche A, B und C unterschieden (vgl. die entsprechenden Bereiche bei der übergreifenden Einwirkung Flugzeugabsturz). Entsprechend /FAK 05/ kann mit dem nachfolgenden Überprüfungsansatz anhand von drei Kriterien entschieden werden, ob die Häufigkeit von Schadenszuständen infolge einer Explosionsdruckwelle kleiner  $1,0 \text{ E-}07/a$  beträgt. Dies ist dann der Fall, wenn

1. die anzusetzende Eintrittshäufigkeit der Einwirkung Explosionsdruckwelle mit kleiner als  $1,0 \text{ E-}05/a$  ermittelt wurde,
2. die Gebäude der Bereiche A und C entsprechend den Lastvorgaben der Druckwellenrichtlinie /BMI 76/ ausgelegt sind und
3. die Sicherheitsabstände zum Ort des Umgangs mit bzw. der möglichen Freisetzung von explosionsfähigen Stoffen entsprechend den Vorgaben aus /BMI 76/ eingehalten sind.

Daraus ergibt sich die standortgerechte Klassifikation in Tab. 2.13.

**Tab. 2.13** Standortspezifische Klassifikation des übergreifenden Ereignisses Explosionsdruckwelle

Liste	Zuordnung, Kriterien und Grobanalysen
$L_0$	Mit dem in /FAK 05/ dargestelltem Überprüfungsansatz kann nur gezeigt werden, dass die Häufigkeit eines Schadenszustandes, hervorgerufen durch eine Explosionsdruckwelle, weniger als $1,0 \text{ E-}07/\text{a}$ beträgt. Der Risikobeitrag ist nicht vernachlässigbar klein.
$L_{grob}$	„Kriterium (1) erfüllt“ und „Kriterium (2) erfüllt“ → Verifikation anhand des Überprüfungsansatzes
	„Kriterium (1) nicht erfüllt“ und „Kriterium (2) erfüllt“ → konservative Abschätzung der Eintrittshäufigkeit
$L_{Detail}$	„Kriterium (1) nicht erfüllt“ und „Kriterium (2) nicht erfüllt“

### Klassifikation Hochwasser

In der Liste  $L_{ges}$  für einen gegebenen Standort ist die übergreifende Einwirkung Hochwasser enthalten. Die nachfolgende Zuordnung (vgl. Tab. 2.14) der naturbedingten Einwirkung von außen Hochwasser folgt den Vorgaben von /FAK 05/.

**Tab. 2.14** Standortspezifische Klassifikation des übergreifenden Ereignisses Hochwasser

Liste	Zuordnung, Kriterien und Grobanalysen
$L_0$	Eine Überflutung des Anlagengeländes kann praktisch ausgeschlossen werden.
$L_{grob}$	Das übergreifende Ereignis Hochwasser wird $L_{grob}$ zugeordnet, wenn keine Zuordnung zu $L_0$ möglich ist. Ergebnis bei der entsprechenden Grobanalyse, dass die hochwasserbedingte Schadenshäufigkeit deutlich unter $1,0 \text{ E-}06/\text{a}$ liegt, kann auf eine vertiefte Analyse verzichtet werden; anderenfalls ist eine detaillierte probabilistische Analyse durchzuführen (Zuordnung zu $L_{Detail}$ )
$L_{Detail}$	Durchführung einer detaillierten probabilistischen Analyse

Mit folgender Grobanalyse kann festgestellt werden, ob die hochwasserbedingte Schadenshäufigkeit deutlich kleiner  $1,0 \text{ E-}06/\text{a}$  ist:

- Die Auslegung der Anlage genügt dem Bemessungshochwasser mit einer Überschreitenswahrscheinlichkeit von  $1,0 \text{ E-}04/\text{a}$ .
- Die Auslegung erfolgt mit permanenten Schutzmaßnahmen.
- Ein Abfahren der Anlage erfolgt bei einem Wasserstand, der einen erheblichen Abstand zum Bemessungshochwasser beinhaltet.

- Die bedingte Wahrscheinlichkeit für einen Wassereintrag bei Bemessungshochwasser ist deutlich kleiner als 0,01.

## Klassifikation Erdbeben

In der Liste  $L_{ges}$  für einen gegebenen Standort ist die übergreifende Einwirkung Erdbeben enthalten. Die nachfolgende Zuordnung (vgl. Tab. 2.15) der naturbedingten Einwirkung von außen Erdbeben folgt den Vorgaben von /FAK 05/.

**Tab. 2.15** Standortspezifische Klassifikation des übergreifenden Ereignisses Erdbeben

Liste	Zuordnung, Kriterien und Grobanalysen
$L_0$	Intensität $I$ am Standort: $I \leq 6$
$L_{grob}$	$6 < I \leq 7$
$L_{Detail}$	$I > 7$

### 2.3 PSA für übergreifende Einwirkungen aus der Liste $L_{Detail}$

In Kapitel 2.2 wurde das Vorgehen bezüglich der ‘Modellierungsebene Einwirkungen’ bei der Durchführung einer HPSA beschrieben. Nachfolgend werden die ‘Modellierungsebene AE’ und die ‘Modellierungsebene BSK’ diskutiert (zur Begriffsbildung siehe Kapitel 2.1.3). Dabei geht es um die notwendigen Erweiterungen des Anlagenmodells für die übergreifenden Einwirkungen aus der Liste  $L_{Detail}$  (vgl. Abb. 2.1). Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass eine übergreifende Einwirkung aus  $L_{Detail}$  sowohl eine einzelne übergreifende Einwirkung von innen oder außen sein kann als auch eine Kombination übergreifender Einwirkungen. Die übergreifende Einwirkung von außen Erdbeben ist z. B. im vorliegenden Konzept immer mit den übergreifenden Einwirkungen von innen Brand und Überflutung verknüpft.

#### 2.3.1 Auslösende Ereignisse infolge übergreifender Einwirkungen

Bei der Risikobeurteilung von übergreifenden Einwirkungen mit probabilistischen Methoden muss man sich einige Unterschiede zum Vorgehen bei der probabilistischen Bewertung von internen auslösenden Einwirkungen verdeutlichen. Dazu wird im Folgenden auf die Argumentation in /KLU 12/ zurückgegriffen.

Eine quantitative Risikoanalyse von technischen Systemen besteht aus drei Schritten:

1. Identifikation möglicher Ereignisse mit negativen Auswirkungen,
2. Ermittlung der Eintrittshäufigkeiten dieser Ereignisse,
3. Bestimmung der möglichen Konsequenzen.

Das Ergebnis besteht in einer Menge von 3-Tupeln. Jedes Tupel besteht aus einem Ereignis (1.), dessen Eintrittshäufigkeit (2.) und den möglichen Konsequenzen (3.). Zur quantitativen Verdichtung können Risikometriken oder Risikomaßzahlen definiert und auf Grund der ermittelten Menge von 3-Tupeln berechnet werden.

Probabilistische Sicherheitsanalysen der Stufe 1 sind Risikoanalysen für Kernkraftwerke mit der jährlichen Kernschadenshäufigkeit als Risikometrik. Die drei Schritte der Analyse lassen sich bei einer PSA folgendermaßen konkretisieren:

1. Identifikation auslösender Ereignisse,
2. Bestimmung der Eintrittshäufigkeiten für die auslösenden Ereignisse,
3. Bei einem auslösenden Ereignis wird als Konsequenz die Möglichkeit eines Kernschadenszustandes betrachtet. Die bedingte Wahrscheinlichkeit für einen Kernschadenszustand wird mit Hilfe von Ereignisablauf- und Fehlerbaumanalysen bestimmt.

Bei der Bestimmung der Kernschadenshäufigkeit werden vereinfachende Annahmen getroffen:

- Die auslösenden Ereignisse und die daraus sich ergebenden Ereignisabläufe werden als voneinander unabhängig angesehen, damit kann man ihre Risikobeiträge addieren.
- Die Risikobestimmung beruht auf der Modellvorstellung eines sequentiellen Schadensablaufs bei dem sich die Kausalität der Ereignisabfolge bestimmen lässt. Die Möglichkeit dynamischer Änderungen der Anlagenkonfiguration wird nicht betrachtet.
- Der Kenntnisstand zu den für die einzelnen auslösenden Ereignisse ermittelten Ereignisabläufen ist gleich (Verwendung einer gemeinsamen Unsicherheitsverteilung für epistemische Unsicherheiten und aleatorische Variabilität).

Bei übergreifenden Einwirkungen können sehr komplexe Ereignisabläufe entstehen. Die genannten vereinfachenden Annahmen aus der PSA der Stufe 1 für anlageninterne auslösende Ereignisse sind für jede zu analysierende übergreifende Einwirkung aus der Liste  $L_{Detail}$  sorgfältig zu hinterfragen. Es muss z. B. davon ausgegangen werden, dass die Bedingung der Unabhängigkeit der aus einleitenden übergreifenden Einwirkungen resultierenden auslösenden Ereignisse nicht gilt. Eine Risikoaggregation durch einfache Addition der durch eine übergreifende Einwirkung hervorgerufenen Risiken mehrerer eingetretener auslösender Ereignisse führt zu Fehleinschätzungen.

In /KLU 12/ wird zur Bewertung einzelner übergreifender Einwirkungen vorgeschlagen, bedingte Risikometriken zu nutzen, d. h. Risikometriken sind unter der Annahme zu berechnen, dass die Einwirkung eingetreten ist. Es heißt weiter in /KLU 12/, dass dieses Vorgehen den eigentlichen Zweck einer Sicherheitsanalyse erfüllt, da die bedingte Kernschadenswahrscheinlichkeit ein direktes Maß für den Schutzgrad eines Kernkraftwerks gegen das zu untersuchende auslösende Ereignis darstellt. Die große Unsicherheit bezüglich der Eintrittshäufigkeit übergreifender Einwirkungen würde nicht mit in die Bewertung eingehen.

Bei der Erstellung einer HPSA ist ein Gesamtrisiko für den Standort anzugeben, deshalb ist für jede übergreifende Einwirkung aus der Liste  $L_{Detail}$  ein Modell zur Berechnung der resultierenden Kernschadenshäufigkeit anzufertigen, welches alle Abhängigkeiten durch mehrfache bedingte auslösende Ereignisse angemessen berücksichtigt.

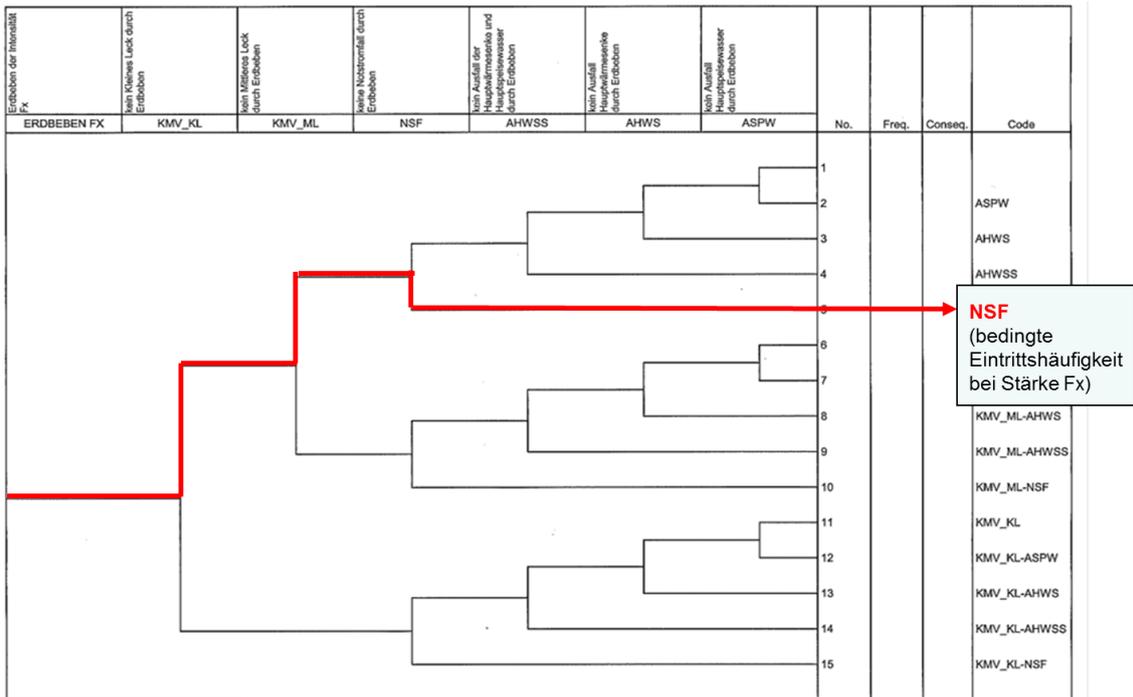
Nachfolgend finden sich einige Hinweise zur Modellerstellung (siehe auch das Beispiel im Anhang 0 insbesondere die Abbildungen Abb. B.11 bis Abb. B.13):

- Zusammenstellung aller auslösenden Ereignisse, die durch die betrachtete übergreifende Einwirkung eingeleitet werden können:  
In diesem Zusammenhang muss nochmals angemerkt werden, dass im vorliegenden Konzept unter einer übergreifenden Einwirkung einzelne EVI, einzelne EVA oder auch Kombinationen einzelner übergreifenden Einwirkungen verstanden werden.
- Die bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit jedes auslösenden Ereignisses ist in Abhängigkeit von der Intensität der übergreifenden Einwirkung zu bestimmen.
- Es sind Untersuchungen zur zeitlichen Reihenfolge des bedingten Auftretens von auslösenden Ereignissen in Abhängigkeit vom betrachteten Zeitintervall anzustellen.

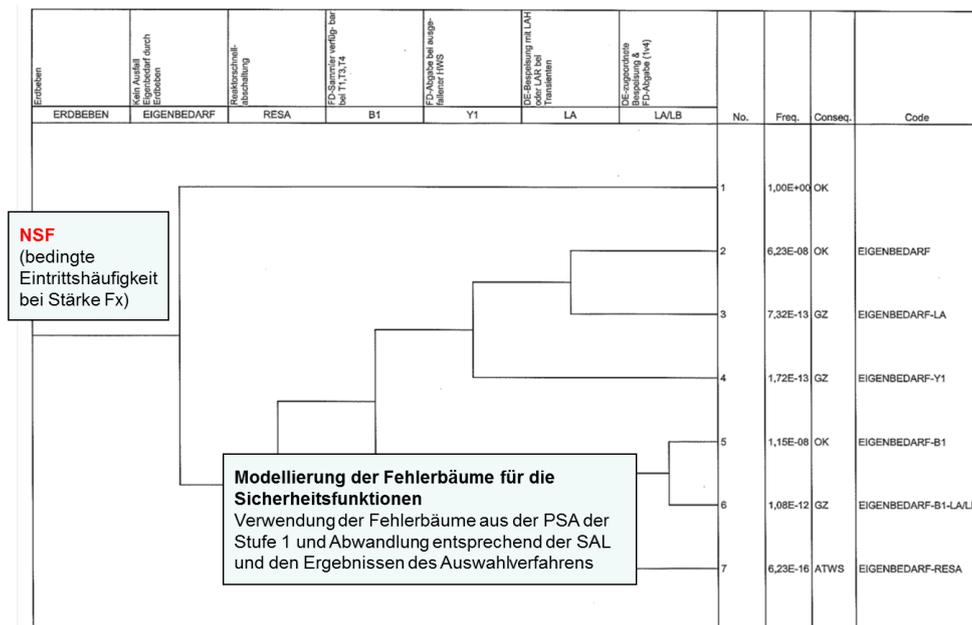
len. Hier sind oft konservative Festlegungen erforderlich, denn – wie bereits oben erwähnt – beruht die Risikobestimmung auf der Modellvorstellung eines sequentiellen Schadensablaufs, bei dem sich die Kausalität der Ereignisabfolge bestimmen lässt. Ansonsten müsste man die Möglichkeit dynamischer Änderungen der Anlagenkonfiguration betrachten.

- Die Möglichkeit des Auftretens weiterer auslösender Ereignisse im Betrachtungszeitraum der PSA und die Möglichkeit der Durchführung von Maßnahmen zur Wiederherstellung (Recovery-Maßnahmen) sind zu überprüfen und ggf. zu modellieren (insbesondere für korrelierte übergreifende Einwirkungen und langfristig wirkende übergreifende Einwirkungen).
- Zur Bewertung des Risikos, das von der betrachteten übergreifenden Einwirkung ausgeht, ist ein Modell auf Ereignis- und Fehlerbaumebene abzuleiten, das die wichtigsten Kombinationen von auslösenden Ereignissen abdeckend berücksichtigt. Insbesondere ist auf die Modellierung von CCI-Effekten zu achten (siehe auch Glossar in Tab. 9.1), d. h. neben den bedingten auslösenden Ereignissen treten auch Ausfälle von Komponenten der Sicherheitssysteme auf, die zur Störfallbeherrschung benötigt werden.

In Abb. 2.5 und Tab. 2.6 ist eine Möglichkeit der Modellbildung dargestellt, wenn auf Grund einer übergreifenden Einwirkung (hier: Erdbeben) mehrere auslösende Ereignisse auftreten können. Im Beispiel wird vorausgesetzt, dass für die auslösenden Ereignisse Fehlerbäume zur Verfügung stehen, die den Eintritt eines auslösenden Ereignisses auf den Ausfall von BSK zurückführen (Auslöserfehlerbäume). Mit dem Auslöserfehlerbaum für den Notstromfall kann man dann z. B. die bedingte Wahrscheinlichkeit dafür berechnen, dass ein Notstromfall bei einer beliebig vorgegebenen Freifeldbeschleunigung eintritt. Sind für alle auslösenden Ereignisse Auslöserfehlerbäume vorhanden, werden auch alle Abhängigkeiten im Ereignisablauf adäquat berücksichtigt. Leider kann man bei den Auslöserfehlerbäumen nicht auf vorhandene Modellierungen aus der PSA der Stufe 1 zurückgreifen. Dort wird die Häufigkeit von Transienten meist aus der Betriebserfahrung ermittelt.



**Abb. 2.5** Berücksichtigung von mehreren auslösenden Ereignissen (Fortsetzung für den Notstromfall siehe Abb. 2.6)



**Abb. 2.6** Ereignisablauf seismisch bedingter Notstromfall (Fortsetzung von Abb. 2.5)

In /FRE 10/ ist für die übergreifende Einwirkung Erdbeben die Vorgehensweise bei der Modellierung und Quantifizierung untersucht worden. Als unterstützende Software zur Erzeugung der entsprechenden Ereignis- und Fehlerbäume sowie für die Berechnung

der interessierenden Größen wie die Häufigkeiten von Gefährdungs- bzw. Kernschadenzuständen wurde das Programm RiskSpectrum® eingesetzt. Bei komplexen Problemen wie im angeführten Beispiel (vgl. Abbildungen Abb. 2.5 und Abb. 2.6) und bei großen Versagenswahrscheinlichkeiten der BSK konnte das analytische Programm RiskSpectrum® oft kein Ergebnis ermitteln. Der Grund ist nach Aussage des Softwareherstellers im Abschneidealgorithmus der Software zu finden. Haben viele Basisereignisse im Anlagenmodell eine hohe Ausfallwahrscheinlichkeit, so funktioniert der implementierte Abschneidealgorithmus nicht effektiv. Nur bei einer Reduktion der Anzahl dieser Basisereignisse durch Gruppenbildung besteht eine Chance, ein Ergebnis zu erhalten. Das heißt, man fasst all diejenigen Komponenten zusammen, für die man annimmt, dass sie durch die gleiche Fragility-Kurve charakterisiert werden. Dadurch werden starke Abhängigkeiten ins Modell eingeführt.

Aus diesem Grund wurden Vergleichsrechnungen mit der von der GRS entwickelten Software CRAVEX durchgeführt. Dabei handelt es sich um ein Simulationsprogramm, welches auf dem Monte-Carlo-Verfahren beruht. Dabei waren die vergleichbaren Rechenzeiten relativ kurz und die Modellierungsfreiheit bezüglich der Anzahl der Basisereignisse mit seismisch bedingten Versagenswahrscheinlichkeiten unterliegt keinen Beschränkungen.

Das Programm CRAVEX wurde entwickelt, um auch multiple Folgeereignisse im Kernkraftwerk mit übergreifendem Charakter probabilistisch bewerten zu können. Das Programm CRAVEX wurde außerdem für die Berechnung von Häufigkeiten von Gefährdungszuständen bei Bränden (Brand-PSA) eingesetzt /BAB 05/.

Der wesentliche Ansatz des Programms CRAVEX ist folgender:

- Es werden Räume definiert, die entweder reale Räume oder frei definierte Raumbereiche im Kernkraftwerk abbilden.
- Es können virtuelle Räume für besondere Zwecke definiert werden.
- Sowohl den realen wie auch den virtuellen Räumen werden BSK zugewiesen.
- Den virtuellen Räumen werden BSK zugeordnet, die bei Erschütterung oder bei anderen zu definierenden übergreifenden Einwirkungen ausfallen.
- Den Räumen wird wie den BSK eine Ausfallwahrscheinlichkeit zugewiesen.

- Zwischen den Räumen werden Übergangswahrscheinlichkeiten definiert, die den Übergang einer Einwirkung von Raum zu Raum beschreiben.
- Durch die Monte-Carlo-Simulation und die im Programm implementierten Vorgehensweise, wie die Übergangswahrscheinlichkeiten eingreifen, können die Ausfallwahrscheinlichkeiten der realen BSK in Folge des unterstellten Ereignisses (Einwirkung) berechnet werden.
- Das Programm verarbeitet nur Fehlerbäume, so dass Ereignisbäume, die z. B. für ein auslösendes Ereignis bei Leistungsbetrieb erstellt wurden, in Fehlerbäume überführt werden müssen.

### 2.3.2 Systematische Modellerweiterung mit den Listen *H-EL* und *H-DL*

Für ein Kernkraftwerk ist eine PSA der Stufe 1 für anlageninterne auslösende Ereignisse durchgeführt worden. Zusätzlich ist das Risiko zu bestimmen, welches von einer übergreifenden Einwirkung *H* ausgeht.

Die PSA der Stufe 1 umfasst die Menge der relevanten auslösenden Ereignisse mit den zugehörigen Eintrittshäufigkeiten. Die möglichen Ereignisverläufe sind mit Ereignisbäumen beschrieben. Die Ereignisbaumverzweigungen entstehen durch die Frage nach der Wirksamkeit von Sicherheitsfunktionen. Die Verzweigungswahrscheinlichkeiten können mittels der Fehlerbaummethode berechnet werden. Die Menge der Ereignis- und Fehlerbäume bildet das sogenannte Anlagenmodell. Die kleinsten Einheiten im Anlagenmodell heißen Basisereignisse.

Bei PSA der Stufe 1 für anlageninterne Ereignisse beschreiben Basisereignisse meist den Ausfall einer speziellen Funktion technischer Komponenten. In solchen Fällen umschreibt das Basisereignis den Komponentenumfang (Welche Bauteile gehören zur Komponente, welche nicht? Wo sind die Komponentengrenzen?), die komponentenbezogene Ausfallart und die zur Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit benötigten Zuverlässigkeitsparameter (Wie wird die Komponente eingesetzt? Art des Betriebs- und Wartungsregimes).

Nachfolgend sind die wichtigsten Arten von Basisereignissen aufgeführt:

- auslösendes Ereignis  
(Bezeichnung des Ereignisses, Eintrittshäufigkeit pro Reaktorjahr);

- Komponentenversagen bzw. -unverfügbarkeiten  
(Art der Komponente, Ausfallart, Komponentenmodell unter Berücksichtigung der Lebensdauer- und Ausfallverteilung der Komponente, der Einsatzart sowie des Betriebs- und Wartungsregimes, Ausfallwahrscheinlichkeit bei Anforderung bzw. zeitabhängige Unverfügbarkeit in Abhängigkeit von den Parametern des Komponentenmodells wie z. B. Ausfall- und Reparaturrate);
- Personalfehlhandlung  
(Beschreibung der Handlung, Modellierung der Handlung (Ereignisbäume mit Recovery-Maßnahmen und Berücksichtigung von Abhängigkeiten zwischen mehreren Akteuren), probabilistische Bewertung der Handlungsschritte, Wahrscheinlichkeit der Fehlhandlung);
- Fehler aus gemeinsamer Ursache (GVA)  
(Menge der betroffenen Komponenten, Wahrscheinlichkeit dafür, dass die Komponentenmenge gleichzeitig auf Grund einer gemeinsamen Ursache ausfällt).

Im Folgenden wird für eine gegebene übergreifende Einwirkung  $H$  untersucht, wie das Anlagenmodell auf der Ebene der Basisereignisse erweitert werden muss, um auch die  $H$ -bedingten Ausfälle zu beschreiben.

In einer PSA der Stufe 1 betreffen die meisten Basisereignisse Komponentenversagen. Im Fall einer übergreifenden Einwirkung muss auch mit dem Versagen anderer Struktureinheiten gerechnet werden, deshalb wird statt von Komponenten oft von BSK (englisch: SSC) gesprochen. BSK steht dabei für „Bauwerke bzw. bauliche Anlagenteile, Systeme, Komponenten“.

Die Basisereignisse 'auslösendes Ereignis (AE)' werden in der Modellierungsebene 2 (vgl. Abb. 2.1) behandelt, siehe auch Kapitel 2.3.1. GVA-Basisereignisse bleiben im Anlagenmodell erhalten, werden aber nicht bezüglich der betrachteten übergreifenden Einwirkung  $H$  modifiziert. Durch  $H$  bedingte Ausfallabhängigkeiten werden in Kapitel 3 ausführlich behandelt.

Die Erweiterung der vorliegenden PSA um  $H$ -bedingte Ausfälle von BSK wird in Kapitel 2.3.2.2 behandelt. Dort wird auch diskutiert, wie die Basisereignisse, welche Personalfehlhandlungen beschreiben, modifiziert werden müssen.

### 2.3.2.1 Allgemeines

Es wird im Folgenden vorausgesetzt, dass eine begutachtete PSA der Stufe 1 vorliegt. Diese PSA soll nun so auf der Ebene der Basisereignisse (Ebene 3 in Abb. 2.1) erweitert werden, dass auch die durch eine übergreifende Einwirkung  $H$  bedingten Ausfälle von BSK berücksichtigt werden. Dazu wird eine Liste von BSK aufgestellt und  $H$ -EL genannt.  $H$ -EL steht für *Hazard Equipment List* (Ausrüstungsliste bezüglich der übergreifenden Einwirkung  $H$ ).

Den (theoretischen) Ausgangspunkt der Liste bilden alle BSK im Kernkraftwerk. Mit einem gestaffelten Auswahlverfahren werden sämtliche BSK bestimmt, deren mögliche Fehlfunktion bei einer übergreifenden Einwirkung  $H$  einen Beitrag zur Häufigkeit der Schadenszustände liefert. Es wird mit einer systematischen Vorgehensweise beim qualitativen Auswahlverfahren sichergestellt, dass keine relevanten BSK übersehen werden können. Nichtsdestotrotz wird mit quantitativen Kriterien versucht, den Umfang der Liste zu reduzieren. Dazu muss für BSK nachgewiesen werden, dass der  $H$ -bedingte Ausfall vernachlässigbar ist.

Die endgültige Liste  $H$ -EL wird genutzt, um das PSA-Modell systematisch zu erweitern. Alle schon zuvor im Modell enthaltenen BSK-Ausfallmöglichkeiten werden jetzt um die Möglichkeit des  $H$ -bedingten Ausfalls ergänzt. Der Ausfall von BSK, die bisher nicht im Anlagenmodell PSA der Stufe 1 für anlageninterne auslösende Ereignisse enthalten waren, ist an entsprechender Stelle im Anlagenmodell als neues Basisereignis einzufügen. Für Basisereignisse, die Personalhandlungen beschreiben, ist zu überprüfen, ob diese Handlungen auch bei der übergreifenden Einwirkung  $H$  möglich sind und wie wahrscheinlich Fehlhandlungen sind.

Eine weitere Liste zur Beschreibung der notwendigen Ergänzungen des PSA Anlagenmodells der Stufe 1 ist die Abhängigkeitsliste  $H$ -DL.  $H$ -DL steht für *Hazard Dependency List* (Liste der Abhängigkeiten bezüglich der übergreifenden Einwirkung  $H$ ). Jede Abhängigkeit  $D$  wird mit einem Abhängigkeitsmodell beschrieben (siehe dazu die Ausführungen in Kapitel 3.1). Bei den Abhängigkeiten von BSK-Ausfällen auf Grund einer übergreifenden Einwirkung  $H$  kann man nicht auf das PSA-Modell der Stufe 1 für interne Ereignisse zurückgreifen. Die dort modellierten Abhängigkeiten, die sogenannten gemeinsam verursachten Ausfälle bleiben im Modell zur Beschreibung der Auswirkung übergreifender Ereignisse enthalten. Die  $H$ -bedingten Ausfallabhängigkeiten müssen auf Grund theoretischer Überlegungen und auf der Grundlage systematischer Bege-

hungen abgeleitet werden. Jede Abhängigkeit wird charakterisiert durch die Menge der abhängigen BSK, durch die Eintrittshäufigkeit des Wirksamwerdens der Abhängigkeit und durch die Frage, wie viele der BSK aus der Abhängigkeitsmenge bei Wirksamwerden betroffen werden (mehr dazu in Kapitel 3.1.2). Die Liste der Abhängigkeiten  $H$ -DL wird durch qualitative und quantitative Betrachtungen und insbesondere bei Begehungen spezifiziert.

Die endgültige Liste  $H$ -DL wird genutzt, um das PSA-Anlagenmodell systematisch zu erweitern. Dazu werden sämtliche Basisereignisse, die den Ausfall von BSK aus der Abhängigkeitsmenge beschreiben, entsprechend erweitert, siehe dazu das Kapitel 3.1.1 zur Fehlerbaumerweiterung bei Abhängigkeiten oder auch Abb. 2.7.

Nachfolgend wird in den Kapiteln 2.3.2.2 und 2.3.2.3 detailliert ausgeführt wie die Listen  $H$ -EL und  $H$ -DL aufgestellt werden. In Kap. 2.3.2.4 wird das Ganze am Beispiel der übergreifenden Einwirkung Erdbeben konkretisiert. Dabei wird auf Ergebnisse aus /TUE 10/ zurückgegriffen.

### **2.3.2.2      Aufstellung der Liste $H$ -EL**

Es wird vorausgesetzt, dass eine begutachtete PSA der Stufe 1 für interne auslösende Ereignisse vorliegt. Diese PSA wird nachfolgend Basis-PSA genannt.

Übergreifende Einwirkungen können alle BSK (bzw. deren Funktionen) eines Kraftwerksstandortes beeinflussen, deshalb muss grundsätzlich bei der Analyse einer speziellen übergreifenden Einwirkung  $H$  und den dabei möglicherweise auftretenden Ausfällen von der Gesamtheit der BSK ausgegangen werden.

Aus der Gesamtheit der BSK werden alle BSK mit folgenden Eigenschaften zur weiteren Betrachtung ausgewählt:

- Die BSK kann auf Grund der übergreifenden Einwirkung  $H$  ausfallen, und
- die BSK ist  $H$ -relevant.

Eine BSK wird  $H$ -relevant genannt, wenn

- der  $H$ -bedingte Ausfall der BSK zur Entstehung eines auslösenden Ereignisses beiträgt, oder

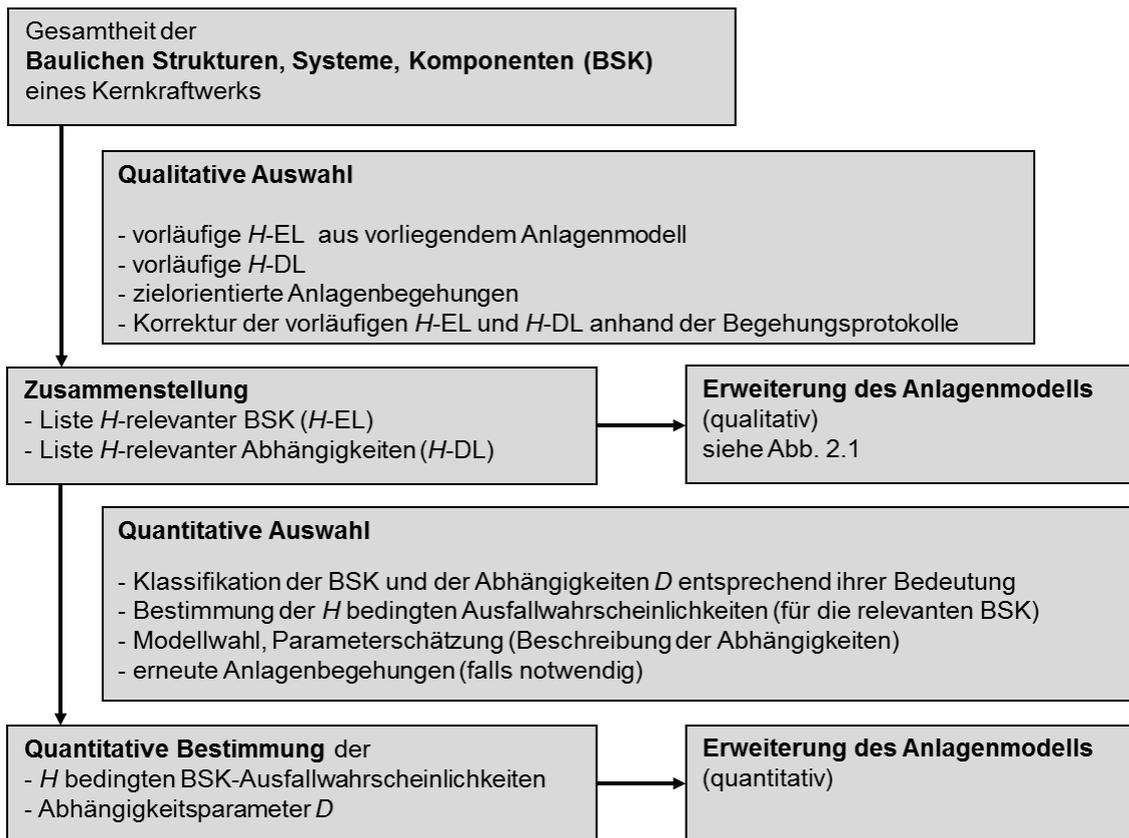
- die BSK Teil eines Sicherheitssystems ist, oder
- der H-bedingte Ausfall der BSK in der Folge eine oder mehrere BSK von Sicherheitssystemen zum Ausfall bringen kann.

Nach der qualitativen Auswahl umfasst die vorläufige Ausrüstungsliste *H-EL* alle *H*-relevanten BSK.

Bei der qualitativen Auswahl von BSK für die Ausrüstungsliste *H-EL* kann auf folgende Art und Weise vorgegangen werden (siehe auch Abb. 2.7):

- a) Übernahme aller BSK aus der Basis-PSA;
- b) Überprüfung der Annahmen zu BSK, deren Ausfall zur Entstehung eines auslösenden Ereignisses beitragen kann;
- c) Überprüfung der Annahmen aus der Basis-PSA und gegebenenfalls Ergänzung von *H*-relevanten BSK;
- d) Durchführung zielorientierter Anlagenbegehungen;
- e) Überprüfung sonstiger Basisereignisse aus der Basis-PSA (z. B. Personalhandlungen, Notfallmaßnahmen).

Zum optimalen Vorgehen bei der Zusammenstellung der Ausrüstungsliste *H-EL* sind in den Kapiteln 2.3.2.4 und 2.3.2.5 Beispiele angegeben.



**Abb. 2.7** Bereitstellung der Listen  $H$ -EL und  $H$ -DL (allgemein)

Nachfolgend finden sich einige allgemeine Erläuterungen zu den vorgeschlagenen qualitativen Auswahlritten.

a) Übernahme aller BSK aus der Basis-PSA

Grundsätzlich sollten in einem ersten Schritt tatsächlich alle BSK, deren Ausfall bzw. Versagen in den Basisereignissen des Basis-PSA-Modells modelliert ist, in die vorläufige  $H$ -EL übernommen werden. Die endgültige Entscheidung zur  $H$ -Relevanz einer BSK wird erst in der quantitativen Auswahl getroffen. Nichtsdestotrotz können in Abhängigkeit von der betrachteten übergreifenden Einwirkung  $H$  offensichtliche Entscheidungen schon hier getroffen werden, z. B. können bei der übergreifenden Einwirkung *Hochwasser* alle BSK aus der  $H$ -EL entfernt werden, die über dem höchsten theoretisch möglichen Wasserstand angeordnet sind.

b) Überprüfung der Annahmen zu BSK, deren Ausfall zur Entstehung eines auslösenden Ereignisses beitragen kann

Manchmal sind auslösende Ereignisse und deren Ursachen auf BSK-Ebene in der Basis-PSA in sogenannten Auslöserfehlerbäumen modelliert. In solchen Fällen werden die entsprechenden  $H$ -relevanten BSK im Schritt a) gefunden.

Ist im PSA-Modell für ein auslösendes Ereignis nur eine Eintrittshäufigkeit als Ergebnis externer Analysen angegeben, ist zu überprüfen, ob diese Eintrittshäufigkeit auch bei Einwirkung von  $H$  angenommen werden kann. Dazu sind entsprechende Analysen durchzuführen. Hilfreich kann die Aufstellung von Auslöserfehlerbäumen sein. BSK, die noch nicht im Schritt a) in vorläufige  $H$ -EL aufgenommen wurden, sind zu ergänzen.

c) Überprüfung der Annahmen aus der Basis-PSA und gegebenenfalls Ergänzung von  $H$ -relevanten BSK

- Die festgelegten Randbedingungen der Basis-PSA sind zu untersuchen und festzustellen, ob dadurch BSK-Ausfälle nicht in das PSA-Modell einbezogen wurden, die bei der betrachteten übergreifenden Einwirkung  $H$  durchaus eine wichtige Rolle spielen können. So wird z. B. bei PSA der Stufe 1 der Ausfall passiver Einrichtungen auf Grund der geringen Ausfallwahrscheinlichkeit oft nicht betrachtet. Es ist zu prüfen, ob diese Annahme weiterhin auch bei einer Einwirkung  $H$  gilt.

- Besonderheiten der übergreifenden Einwirkung  $H$  in Bezug auf die Ausfallmöglichkeiten von BSK sind zu analysieren und entsprechende Erweiterungen der  $H$ -EL abzuleiten.

Als Beispiel kann z. B. bei der übergreifenden Einwirkung Brand erwähnt werden, dass es erforderlich ist, sämtliche Leistungs- und leittechnische Kabel  $H$ -relevanter BSK in die Analyse einzubeziehen (siehe dazu Kapitel 2.3.2.5).

Ein weiteres Beispiel wäre die Notwendigkeit der Aufnahme baulicher Strukturen in die  $H$ -EL (z. B. bei der übergreifenden Einwirkung Erdbeben, siehe Kapitel 2.3.2.4).

- Grundsätzliche Festlegungen

Es ist festzulegen, wie in Abhängigkeit von  $H$  mit Informations- und Verteilungssystemen bei der Modellierung umgegangen wird (z. B. Rohrleitungssysteme, Kabeltrassen oder Lüftungssysteme).

d) Durchführung zielorientierter Anlagenbegehungen

Die Durchführung von Anlagenbegehungen ist für die Analyse übergreifender Einwirkungen von innen und außen von zentraler Bedeutung. Die Begehungen werden zielorientiert zur betrachteten übergreifenden Einwirkung  $H$  durchgeführt. Nachfolgend werden einige allgemeine Gesichtspunkte der Durchführung von Anlagenbegehungen angesprochen (zur konkreten Umsetzung, siehe die Aussagen

in Kapitel 2.3.2.4 und Kapitel 2.3.2.5).

Man unterscheidet zwei Begehungsziele: Zum einen geht es darum, die Vollständigkeit der Ausrüstungsliste *H-EL* sicherzustellen, zum anderen gewinnt man einen Eindruck zur Kapazität der einzelnen *H*-relevanten BSK in Bezug auf ihre Widerstandsfähigkeit gegenüber der übergreifenden Einwirkung *H*. Neben der Zusammenstellung und Bewertung *H*-relevanter BSK sollten noch sonstige Aspekte der allgemeinen Kraftwerksordnung in Bezug auf die entsprechende übergreifende Einwirkung zusammengestellt werden, z. B. ungünstige Verteilung von Brandlasten im Brandfall, schwere, nicht verankerte Ausrüstungen bei Erdbeben oder Ordnungsmängel („poor housekeeping“) im Allgemeinen.

Bei den Begehungen geht es natürlich auch um Abhängigkeiten im Ausfallverhalten von BSK in Bezug auf *H*. Darauf wird bei der Zusammenstellung der Abhängigkeitsliste *H-DL* eingegangen, siehe Kapitel 2.3.2.3.

Die Begehungen sind gut vorzubereiten, eine Möglichkeit ist die Nutzung von Begehungsformblättern (mehr dazu siehe Kapitel 2.3.2.4) oder generell die Nutzung von Informationsdatenbanken. Die Begehungen sind umfassend zu dokumentieren, eine ergänzende Fotodokumentation ist hilfreich.

- e) Überprüfung sonstiger Basisereignisse aus der Basis-PSA (z. B. Personalhandlungen, Notfallmaßnahmen).

Das Basis-PSA-Modell ist vor allem in Hinblick auf *H*-bedingte auslösende Ereignisse dahingehend zu überprüfen, ob weitere zu modifizierende Basisereignisse enthalten sind, z. B. wäre:

- bei Personalhandlungen zu bewerten, ob sie unter den Bedingungen der übergreifenden Einwirkung *H* überhaupt noch durchzuführen sind, oder
- bei Notfallmaßnahmen auch die *H*-bedingte Durchführbarkeit zu überprüfen.

Es ist bei Aufstellung der *H-EL* darauf zu achten, dass die aus der PSA Stufe 1 für interne auslösende Ereignisse festgelegten Komponentengrenzen auch für die zusätzlich aufgenommenen BSK und deren Ausfallarten angenommen werden. Die Konsistenz der Modellerweiterung ist zu überprüfen, /KLU 15/, Kapitel 4.1.2.1.

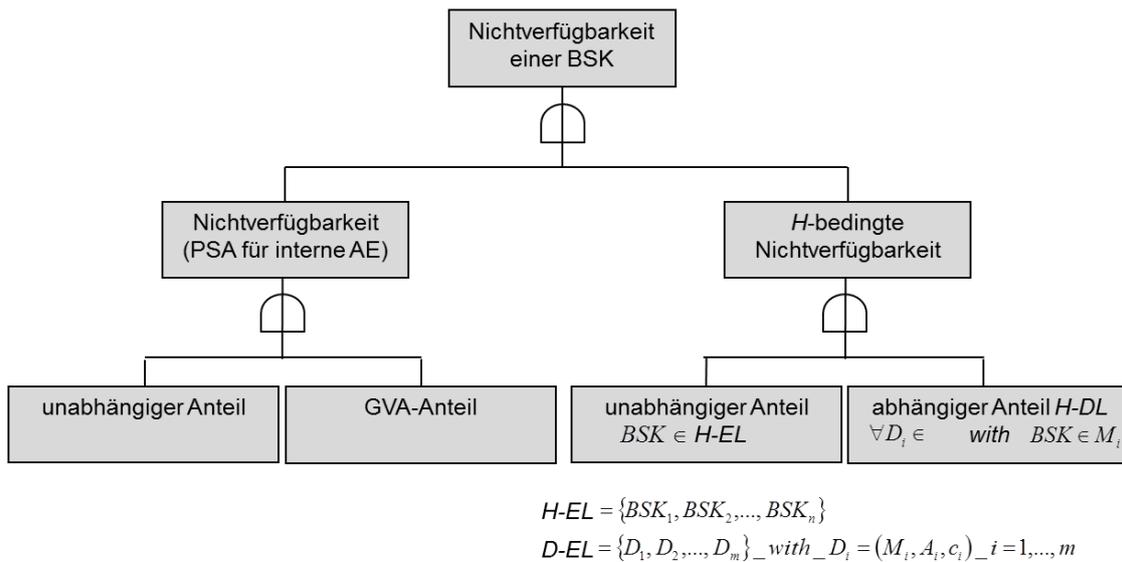
Die so erhaltene vorläufige Ausrüstungsliste ist umfassend und kann grundsätzlich genutzt werden, um das PSA-Modell entsprechend zu erweitern. In den meisten Anwendungsfällen wird die vorläufige Ausrüstungsliste viel zu umfangreich sein, um effektiv bei der Quantifizierung im PSA-Modell eingesetzt werden zu können.

Eine systematische (automatische) Erweiterung des Basis-PSA-Modells kann für alle BSK aus a) vorgenommen werden (siehe dazu Abb. 2.8). Die Nichtverfügbarkeit einer BSK wird im Fehlerbaum durch ein ODER-Gatter beschrieben. Die Basisereignisse zum unabhängigen Ausfall und zum GVA-Anteil der BSK sind in der Basis-PSA die Gattereingänge. Jedes Gatter einer H-relevanten BSK wird um einen weiteren Eingang ergänzt, der den unabhängigen Anteil der *H*-bedingten Nichtverfügbarkeit beschreibt. Zur Ergänzung mit einem eventuell erforderlichen abhängigen Anteil der *H*-bedingten Nichtverfügbarkeit, siehe Kapitel 2.3.2.3.

In einem zweiten Auswahlschritt, quantitative Auswahl genannt, wird die endgültige Ausrüstungsliste erzeugt. Der Umfang der Ausrüstungsliste ändert sich nicht, allerdings ist für jede BSK der Liste die *H*-bedingte Versagenswahrscheinlichkeit bestimmt worden. Dabei kann es durchaus passieren, dass manchen BSK ein Wert für die Versagenswahrscheinlichkeit zugeordnet wird, der kleiner als ein zuvor in der PSA-Analyse festgelegter Schwellenwert ist, d. h. der Einfluss des unabhängigen *H*-bedingten Ausfalls der BSK wird als vernachlässigbar bewertet. Der zweite Auswahlschritt kann durch zielgerichtete Begehungen unterstützt werden (siehe auch Abb. 2.8).

Die endgültige Ausrüstungsliste beinhaltet zum einen sämtliche *H*-relevanten BSK (bis hierher haben wir es mit der vorläufigen Ausrüstungsliste zu tun) und die quantitative Bewertung, die *H*-bedingten Versagenswahrscheinlichkeiten, der BSK. Streicht man alle vernachlässigbaren BSK aus der vorläufigen Ausrüstungsliste, so erhält man die endgültige Ausrüstungsliste.

Dieses Vorgehen der bewerteten *H*-EL ist sowohl für den Ersteller als auch für den Gutachter (oder Nutzer) der PSA vorteilhaft. Es kann jederzeit nachvollzogen werden, welche BSK *H*-relevant sind und warum sie in das Anlagenmodell einbezogen worden sind oder nicht.



**Abb. 2.8** Modellerweiterung der Basis-PSA

Das PSA-Modell der Basis-PSA braucht nur um das Ausfallverhalten aller *H*-relevanten BSK erweitert werden, die nicht vernachlässigbar sind.

Unabhängig von der tatsächlichen Auslegung gegen *H* können BSK aus einer weiteren (detaillierteren) Betrachtung ausgeschlossen werden, die bei einer quantitativen Analyse des *H*-bedingten Risikos keinen wesentlichen Beitrag erwarten lassen. Ob eine Komponente einen wesentlichen Beitrag zur *H*-bedingten Nichtverfügbarkeit des entsprechenden Sicherheitssystems liefert, erfordert die Beurteilung der Widerstandsfähigkeit dieser Komponente gegen Lasten aus *H*. Um den Umfang einer Analyse sinnvoll zu begrenzen, können als Ergebnis dieses Auswahlverfahrens BSK eliminiert werden, die sich durch eine hohe Widerstandsfähigkeit gegen Lasten aus *H* auszeichnen. Damit würden diese Komponenten einen verschwindend kleinen Beitrag zur Kernschadenshäufigkeit leisten.

Die Methoden, Verfahren und Bewertungsmöglichkeiten zur Bestimmung der Versagenswahrscheinlichkeiten von BSK im Fall einer übergreifenden Einwirkung *H* sind abhängig von der betrachteten übergreifenden Einwirkung und deren Intensität. In Kapitel 4 wird die Bestimmung der seismischen Versagenswahrscheinlichkeit von BSK mit dem Sicherheitsreservfaktorverfahren diskutiert, in Kapitel 2.3.2.5 die Bestimmung der brandbedingten Ausfallwahrscheinlichkeit mit Hilfe raumbezogener brandspezifischer Ereignisabläufe.

### 2.3.2.3 Aufstellung der Liste *H*-DL

Jede Abhängigkeit *D* kann mit einem Tripel von Werten  $\{M, A, C\}$  beschrieben werden, siehe dazu die Ausführungen zum allgemeinen Abhängigkeitsmodell in Kapitel 3.1.

Es sind alle Abhängigkeiten *D* in einer Liste *H*-DL zusammenzustellen, die auf Grund der übergreifenden Einwirkung *H* wirksam werden. Es geht dabei um die Frage, ob eine übergreifende Einwirkung *H* das Ausfallverhalten von BSK in BSK-Mengen abhängig beeinflusst. In den folgenden Kapiteln wird eine Vielzahl von Beispielen angeführt, insbesondere für seismische Einwirkungen (Kapitel 2.3.2.4) und für Brandfolgen (Kapitel 2.3.2.5).

Bei der qualitativen Auswahl von Abhängigkeiten *D* für die Liste *D*-EL kann auf folgende Art und Weise vorgegangen werden (siehe auch Abb. 2.7):

- a) Folgefehler auf Grund *H*-relevanter BSK-Ausfälle,
- b) Festlegung von grundlegenden Kriterien zur Zuordnung von BSK,
- c) Ausfälle auf Grund bedingter übergreifender Einwirkungen,
- d) Durchführung zielorientierter Anlagenbegehungen.

Nachfolgend finden sich einige allgemeine Erläuterungen zu den vorgeschlagenen qualitativen Auswahlritten. Wichtig bei der Aufstellung der Abhängigkeitsliste ist es, die von der übergreifenden Einwirkung *H* ausgelösten Wirksamkeitsmechanismen detailliert zu untersuchen und festzustellen, ob dadurch Ausfallabhängigkeiten generiert werden. Die Menge der von einem konkreten Wirksamkeitsmechanismus betroffenen BSK ist festzustellen sowie die Stärke der Korrelation bei Wirksamwerden des Mechanismus zu bestimmen.

#### zu a) Folgefehler auf Grund *H*-relevanter BSK-Ausfälle

Nach Definition gehören zu den *H*-relevanten BSK auch solche, deren *H*-bedingter Ausfall in der Folge eine oder mehrere BSK von Sicherheitssystemen zum Ausfall bringen kann, z. B. erzeugt ein Gebäudeschaden auf Grund einer seismischen Einwirkung Ausfälle von *H*-relevanten BSK.

#### zu b) Festlegung von grundlegenden Kriterien zur Zuordnung von BSK

Es ist am Beginn der Analyse festzulegen, warum welche BSK in einer Abhängigkeitsmenge zusammengefasst werden.

- zu c) Ausfälle auf Grund bedingter übergreifender Einwirkungen  
Eine übergreifende Einwirkung kann zur Ursache weiterer übergreifender Einwirkungen werden (z. B. Brände in Folge von Erdbeben). Es ist festzulegen, wie diese Abhängigkeiten im Anlagenmodell umgesetzt werden. Eine Möglichkeit ist die Beschreibung der Abhängigkeiten mit dem Abhängigkeitsmodell.
- zu d) Durchführung zielorientierter Anlagenbegehungen  
Die Begehungen werden im Zusammenhang mit der Erstellung der Liste *H-EL* durchgeführt (siehe Kapitel 2.3.2.2, dort zu d) und Abb. 2.7).

Die so erhaltene vorläufige Abhängigkeitsliste ist umfassend und kann grundsätzlich genutzt werden, um das PSA-Modell entsprechend zu erweitern. In den meisten Anwendungsfällen wird die vorläufige Abhängigkeitsliste viel zu umfangreich sein, um effektiv bei der Quantifizierung im PSA-Modell eingesetzt werden zu können.

Eine systematische Erweiterung des Basis-PSA-Modells kann für alle Abhängigkeiten *D* vorgenommen werden (siehe dazu Abb. 2.8). Für eine Abhängigkeit *D* wird jedes die *H*-bedingte Nichtverfügbarkeit beschreibende Gatter aus der Menge der abhängigen BSK im Abhängigkeitsmodell erweitert (siehe dazu auch Abb. 3.2).

In einem zweiten Auswahlschritt, quantitative Auswahl genannt, wird die endgültige Abhängigkeitsliste erzeugt. Der Umfang der Abhängigkeitsliste ändert sich nicht, allerdings sind für jede Abhängigkeit *D* die erforderlichen Parameter zu bestimmen.

Der zweite Auswahlschritt kann durch zielgerichtete Begehungen unterstützt werden (siehe auch Abb. 2.7).

#### **2.3.2.4 Aufstellung der Listen *S-EL* und *S-DL* bei seismischen Einwirkungen**

Bei den nachfolgenden Ausführungen wird auch auf die Ergebnisse in /TUE 10/ zurückgegriffen. Das in Kapitel 2.3.2.1 allgemein erläuterte Vorgehen zur Bestimmung von *H-EL* und *H-DL* wird hier für die übergreifende Einwirkung Erdbeben angewendet. Dabei entstehen die Ausrüstungsliste *S-EL* und die Abhängigkeitsliste *S-DL*, das *S* steht hier für „seismisch“.

Die Anzahl der BSK in der endgültigen Liste *S-EL* gibt einen Eindruck zum Umfang der Arbeiten zur Bewertung des Risikos bei seismischen Einwirkungen. Für eine umfassende Analyse umfasst die Liste *S-EL* 600 bis mehr als 1000 BSK /IAE 11/.

In PSA der Stufe 1 werden für viele BSK Nichtverfügbarkeiten benötigt, die in den meisten Fällen statistisch ermittelt werden können. Das ist bei der Bewertung von Nichtverfügbarkeiten auf Grund seismischer Einwirkungen nicht möglich. Die Versagenswahrscheinlichkeiten von BSK (auch Fragilities genannt) sind im Fall eines Erdbebens abhängig von der Intensität des Erdbebens am Standort. Die anlagen- und BSK-spezifische Ermittlung von Fragilities ist sehr aufwändig (siehe dazu die Aussagen zur seismischen Kapazität einer BSK in Kapitel 3.1.3.4). Es wird ein Verfahren benötigt, das unter allen BSK eines Kernkraftwerks diejenigen herausfindet, für die zum einen überhaupt Fragilities ermittelt werden müssen, und zum anderen festlegt, in welcher Tiefe die Untersuchungen durchzuführen sind. Dabei steht die Frage, ob generische Fragilities das Ausfallverhalten der BSK ausreichend beschreiben oder ob Untersuchungen erforderlich sind, welche die Spezifik der BSK in der entsprechenden Anlage einbeziehen.

Das entwickelte Auswahlverfahren trifft eine Vorauswahl für den zweiten Hauptarbeits-schritt. Es ist nicht möglich (und auch nicht notwendig) für alle BSK eines Kernkraftwerks seismische Versagenswahrscheinlichkeiten zu ermitteln. Es werden zwei Auswahlstufen unterschieden. Ziel der ersten Auswahlstufe ist es, eine umfassende Liste von BSK zusammenzustellen, deren Fehlfunktion bei seismischer Einwirkung einen Beitrag zur Häufigkeit der Gefährdungszustände liefert. Diese Liste wird, wie nun schon oft erwähnt, seismische Ausrüstungsliste S-EL genannt. Es wird mit einer systematischen Vorgehensweise sichergestellt, dass keine relevanten BSK übersehen werden können. Grob zusammengefasst wird folgendermaßen vorgegangen:

- Erstellung vorläufiger S-EL und S-DL,
- Bestimmung der seismisch relevanten Räume,
- Begehung aller seismisch relevanten Räume,
- Aufbau der endgültigen S-EL und S-DL.

Die vorläufige S-EL besteht im Wesentlichen aus den Komponenten, die im entsprechenden PSA-Modell der Stufe 1 als Basisereignisse enthalten sind. Weiter werden solche BSK hinzugenommen, deren Ausfall allein oder zusammen mit dem Funktionsverlust weiterer BSK zu einem auslösenden Ereignis führen kann.

Zu jeder BSK der vorläufigen S-EL ist der zugehörige Standort (Raum entsprechend Anlagenkennzeichnung (AKZ)) zu bestimmen. Ein Raum, der eine BSK aus der S-EL

enthält, wird seismisch relevant genannt. Alle seismisch relevanten Räume werden begangen, d. h. dass – zumindest bei der Durchführung einer Erdbeben-PSA – auch jede Redundanz begangen wird. Für die Begehungen werden raumbezogene Begehungsformblätter (Checklisten) mit einer Vielzahl von Informationen zur Verfügung gestellt, damit kein Bewertungsaspekt übersehen werden kann. Bei den Begehungen geht es vor allem um die Ergänzung der vorläufigen S-EL um weitere seismisch relevante BSK. Das werden vor allem solche BSK sein, die auf Grund von Abhängigkeiten verschiedener Art bei einem eigenen Ausfall (z. B. Verlust der Standsicherheit) Einfluss auf das Ausfallverhalten von BSK haben, die schon in der vorläufigen S-EL enthalten sind, z. B. sind diejenigen BSK in die S-EL aufzunehmen, die bei einem Erdbebeneignis andere relevante BSK in ihrer Verfügbarkeit beeinträchtigen können (Beispiele hierfür sind BSK der Klasse IIa gemäß KTA 2201 /KTA 11/) /FAK 15/. Es sind die räumlichen Wechselwirkungen zwischen BSK zu analysieren (z. B. Bewertung anordnungsbedingter Abhängigkeiten), d. h. parallel zur Aufstellung der vorläufigen S-EL wird auch eine vorläufige S-DL aufgebaut.

Im Ergänzungsband zum PSA-Leitfaden /FAK 15/ ist im Kapitel 3.6.4 zur übergreifenden Einwirkung Erdbeben ein gesonderter Abschnitt zur Durchführung von Begehungen mit den nachfolgenden Aussagen eingefügt worden: *„Ziel der Begehung ist es, über den Kenntnisstand der Berichte (z. B. Konzeptberichte zu Erdbeben, Nachweise, ...) hinaus Erkenntnisse über die seismische Auslegung der Komponenten zu gewinnen. Damit können z. B. Hinweise auf unzureichende Sicherheitsmargen bei der Verwendung von Sonderkonstruktionen anstatt von Standardkomponenten überprüft werden. Dabei sind vor allem Aspekte zur erdbebengerechten Konstruktion, zur Verankerung und zur räumlichen Situation (Fremdeinwirkung oder Wechselwirkung) zu betrachten. Da eine Anlagenbegehung aufwändig ist, systematisch durchgeführt werden muss und auch nur zu bestimmten Zeitpunkten, wie zum Beispiel der Revision, durchgeführt werden kann, ist die Begehung vorzubereiten. In der Begehung selber müssen die o. g. Aspekte überprüft und anschließend dokumentiert werden.“*

*Begehungsvorbereitung:*

*Der Umfang der Begehung ist festzulegen. Grundsätzlich sind alle Räume mit seismisch relevanten BSK – soweit sie sich unter seismischen Aspekten voneinander unterscheiden – zu begehen. Es ist begründet festzulegen, in welchem Umfang Verteilungssysteme wie Rohrleitungen, Kabelwege und Lüftungssysteme begangen werden. Die Zusammensetzung des Begehungsteams und der Stichprobenumfang sind anlagenspezifisch festzulegen. Es sollten im Team umfangreiche Kenntnisse zum Betrieb*

*der Kraftwerksanlage, zur Durchführung und Auswertung von Systemanalysen und PSA, zu Ausfallarten und Funktionsweisen von BSK unter Erdbebeneinwirkung sowie zu den seismischen Auslegungsanforderungen vorhanden sein.*

*Die zu begehenden Räume und die darin enthaltenen wichtigen Komponenten sind tabellarisch aufzubereiten. Darüber hinaus ist für jede Komponente eine Checkliste zur Überprüfung zu erstellen.*

*Begehungsdurchführung:*

*Die Begehungen sind systematisch durchzuführen. Anhand der vorbereiteten Checklisten sind die Komponenten zu begehen. Dabei ist die Konstruktion auf eine erdbebengerechte Ausführung hin zu betrachten. Darüber hinaus sind die Verankerungen in Augenschein zu nehmen. Dabei ist darauf zu achten, inwieweit Erdbebenkräfte in das Bauwerk eingeleitet werden können. Insbesondere ist auf den Aspekt zu achten, dass gegenüber der Eigenlast durch das Erdbeben Horizontalkräfte auf die Komponente wirken. Um die Wechselwirkungen mit anderen Komponenten zu identifizieren, ist das Umfeld der Komponenten zu betrachten.*

*Alle betrachteten Aspekte sind zu dokumentieren. Dies kann anhand der Checkliste und anhand von Fotos geschehen.*

*Behebungsbewertung:*

*Aus der Begehung sollten im Abgleich mit den vorhandenen Berichten folgende Aussagen für die einzelnen Komponenten abgeleitet werden:*

- Das Versagen der BSK liefert keinen nennenswerten Beitrag zur Häufigkeit von Kernschadenzuständen.*
- Das Versagen der BSK kann durch generische Versagenskurven beschrieben werden.*
- Die Ableitung anlagenspezifischer Versagenskurven mit dem Sicherheitsreservecorrespondenz-Verfahren ist erforderlich.“*

Nach Abschluss der Begehungen enthält die S-EL sämtliche BSK mit dem Potenzial, bei einem Erdbeben zur Häufigkeit von Schadenzuständen beitragen zu können und die S-DL alle potenziell vorhandenen seismischen Ausfallabhängigkeiten.

Die zweite Auswahlstufe beschäftigt sich ausschließlich mit den BSK der in der ersten Auswahlstufe definierten S-EL. Eventuelle Abhängigkeiten im seismischen Ausfallverhalten der BSK sind in der Abhängigkeitsliste S-DL vermerkt. Bei der zweiten Auswahl-

stufe geht es um Quantifizierungsfragen. Dabei ist es immer noch möglich, Ausfälle und Abhängigkeiten als vernachlässigbar zu klassifizieren.

Ziel der zweiten Auswahlstufe ist es, alle BSK der S-EL und alle Abhängigkeiten der D-EL nach Risikorelevanz zu klassifizieren und schließlich die Ausfallwahrscheinlichkeiten zu ermitteln.

Die BSK der S-EL werden folgendermaßen klassifiziert:

- Versagen bei Erdbeben liefert keinen Beitrag zur Häufigkeit von Gefährdungszuständen (Klasse 0).
- Versagenswahrscheinlichkeit bei Erdbeben kann durch generische Versagenskurven beschrieben werden (Klasse 1).
- Die Ableitung anlagenspezifischer Versagenskurven ist zur Bestimmung der Versagenswahrscheinlichkeit bei Erdbeben erforderlich (Klasse 2).

In der Auswahlstufe 2 wird bei der Klassifikation der BSK nach Risikorelevanz ebenfalls zweistufig vorgegangen. Zunächst wird versucht, möglichst viele BSK auf der Grundlage der erarbeiteten Daten und Informationen unter Einbeziehung von Expertenwissen zu klassifizieren. Dazu können die BSK nach Ähnlichkeitsmerkmalen gruppiert werden. Ist eine Klassifikation auf Grund der vorliegenden Informationen nicht möglich, werden diese (kritische BSK) zur Entscheidungsfindung bei einer weiteren Begehung zurückgestellt. Entsprechend wird bei der Bewertung der Abhängigkeiten vorgegangen. Sollte eine Quantifizierung auf der Grundlage der in der Datenbank vorhandenen Informationen nicht möglich sein, sind Vor-Ort-Begutachtungen durchzuführen.

Nachfolgend einige Aussagen zum Vorgehen beim Aussondern von BSK, die gegen seismische Lasten besonders widerstandsfähig sind (und damit keinen Beitrag zur Häufigkeit von Gefährdungszuständen liefern). Eine Zusammenstellung generischer Versagenswahrscheinlichkeiten kann dabei genutzt werden (siehe dazu die Anmerkungen in Kapitel 4.2).

Unter Zuhilfenahme von Bewertungsgrößen der Erdbebenfestigkeit sind quantitative Klassifikationskriterien zu entwickeln, die für den nachfolgenden Ausschluss von BSK benutzt werden. Grundlage für den Ausschluss bilden generische Daten für die Widerstandsfähigkeit von Standardkomponenten aus der internationalen Fachliteratur. Erfül-

len die BSK bzw. die zugehörigen generischen Werte die Klassifikationskriterien, gehören sie zur Klasse 0 und brauchen nicht weiter betrachtet werden.

Bewertungsgrößen der Erdbebenfestigkeit sind die seismische Kapazität einer BSK (siehe dazu den entsprechenden Abschnitt in Kapitel 3.1.3.4) oder der Wert der Beschleunigung am Fußpunkt einer BSK bei dem die BSK mit Wahrscheinlichkeit 0,05 mit einem Konfidenzniveau von 95 % versagt. Dieser Wert wird HCLPF-Wert genannt (siehe auch die Begriffserklärungen in Tab. 9.1).

Bei der Aussonderung von BSK ist zu beachten, dass deren Versagen sich sehr unterschiedlich auf das Analyseergebnis auswirken kann:

- direkter Unfall,
- Auslösung eines Auslegungsstörfalls,
- Ausfall eines zur Beherrschung erdbebenbedingter Störfälle benötigten Systems,
- Ausfall eines Teilsystems von zur Beherrschung erdbebenbedingter Störfälle benötigten Systems (Redundanz).

Für diese Arten von BSK-Ausfällen sind zur Auswahl quantitative Kriterien zu entwickeln, die im Wesentlichen auf folgenden Kenngrößen beruhen:

- Eintrittshäufigkeit eines seismischen Ereignisses im Bereich des Bemessungserdbebens,
- Wahrscheinlichkeit für eine Störfallauslösung bei einem seismischen Ereignis im Bereich des Bemessungserdbebens (generische Werte z. B. in /NRC 08/),
- Versagenswahrscheinlichkeit der BSK im Bereich des Bemessungserdbebens.

In Abhängigkeit von der standortspezifischen Größe der ersten beiden Werte und einer Festlegung zur Größe des Risikobeitrags (Produkt der drei genannten Werte, z. B. kleiner als  $1,00 \text{ E-}08/a$ ) kann dann ein erforderlicher HCLPF-Wert abgeleitet werden, damit eine BSK der Klasse 0 zugeordnet werden kann.

Eine Beschreibung der Abhängigkeiten bei erdbebenbedingten Bränden findet sich in Kapitel 3.2.

### 2.3.2.5 Aufstellung der Listen *F-EL* und *F-DL* bei Brandanalysen

Im Anhang A.1 ist die Durchführung einer Brand-PSA dokumentiert, die auf dem hier beschriebenen Vorgehen der systematischen Erweiterung von Fehlerbäumen mit Hilfe von Ausrüstungs- und Abhängigkeitslisten beruht.

Es liege eine PSA der Stufe 1 vor. Es ist entsprechend dem dargestellten Vorgehen in Kapitel 2.3.2, Abb. 2.8 eine systematische Erweiterung der Fehlerbäume durchzuführen. Dazu ist eine Brand-Ausrüstungsliste *F-EL* und eine Brand-Abhängigkeitsliste *F-DL* aufzustellen.

Entsprechend dem allgemeinen Vorgehen zur Aufstellung von Ausrüstungslisten, beschrieben in Kapitel 2.3.2.2, werden aus der Gesamtheit der BSK alle diejenigen mit folgenden Eigenschaften zur weiteren Betrachtung ausgewählt:

- Die BSK kann auf Grund einer Brandauswirkung ausfallen, und
- die BSK ist brandrelevant.

Eine BSK wird brandrelevant genannt, wenn

- der brandbedingte Ausfall der BSK zur Entstehung eines auslösenden Ereignisses beiträgt, oder
- die BSK Teil eines Sicherheitssystems ist, oder
- der brandbedingte Ausfall der BSK in der Folge eine oder mehrere BSK des Sicherheitssystems zum Ausfall bringen kann.

Eine Besonderheit der Untersuchung von brandbedingten Ausfällen einer BSK besteht darin, dass der brandbedingte Ausfall durch Schäden an der BSK selbst oder durch Schäden an den der BSK zugeordneten Versorgungssystemen, hier insbesondere elektro- und leittechnischen Kabeln, verursacht werden kann. In anderen Worten bedeutet das, dass der Brand nicht nur am tatsächlichen Aufstellungsort der BSK Schäden bezüglich der Komponentenfunktionalität verursachen kann, sondern an allen Orten, von denen aus ein Brand Versorgungssysteme der Komponente oder die Komponente selbst erreichen kann.

Dieser Zugang wird durch das sogenannte Raumkonzept einer Brand-PSA beschrieben. Zur Durchführung einer probabilistischen Analyse zum Einfluss von Bränden in

Kernkraftwerken auf das Risiko werden die räumlichen Gegebenheiten der Anlage in geeignete Raumeinheiten unterteilt. Diese räumlichen Einheiten werden Räume genannt. Dies ist allerdings nur eine begriffliche Vereinbarung, denn derartige Räume entsprechen nicht unbedingt einem Raum in dem Sinne, dass ein Raum eine durch Wände, Decke und Boden umgrenzte Raumeinheit darstellt. Grundsätzlich werden für die Analyse solche Räume genutzt, für die eine Bezeichnung in der Anlagen-Nomenklatur vorhanden ist. In Abhängigkeit vom notwendigen Detaillierungsgrad der Analyse und auf Grund brandspezifischer Aspekte kann eine feinere oder gröbere räumliche Unterteilung gewählt werden. Bei vorbereitenden Screening-Analysen zur Abschätzung der brandbedingten Kernschadenshäufigkeit kann das räumliche Gitter, mit dem die Gebäude der Anlage beschrieben werden, sehr grobmaschig sein (z. B. kann jeder Raum ein durch feuerwiderstandsfähige Wände abgegrenzter Brandbereich sein); im Fall von Detailanalysen kann ein Raum auch nur den Ort der Brandentstehung an einer Komponente beschreiben.

Das brandbedingte Risiko des Kernkraftwerks ergibt sich aus der Summe der brandbedingten Risiken, die von den einzelnen Räumen ausgehen. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Menge aller Räume zumindest alle im Sinne der PSA relevanten Gebäude des Kernkraftwerks beschreibt und dass die Räume sich paarweise nicht überlappen. Gebäude nennt man relevant, wenn bei einem Brand Einrichtungen des Gebäudes zu Schaden kommen können, deren Ausfall einen Beitrag zur Häufigkeit der Zielgröße der Analyse liefern.

Die Brand-Ausrüstungsliste *F-EL* enthält zu jeder relevanten BSK einschließlich der zugehörigen Kabel den Raum, in dem sich die BSK selbst oder die Kabel befinden. In Abb. 2.8 ist z. B. die Komponente  $K_1$  mehrfach eingetragen. Sie ist den Räumen R1, R2, R3 und R4 zugeordnet. Im Raum R1 befindet die Komponente selbst, durch die Räume R3 und R4 verläuft ein Leittechnik-Kabel und durch Raum R2 das Kabel für die allgemeine Stromversorgung.

Anhand der Liste der relevanten BSK, Kenntnissen zu den Versorgungssystemen der BSK und der BSK-Raum-Zuordnung kann jetzt die Brand-Ausrüstungsliste *F-EL* erstellt werden.

Natürlich sind auch zur Aufstellung von *F-EL* umfangreiche Begehungen erforderlich, z. B. ist sicherzustellen, dass die BSK-Raum-Zuordnung (abgeleitet aus verschiedenen Kraftwerksunterlagen) den tatsächlichen Gegebenheiten entspricht.

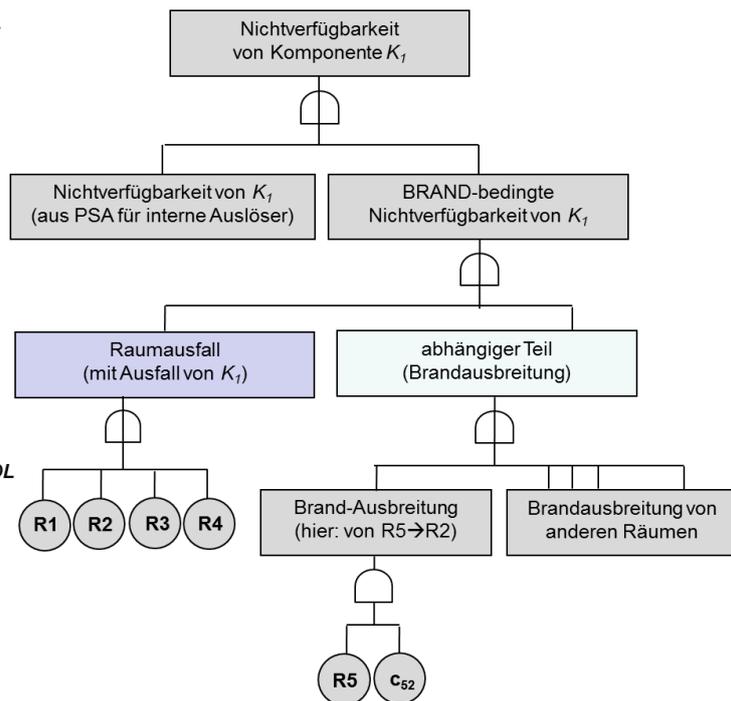
Die fertige *F-EL* kann nun zur Erweiterung des Anlagenmodells der PSA Stufe 1 genutzt werden. Die Nichtverfügbarkeit einer Komponente aus PSA der Stufe 1 ist zu ergänzen um brandbedingte Nichtverfügbarkeiten. Hier muss noch betont werden, dass angenommen wird, dass bei einem Brand in einem Raum sämtliche BSK im Raum ausfallen. Im Beispiel in Abb. 2.8 heißt das, dass die Komponente  $K_1$  brandbedingt ausfällt, wenn es in einem der Räume R1 bis R4 zum Brand kommt. Für die Quantifizierung des Fehlerbaums sind die Wahrscheinlichkeiten der Raumausfälle zu bestimmen (Details dazu siehe /TUE 15c/).

Auszug aus der Brand-Ausrüstungsliste *F-EL*

Komp.	Raum	Bemerkung
$K_1$	R1	Komponente (e.g. Motorschieber)
$K_1$	R2	Stromkabel
$K_1$	R3	LT-Kabel
$K_1$	R4	LT-Kabel
$K_1$	...	...
...	...	...
$K_n$	...	...

Auszug aus der Brand-Abhängigkeitsliste *F-DL*

Brandraum	benachbarter Raum	$c_{ij}$
...	...	...
R5	R2	$c_{52}$
...	...	...
...	...	...



**Abb. 2.9** Nutzung von Ausrüstungs- und Abhängigkeitslisten zur Fehlerbaumerweiterung um brandbedingte Ausfälle

Über die Brand-Abhängigkeitsliste *F-DL* kann der Prozess der Brandausbreitung beschrieben werden. Die Brand-Abhängigkeitsliste *F-DL* enthält zu jedem benachbarten Raumpaars  $R_A$  und  $R_B$  die Brandübergangswahrscheinlichkeit  $c_{AB}$ . Die Modellierung von Brandausbreitungen in direkt benachbarte Räume (Ausbreitungstiefe 1) ist in Abb. 2.9 dargestellt. Die Berücksichtigung einer größeren Ausbreitungstiefe ist möglich. Die Fehlerbäume werden dazu rekursiv erweitert, d. h. entsprechend der Darstellung in Abb. 2.9 setzt sich dann der Raumausfall von R5 aus der Wahrscheinlichkeit eines Raumausfalls durch einen Brand in R5 selbst und durch die Brandwahrscheinlichkeiten in den direkten Nachbarräumen von R5 einschließlich der Brandübergangswahrscheinlichkeiten nach R5 zusammen. Diesen Prozess kann man bis in beliebige Ausbrei-

tungstiefen fortsetzen, man sollte aber beachten, dass mit einer großen Ausbreitungstiefe die Ausbreitungswahrscheinlichkeit in den Zielraum sehr klein ist. In der Mehrzahl der Anwendungsfälle reicht die Betrachtung der Ausbreitungstiefe 1.

Ein praktisches Beispiel für die hier vorgestellte Vorgehensweise ist in Anhang 0 ausführlich dargestellt.

### **2.3.2.6 Anwendung des Vorgehens bei der Bewertung biologischer Phänomene**

Eine Recherche nationaler und internationaler Literatur zu PSA für übergreifende Einwirkungen hat keinerlei Hinweise dahingehend ergeben, dass probabilistische Analysen durchgeführt wurden, um das von biologischen Phänomenen ausgehende Risiko quantitativ zu bewerten. Die übergreifende Einwirkung 'biologische Phänomene' wurde im Rahmen von PSA im Wesentlichen auf Grund qualitativer Argumente von detaillierten Untersuchungen ausgenommen. Der bedingte Schadensprozess verläuft meist langsam, kann beobachtet, kontrolliert und im Hinblick auf die Schadenswirkung positiv beeinflusst werden.

Im EU-Vorhaben ASAMPSA\_E sollen zu folgenden übergreifenden Einwirkungen von außen Anleitungen zur Durchführung entsprechender probabilistischer Analysen erarbeitet werden:

- Erdbeben,
- externe Überflutung,
- extreme Wettersituationen,
- Blitzschlag,
- biologische Phänomene,
- anlagenexterne Explosion,
- anlagenexterner Brand,
- Flugzeugabsturz.

Diese Auswahl wurde von den 28 teilnehmenden Organisationen auf der Grundlage der in den entsprechenden Ländern vorliegenden Betriebserfahrung getroffen. Nach-

folgend sind erste Überlegungen zur (standardisierten) Durchführung von probabilistischen Untersuchungen für die übergreifende Einwirkung 'biologische Phänomene' zusammengefasst. Die Überlegungen werden im Projekt ASAMPESA\_E fortgesetzt und in einen entsprechenden Leitfaden einfließen.

Nach PSA-Methodenband /FAK 05/ sind biologische Phänomene als übergreifende Einwirkung probabilistisch zu bewerten, allerdings sind keine methodischen Hinweise für die Durchführung der Analyse gegeben.

In deutschen PSA, die im Rahmen der Sicherheitsüberprüfung (SÜ) nach Atomgesetz durchgeführt worden sind, werden sinngemäß folgende Aussagen getroffen, aus denen dann gefolgert wird, dass für die übergreifende Einwirkung 'biologische Phänomene' keine probabilistische Analyse durchgeführt werden muss:

- Auswertung Betriebserfahrung:  
Biologische Phänomene, die die Sicherheit des Kernkraftwerks gefährden können, sind aus der Betriebserfahrung (für das jeweils betrachtete Kraftwerk) nicht bekannt.
- Vorsorgemaßnahmen:  
Der Schwerpunkt der Überwachungsmaßnahmen von langsam verlaufenden Schädigungen durch biologische Phänomene liegt auf Sichtprüfungen.  
Zur Verhinderung von an der Wasseroberfläche schwimmenden Pflanzenteilen sind Schwimmteilabweiser vorgesehen.  
Es gibt Reinigungsanlagen, wie Grob- und Feinrechen oder Siebbandanlagen. Diese sind an das Notstromnetz angeschlossen. Die Reinigungsanlagen der Grob- rechen sind redundant ausgelegt.
- Schadensmechanismen:  
Blockierung und Verstopfung von Einlaufbauwerk oder Kühlwasserkanälen durch organisches Material, insbesondere Muscheln, Fische, Quallen, Algen und Tang; Detritus-Ablagerungen führen zur Minderung der Qualität von Wärmetauschern.
- Das Zusetzen des Einlaufbauwerkes und von Kühlwasserkanälen ist ein langsamer Vorgang, der spätestens bei Ausfall der gesicherten Nebenkühlwasserversorgung bemerkt wird. Ein unbemerktes Zusetzen würde zum Ausfall der Hauptwärmesenke führen.

- Nimmt man einen vollständigen Ausfall der Nebenkühlwasserversorgung an, so ist die Nachwärmeabfuhr durch Frischdampfabgabe über Dach gegeben.
- Gegen große Säugetiere ist die Anlage durch den Zaun geschützt. Kleinere Tiere, wie Nager, Vögel und Insekten, werden als nicht relevant angenommen.

Auf Grund der in diesem Bericht abgeleiteten Vorgehensweise zur Erstellung der Liste  $L_{ges}$  ist noch eine Begutachtung des Standortes durchzuführen und die entsprechend gefundenen Kombinationen mehrerer übergreifender Einwirkungen zu bewerten. Dies betrifft dann z. B. solche Fälle wie Überflutung durch Dammbbruch und dadurch Losreißen von großen Mengen organischen Materials, nicht abgestimmte Wehröffnung bei einem Damm und den damit verbundenen Abgang von organischem Material, Erhöhung der Fließgeschwindigkeit durch Starkregen und Mitführung von biologischem Material oder auch das Hereintreiben von biologischem Material Richtung Einlaufbauwerk (Blätteranfall im Herbst) bei starkem Sturm.

Die Standortbewertung ist auch durchzuführen, um eventuelle Sonderfälle zur übergreifenden Einwirkung 'biologische Phänomene' ausschließen zu können (Nagetierbefall, Zusetzen von Lüftungseinrichtungen auf Grund von Vogelnestern, Termiten u. ä.).

Nachfolgend wird das Vorgehen entsprechend der in Kapitel 1 vorgestellten Konzeption zur Durchführung einer standortspezifischen PSA dargestellt.

Zuerst ist die Liste  $L_{ges}$  zu erstellen. Hier interessieren uns aus der Menge der übergreifenden Einwirkungen nur die biologischen Phänomene. Nach einer Standortbegehung und -begutachtung liegt eine Teilliste  $L_{ges,Bio}$  von  $L_{ges}$  vor. Die Liste  $L_{ges,Bio}$  enthält alle biologischen Phänomene, die nach gemeinsamen Verständnis von Betreibern, PSA-Erstellern und Gutachtern am Standort auftreten können und bewertet werden müssen. Nach dem in Kapitel 2.2 beschriebenen Vorgehen zur Erstellung von  $L_{ges}$  enthält diese Teilliste  $L_{ges,Bio}$  auch Kombinationen übergreifender Einwirkungen. Einige Beispiele sind oben aufgeführt, z. B. starker Sturm und Anfall von organischem Material in den Einlaufkanälen.

Jede übergreifende Einwirkung der Liste  $L_{ges,Bio}$  ist zu diskutieren. Es sollte grundsätzlich versucht werden, eine Abschätzung des quantitativen Beitrags zum Risiko für jede übergreifende Einwirkung der Liste  $L_{ges,Bio}$  zu ermitteln. Man erhält eine Abschätzung für die Häufigkeit der Schadenszustände aus Produkt (und Summe) folgender Größen:

- Eintrittshäufigkeit der übergreifenden Einwirkung (in verschiedenen Abstufungen bezüglich der Einwirkungsstärke),
- bedingte Wahrscheinlichkeit(en) der durch die übergreifende Einwirkung hervorgerufenen auslösenden Ereignisse,
- Nichtverfügbarkeit der zur Störfallbeherrschung notwendigen Systemfunktionen für jedes der auslösenden Ereignisse.

Natürlich sind bei solchen Abschätzungen eventuell vorhandene Abhängigkeiten zu berücksichtigen. Eine detaillierte quantitative Bewertung wird in vielen Fällen nur schwer möglich sein, aber alle Möglichkeiten von Abhängigkeiten sollten zumindest qualitativ diskutiert werden, um schließlich einen angemessenen Risikozuschlag ermitteln zu können.

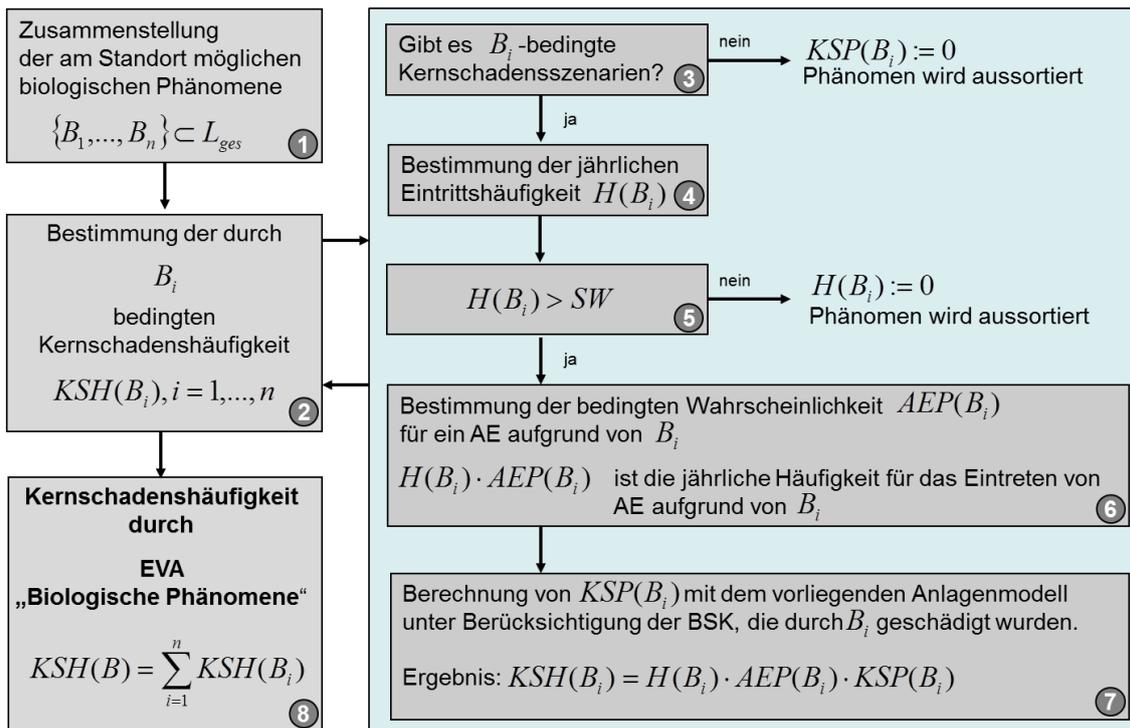
Zum Beispiel habe eine Standortanalyse ergeben, dass als 'biologisches Phänomen' ein verstärkter Algenbefall in Frage kommt. Der 'verstärkte Algenbefall' ist also ein Element der Liste *L<sub>ges,Bio</sub>*. Zur Berechnung des Risikos sind folgende Größen zu berechnen:

- Eintrittshäufigkeit des verstärkten Algenbefalls  
(Die Auswertung historischer Unterlagen ergibt z. B., dass im Mittel alle 100 Jahre verstärkter Algenbefall auftritt. Es ist klar, dass zusätzlich definiert werden muss, was 'verstärkter Algenbefall' bedeutet. Es könnten z. B. die Mengen an Biomasse ermittelt werden, die bei der konkreten Auslegung der Anlage zur Verstopfung aller Kühlwasserkanäle führen würden. Diese Menge von Biomasse wird kritisch genannt.)
- Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, dass bei Auftreten eines kritischen Algenbefalls tatsächlich eine Verstopfung der Kühlwasser- und Einlaufbauwerke eintritt und es zu einem auslösenden Ereignis kommt?  
(Eine Annahme könnte z. B. sein, dass bei Anfall der deterministisch bestimmten kritischen Menge an Biomasse die Verstopfung der Kanäle der Nebenkühlwasserversorgung mit Wahrscheinlichkeit 1 erfolgt. Eine geeignete Abstufung der bedingten Verstopfungswahrscheinlichkeit bei geringeren Mengen an Biomasse kann abschätzend ermittelt werden. Anlagenspezifisch ist zu ermitteln, inwieweit aus der Verstopfung der Kühlwasserkanäle ein oder mehrere auslösende Ereignisse, z. B. Ausfall der Hauptwärmesenke, folgen können. Entsprechende Wahrscheinlichkeiten sind zu bestimmen.)

- Nichtverfügbarkeit der zur Störfallbeherrschung notwendigen Systemfunktionen für jedes der auslösenden Ereignisse  
(Diese Nichtverfügbarkeiten können aus der PSA Stufe 1 entnommen werden. Vorher ist zu prüfen, ob entsprechend der Listen *B-EL* und *B-DL* (*B* steht dabei für biologische Phänomene) das Anlagenmodell zu modifizieren ist.)

Eine Aufstellung der Listen *B-EL* und *B-DL* wird für die meisten Fälle nicht erforderlich sein.

Im Idealfall könnte es sein, dass die Eintrittshäufigkeit des zu betrachtenden auslösenden Ereignisses im Anlagenmodell mit einem Fehlerbaum modelliert wurde. Dann können für das biologische Phänomen 'kritischer Algenbefall' alle Kühlwasserpumpen in die Liste *B-EL* aufgenommen. Zusätzlich können Abhängigkeiten modelliert werden, denn aus der Verstopfung eines Kühlwasserkanals folgt der Ausfall der zugeordneten Kühlwasserpumpen. In *B-DL* könnten z. B. die Gruppen der Hauptkühlwasserpumpen und Nebenkühlwasserpumpen entsprechend ihrer Zuordnung zu den Einlaufkanälen aufgenommen werden. Der Auslöserfehlerbaum würde dann entsprechend Abb. 2.8 mit den Angaben in *B-EL* und *B-DL* modifiziert werden können. Die Eintrittshäufigkeit des auslösenden Ereignisses (hier: Ausfall der Hauptwärmesenke) auf Grund der übergreifenden Einwirkung kann berechnet werden.



**Abb. 2.10** Bestimmung der Kernschadenshäufigkeit durch biologische Phänomene (siehe auch die Erläuterungen in Tab. 2.16 zu den markierten Arbeitspunkten)

In den meisten Fällen wird man konservative Abschätzungen treffen müssen, d. h. aus dem Eintreten der übergreifenden Einwirkung die bedingte Wahrscheinlichkeit des daraus folgenden übergreifenden Ereignisses ermitteln. Eine Bereitstellung von B-EL und B-DL wird dann nicht nötig sein, trotzdem sollte überlegt werden, ob die zu bewertende übergreifende Einwirkung noch weitere Schäden an risikorelevanten BSK hervorrufen kann.

In Abb. 2.10 und Tab. 2.16 wird das Vorgehen zur Bestimmung der Kernschadenshäufigkeit durch die übergreifende Einwirkung ‘biologische Phänomene’ zusammengefasst erläutert.

**Tab. 2.16** Bestimmung der Kernschadenshäufigkeit durch biologische Phänomene  
(Erläuterungen zu Abb. 2.10)

Arbeitsschritt	Anmerkungen und Erläuterungen
1	Im ersten Arbeitsschritt der Durchführung einer standortspezifischen HPSA ist die Liste $L_{ges}$ aller standortspezifischen übergreifenden Einwirkungen zu erstellen. Diese Liste enthält auch die am Standort möglichen biologischen Phänomene. Es sei darauf hingewiesen, dass in bisherigen deutschen und internationalen PSA für übergreifende Einwirkungen nicht mehr als zwei biologische Phänomene ( $n \leq 2$ ) betrachtet wurden.
2	Für alle Phänomene aus Arbeitsschritt 1 ist die bedingte Kernschadenshäufigkeit zu bestimmen. In den meisten Fällen werden dies grobe Abschätzungen sein. Die Bestimmung der Kernschadenshäufigkeiten und die Beantwortung der Frage, in welchem Detaillierungsgrad die Analyse durchgeführt werden muss, ist in den Arbeitsschritten 3 bis 7 beschrieben.
3	In diesem Arbeitsschritt stellt man sich die Frage, ob durch das betrachtete biologische Phänomen Schäden an BSK entstehen können, die in Folge einen Risikobeitrag liefern können. Die Herangehensweise ist deterministisch. Man nimmt an, dass das biologische Phänomen zum Ausfall von BSK führt. Es ist dann zu hinterfragen, ob diese Ausfälle und unter welchen Umständen zu auslösenden Ereignissen führen können. Ist das nicht der Fall, kann das betrachtete biologische Phänomen als nicht relevant aussortiert werden (oder entsprechend wird die bedingte Kernschadenswahrscheinlichkeit 0 gesetzt). Andernfalls ist das biologische Phänomen weiter zu untersuchen → Arbeitsschritt 4.
4	Die jährliche Eintrittshäufigkeit des biologischen Phänomens ist zu bestimmen. Das ist eine diffizile Aufgabe. Es ist zu fragen, in welchen Intensitäts-Abstufungen das biologische Phänomen betrachtet werden muss. Für jede Intensität der biologischen Einwirkung ist eine Überschreitenshäufigkeit abzuschätzen.
5	In Abhängigkeit vom Gesamtziel der Analyse wird ein Schwellenwert SW definiert. Ist die Eintrittshäufigkeit für die geringste Intensität der biologischen Einwirkung kleiner als SW kann auf die weitere Analyse des biologischen Phänomens verzichtet werden, andernfalls ist das biologische Phänomen weiter zu untersuchen → Arbeitsschritt 6.
6	Es sind für jede Intensität des biologischen Phänomens, die bedingten Eintrittswahrscheinlichkeiten der bedingten AE zu bestimmen. Dazu können z. B. Auslöserfehlerbäume herangezogen werden. Für die BSK der Basisereignisse werden für die Ausfallart, die durch das biologische Phänomen verursacht wird, intensitäts-abhängige Ausfallwahrscheinlichkeiten benötigt.

Arbeitsschritt	Anmerkungen und Erläuterungen
7	Die Berechnung der durch das betrachtete biologische Phänomen bedingten Kernschadenswahrscheinlichkeit (siehe Arbeitsschritt 2) erfolgt mit dem erweiterten Anlagenmodell der PSA Stufe 1. Es ist zu überprüfen, ob BSK des Anlagenmodells infolge des biologischen Phänomens ausfallen können und ob Ausfallabhängigkeiten bestehen. Diese Überprüfung entspricht der Aufstellung von <i>B-EL</i> und <i>B-DL</i> . Bei biologischen Phänomenen werden die Listen <i>B-EL</i> und <i>B-DL</i> in den meisten Fällen leer sein. Die BSK, die durch biologische Phänomene ausfallen können, sind oft nicht in PSA modelliert. Biologische Phänomene verursachen Ausfälle von BSK in Betriebssystemen, diese Ausfälle werden nicht in PSA der Stufe 1 modelliert. Bei biologischen Phänomenen finden sie Berücksichtigung in Auslöserfehlerbäumen. Vereinfachend wird hier angenommen, dass pro biologischen Phänomen $B_i$ nur ein auslösendes Ereignis auftritt. Somit muss nicht eine Summe von $AEP(B_i)$ berücksichtigt werden.
8	Die durch die übergreifende Einwirkung 'biologische Phänomene' erzeugte Kernschadenshäufigkeit ergibt sich aus der Summe der Kernschadenshäufigkeiten der einzeln analysierten biologischen Phänomene aus der Liste $L_{ges}$ .
Abkürzung	Erläuterung
$B_i$	i-tes biologisches Phänomen am Standort, $i = 1, \dots, n$
$H(B_i)$	Eintrittshäufigkeit von Phänomen $B_i$ pro Jahr (eigentlich Kurve der Überschreitenshäufigkeiten in Abhängigkeit von $B_i$ -Intensitätsstufen)
SW	Schwellenwert
$KSP(B_i)$	durch $B_i$ bedingte Kernschadenswahrscheinlichkeit
AE	Auslösendes Ereignis
$AEP(B_i)$	Wahrscheinlichkeit, dass durch $B_i$ das auslösende Ereignis AE hervorgerufen wird
$KSH(B_i)$	Kernschadenshäufigkeit pro Jahr auf Grund von $B_i$
$KSH(B)$	Kernschadenshäufigkeit pro Jahr durch die am Standort auftretenden biologischen Phänomene

### 2.3.2.7 Anwendung des Vorgehens bei der Bewertung der Einwirkung „anlagenexterne Überflutung“

In /KRA 08/ wurden Untersuchungen zu extremen Wetterereignissen und Witterungsbedingungen durchgeführt und am Rande folgendes zur probabilistischen Behandlung von Hochwasserereignissen ausgeführt.

In /IAE 10/ wird Hochwasser (synonym verwendet zu der übergreifenden Einwirkung 'anlagenexterne Überflutung') als Teilaspekt der Einwirkungen von außen behandelt. Folgt man der dort verwendeten Einteilung der Themengebiete (Parametrisierung der Einwirkung, Ermittlung der Eintrittshäufigkeiten, Versagensanalyse für Bauwerke und

Komponenten und Einbindung in die PSA der Stufe 1 für anlageninterne Ereignisse), so lassen sich die Anforderungen für die probabilistische Untersuchung von Hochwassereinwirkungen wie folgt zusammenfassen:

- Zur Parametrisierung des Gefährdungspotenzials von Hochwasserereignissen können die Abflussmenge, die Fließgeschwindigkeit, der Wasserstand, die Dauer des Hochwassers und der Beitrag von Wellen herangezogen werden. Hierbei sind auch ggf. gleichzeitig auftretende Windlasten zu berücksichtigen.
- Für die Ermittlung der Eintrittshäufigkeit sind standortspezifische Daten als Eingangsgrößen für die probabilistische Gefährdungsanalyse zu verwenden, wobei auch die Unsicherheiten dieser Daten vollständig berücksichtigt werden sollen (Fortpflanzung der Unsicherheiten durch die gesamte Analyse).
- Die Versagensanalyse für Bauwerke und Komponenten ist analog derjenigen für Sturmeinwirkungen durchzuführen, wobei im Rahmen der Anlagenbegehung insbesondere auf niedrig gelegene Anlagenteile geachtet werden sollte. In die Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeiten sind auch dynamische Lasten durch Wellengang und die Möglichkeit eines Gründungsversagens mit einzubeziehen.
- Die Einbindung in die PSA der Stufe 1 für anlageninterne Ereignisse erfolgt, indem zusätzlich zu den anlageninternen auslösenden Ereignissen die durch die Hochwassereinwirkung unmittelbar oder mittelbar verursachten Ereignisse betrachtet werden. Zusätzlich sind im Rahmen der Ereignisablaufanalyse alle hochwasserbedingten Auswirkungen auf die Verfügbarkeit von Bauwerken und Komponenten zu berücksichtigen.  
Zusätzlich wird darauf hingewiesen, dass die Fehlerwahrscheinlichkeit für Personalhandlungen entsprechend den ereignisspezifischen Randbedingungen zu modifizieren ist.

Nach /ENS 09/ sind insbesondere Anlagenbegehungen wichtig, bei denen folgende Aspekte untersucht werden muss:

- Abflussmöglichkeiten (Drainage, Neigung des Geländes),
- wasserbauliche Einrichtungen mit ihren Betriebs- und Wartungsvorschriften,
- Pfade, über welche Wasser in die Anlage eindringen können,
- durch Überflutung gefährdete BSK,

- Gefährdung von Dächern auf Grund schwerer Dachlasten,
- Mögliche Verschlimmerung von Überflutungsauswirkungen (z. B. Verstopfung von Abflüssen).

Zur Aufstellung der Ausrüstungsliste für die anlagenexterne Überflutung (hier *F-EL* genannt) beginnt man mit allen BSK, die durch Überflutung gefährdet sind. Dabei sind in erster Linie nur solche BSK von Interesse, die bei Ausfall einen Beitrag zum Risiko leisten. Interessant ist auch die Frage, wie mit Kabeln umgegangen werden muss, siehe dazu erste Untersuchungen in /PIL 15/. Bei Hochwasser sind insbesondere drei Einwirkungen zu betrachten: Überflutung, hydrodynamische Kräfte und die Möglichkeit der Verstopfung von Abflüssen auf Grund von Ablagerungen oder Schutt.

Generell sind natürlich insbesondere die BSK interessant, deren Ausfall auf Grund der Überflutung des Anlagengeländes zu einem auslösenden Ereignis führt. Nach /ENS 09/ wird unterstellt, dass bei Überflutungsereignissen mit einem Wasserstand oberhalb des Geländeniveaus oder des Niveaus der Blocktransformatoren ein Verlust der externen Stromversorgung angesetzt werden muss.

Bei Ausfall eines Gebäudes ist der Ausfall aller im Gebäude befindlichen Komponenten zu unterstellen. Dazu ist das Verhalten relevanter Strukturen bei Einwirkung hydrostatischer und hydrodynamischer Lasten zu untersuchen. Diese Information kann mittels der *F-EL* beschrieben werden.



### **3 Modellierung von Abhängigkeiten bei PSA für übergreifende Einwirkungen**

#### **3.1 Das allgemeine Abhängigkeitsmodell**

Das Ausfallverhalten eines komplexen technischen Systems ist umfassend durch die Menge aller Minimalschnitte beschrieben. Unter einem Minimalschnitt versteht man eine minimale Anzahl von Systemkomponenten, deren gemeinsamer Ausfall zum Ausfall des Systems führt. Sind für jede Systemkomponente die Ausfallwahrscheinlichkeiten bekannt, ergibt sich die Ausfallwahrscheinlichkeit des Systems aus der Summe aller Minimalschnitt-Wahrscheinlichkeiten. Diese Wahrscheinlichkeit ergibt sich pro Minimalschnitt aus dem Produkt der Ausfallwahrscheinlichkeiten aller im Minimalschnitt enthaltenen Systemkomponenten.

Die Zuverlässigkeit eines Systems lässt sich vor allem an zwei Kenngrößen ablesen:

- Umfang der Minimalschnitte  
(Gibt es viele Minimalschnitte mit geringer Anzahl von Systemkomponenten? Bei einem seriell aufgebauten System gibt es mindestens einen Minimalschnitt mit nur einer Systemkomponente, d. h. ein Systemausfall passiert, wenn diese Komponente ausfällt.)
- Zuverlässigkeit der einzelnen Systemkomponenten  
(Ist die Ausfallwahrscheinlichkeit einzelner Systemkomponenten verhältnismäßig groß, erhöht sich die Minimalschnitt-Wahrscheinlichkeit entsprechend).

Komplexe technische Systeme sind so strukturiert und organisiert, dass die Minimalschnitt-Wahrscheinlichkeiten bezüglich unabhängiger Ausfälle von einzelnen Systemkomponenten sehr klein sind, z. B. sind die Systeme hochredundant und diversitär ausgelegt, und die einzelnen redundanten Komponenten haben eine hohe Zuverlässigkeit.

Zur Sicherstellung der Zuverlässigkeit von komplexen technischen Systemen ist zu analysieren, inwieweit Abhängigkeiten im Ausfallverhalten von Systemkomponenten auftreten können. Abhängigkeiten im Ausfallverhalten mehrerer Systemkomponenten können immer auf Ausfallursachen zurückgeführt werden, die mehr oder weniger stark auf die einzelnen Komponenten einwirken. Diese Ausfallursachen können bekannt sein (z. B. Folgefehler, eine Komponente fällt aus und beschädigt dabei mehrere andere

Komponenten) oder unbekannt (GVA-Konzept), können kleine Mengen von Systemkomponenten betreffen (z. B. 3-Komponenten-Parallelsystem, vgl. Kapitel 6.1.1) oder alle Systeme eines Kernkraftwerks (z. B. bei seismischen Einwirkungen).

Alle Arten von Abhängigkeiten im zufälligen Ausfallverhalten von BSK können durch folgende drei Angaben charakterisiert werden:

- Abhängigkeitsmenge:  
Die Abhängigkeitsmenge enthält alle BSK, von denen angenommen wird, dass deren Ausfall von einer gegebenen Ausfallursache abhängt.
- Ausfallursache bei Abhängigkeit:  
Mit der Ausfallursache wird beschrieben, welcher Mechanismus zum abhängigen Ausfall von BSK der Abhängigkeitsmenge führen kann. Die Wirksamkeit der Ausfallursache kann in der Mehrzahl der Fälle durch eine Zufallsfunktion beschrieben werden. Diese Funktion beschreibt, mit welcher Wahrscheinlichkeit die Ausfallursache wirksam wird.
- Umfang der abhängigen Ausfälle:  
Wird eine Ausfallursache bezüglich einer Abhängigkeitsmenge wirksam, ist der Umfang der Wirkung zu beschreiben, d. h. im allgemeinsten Fall, dass für jede Teilmenge mit mehr als zwei BSK aus der Abhängigkeitsmenge eine Ausfallwahrscheinlichkeit bestimmt werden muss. Ist das Ausfallverhalten der BSK der Abhängigkeitsmenge vollständig korreliert, so fällt die gesamte Abhängigkeitsmenge mit Wahrscheinlichkeit 1 bei Wirksamwerden der Ausfallursache aus.

Diese Charakterisierung von Abhängigkeiten wird im allgemeinen Abhängigkeitsmodell umgesetzt (siehe Kapitel 3.1.2). Zur Anwendung des Modells gibt es im Bericht Beispiele in Kapitel 3.1.3 sowie in Anhang B, Abschnitt 0 und 0.

### **3.1.1 Fehlerbaummodellierung von Abhängigkeiten**

Für ein komplexes technisches System  $S$  ist eine Verfügbarkeitsanalyse durchzuführen, d. h. es ist für gegebene Zeitpunkte festzustellen, mit welcher Wahrscheinlichkeit das System nicht verfügbar ist und damit seine Aufgabe nicht erfüllen kann. Das System bestehe aus  $n$  verschiedenen Elementen  $x_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , die zur Erfüllung der Systemaufgabe erforderlich sind (Komponenten, bauliche Strukturen, Teilsysteme, Barrieren, Eingriffe durch das Personal etc.).

Das Ausfallverhalten jedes Systemelements  $x_i$  kann für jeden gegebenen Zeitpunkt  $t$  mit einer Zustandsvariablen  $z_i(t)$  beschrieben werden. Dabei ist  $z_i(t)$  die Wahrscheinlichkeit dafür, dass das Systemelement  $x_i$  zum Zeitpunkt  $t$  nicht verfügbar ist, d. h.  $z_i(t) = p_i(t)$ . Ist der Zustand des Systems  $S$  vollständig durch die Zustände seiner Elemente bestimmt, gilt für die Nichtverfügbarkeit des Systems oder für die Wahrscheinlichkeit eines Systemausfalls zum Zeitpunkt  $t$   $Z_S(t) = \varphi(p_1(t), \dots, p_n(t))$ ;  $\varphi$  heißt Strukturfunktion von  $S$ .

Eine anschauliche Vorgehensweise zur Ableitung einer Strukturfunktion ist die Fehlerbaummethode. Dabei werden die Kombinationen von Systemelementausfällen gesucht, die zum Systemausfall führen. Die Basisereignisse eines Fehlerbaums stehen für die Ausfallwahrscheinlichkeiten der Systemelemente, das TOP-Ereignis steht für die Ausfallwahrscheinlichkeit des Systems, quantifizierbar mit der Strukturfunktion  $\varphi$  und der Kenntnis des Ausfallverhaltens aller Systemelemente zum Zeitpunkt  $t$ . In Abb. 3.1 sind die Grundbausteine einer Fehlerbaumanalyse anschaulich beschrieben.

### Fehlerbaumanalyse

Ein technisches System besteht aus Komponenten  $K_1$  bis  $K_n$ , die auf verschiedene Weisen ausfallen können.

Gesucht sind die Kombinationen von Komponentenausfällen (Basisereignisse), die zum Systemausfall (TOP-Event) führen.

$Z$  sei Zustandsvariable von  $K$   
 $Z = 1$  ... Komponente  $K$  ist ausgefallen (oder nicht verfügbar)  
 $Z = 0$  ... Komponente  $K$  funktioniert (oder ist verfügbar)

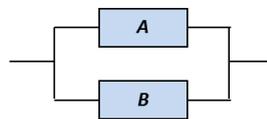
Es gibt eine zweiwertige logische Funktion, die das Ausfallverhalten des Systems beschreibt:

$$\varphi_{TOP}(Z_1, \dots, Z_n) : \{0,1\}^n \rightarrow \{0,1\}$$

Für den Systemausfall gilt

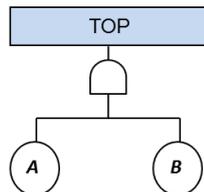
$$\varphi_{TOP}(Z_1, \dots, Z_n) = 1$$

Gegeben sei ein Parallelsystem mit 2 Komponenten **A** und **B**.



Das System ist ausgefallen, wenn beide Komponenten versagen.

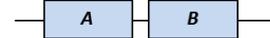
$$\varphi(A, B) = A \wedge B = A \cdot B$$



Ausfallwahrscheinlichkeit  $p_s$  des Systems

$$p_s = p_A \cdot p_B$$

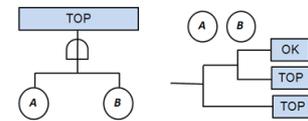
Gegeben sei ein Seriensystem mit 2 Komponenten **A** und **B**.



Das System ist ausgefallen, wenn eine von beiden Komponenten versagt.

$$\varphi(A, B) = A \vee B = A + B - AB$$

Fehlerbaum Ereignisbaum



$$p_s = p_A + p_B - p_A \cdot p_B$$

**Abb. 3.1** Durchführung von Fehlerbaumanalysen

Bei der bisherigen Beschreibung des Ausfallverhaltens eines Systems  $S$  wurde davon ausgegangen, dass die Systemelemente unabhängig voneinander ausfallen. Insbe-

sondere bei komplexen Systemen mit hohem Redundanzgrad ist aber die Möglichkeit einzubeziehen, dass zwei oder mehrere Systemelemente abhängig ausfallen. Das kann vielfältige Ursachen haben, z. B.

- Ausfälle von Versorgungssystemen (z. B. Ausfall der Stromversorgung),
- direkte Folgeausfälle (z. B.: Der Ausfall eines Systemelements führt in Folge zum Ausfall eines anderen Systemelements wie Umstürzen eines Behälters und Beschädigung von Kabelsträngen),
- Abhängigkeiten infolge übergreifender Einwirkungen (z. B. die Systemelemente eines Teilsystems erleiden durch eine äußere Einwirkung wie Brand in einem größeren Raumbereich gleichzeitig – oder nahezu gleichzeitig – einen Funktionsverlust),
- GVA-Ereignisse (Berücksichtigung von Abhängigkeiten auf Grund unbekannter, doch potenziell vorhandener Ursachen).

Die Zuverlässigkeitsanalyse von komplexen technischen Systemen umfasst eine detaillierte Analyse der Ausfallabhängigkeiten der Systemkomponenten. Eine unzureichende oder gar fehlende Einbeziehung von Abhängigkeiten führt zur Überschätzung der Systemzuverlässigkeit.

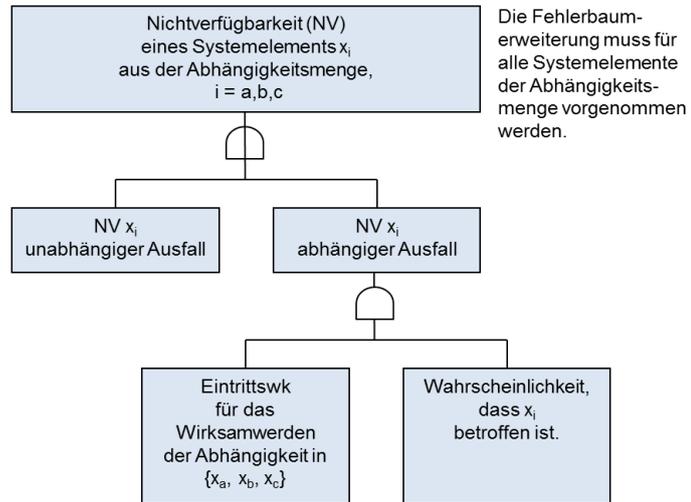
Die Einbeziehung von Ausfallabhängigkeiten in Fehlerbaumstrukturen zur korrekten Ableitung der Strukturfunktion erfolgt durch entsprechende Erweiterung der Ausfallbeschreibung der betroffenen Systemelemente. Bis jetzt ist der unabhängige Ausfall eines Systemelements das einzige Basisereignis, das die Ausfallmöglichkeit eines Systemelements beschreibt. Das entsprechende Gatter ist durch Basisereignisse zu erweitern, die Ausfallwahrscheinlichkeiten des Systemelements auf Grund von Abhängigkeiten zu beschreiben.

In Abb. 3.2 ist das Grundprinzip der Fehlerbaumerweiterung bei Vorliegen von Abhängigkeiten erläutert. Es ist noch hinzuzufügen, dass ein Systemelement in mehreren Abhängigkeitsmengen enthalten sein kann. Dann ist der Fehlerbaum für die Nichtverfügbarkeit des Systemelements entsprechend zu erweitern.

Es wurde festgestellt, dass eine Abhängigkeit im Ausfallverhalten der Systemelemente  $x_a$ ,  $x_b$  und  $x_c$  besteht.  
Die Menge  $\{x_a, x_b, x_c\}$  heißt Abhängigkeitsmenge.

Das Systemelement  $x_i$  ist nicht verfügbar, wenn es unabhängig ausgefallen ist oder wenn es aufgrund einer Abhängigkeit ausgefallen ist.

Die Nichtverfügbarkeit eines Systemelements aufgrund von Abhängigkeiten hängt davon ab, ob die Abhängigkeit bezüglich  $\{x_a, x_b, x_c\}$  wirksam wird und mit welcher Wahrscheinlichkeit das einzelne Systemelement davon betroffen ist.



**Abb. 3.2** Fehlerbaumerweiterung bei Abhängigkeiten

### 3.1.2 Das Abhängigkeitsmodell $\{M, A, C\}$

Jede Abhängigkeit  $D$  kann mit einem Triple von Werten  $\{M, A, C\}$  beschrieben werden;  $M$  ist die Abhängigkeitsmenge,  $A$  beschreibt die Abhängigkeitsursache und Vektor  $C$  beschreibt den Umfang der Abhängigkeitswirkung.

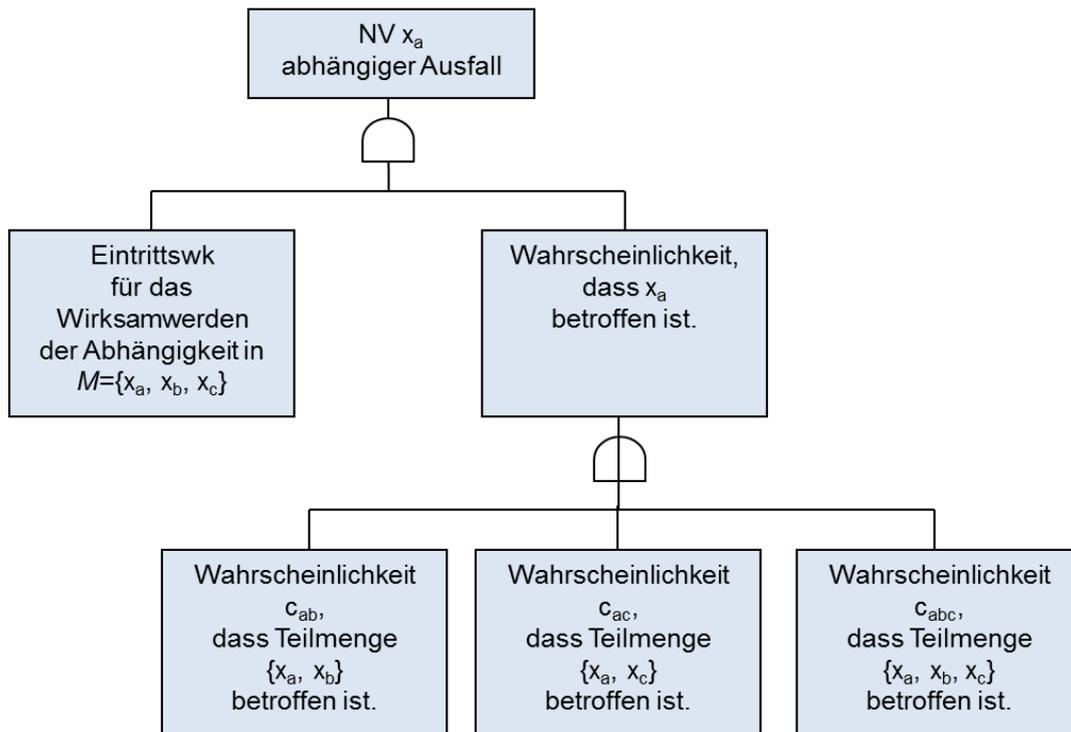
- Abhängigkeitsmenge:  
 $M = (x_1, x_2, \dots, x_k)$  ist die Menge von Systemelementen, denen eine Ausfallabhängigkeit  $D$  mit der Ursache  $A$  unterstellt wird.
- Abhängigkeitsursache:  
Der Ursache  $A$  ist eine Wahrscheinlichkeit zugeordnet. Mit dieser Wahrscheinlichkeit wird die Abhängigkeit wirksam.
- Wirkungsumfang:  
Der Umfang der Abhängigkeitswirkung wird mit einem Vektor  $C$  beschrieben. Jedes Vektorelement von  $C$  steht für eine Teilmenge der Elemente von  $M$  und gibt die bedingte Wahrscheinlichkeit dafür an, dass die Systemelemente aus dieser Teilmenge bei Wirksamwerden der Abhängigkeit gemeinsam ausfallen.

$M = (x_1, x_2, \dots, x_k)$  besitzt  $\sum_{i=2}^k \frac{k!}{i!(k-i)!}$  Teilmengen mit mehr als zwei Systemelementen,

ein beliebiges Systemelement ist in  $\sum_{i=1}^{k-1} \frac{k!}{i!(k-i)!}$  Teilmengen enthalten. Ein System-

element  $x_i$  fällt auf Grund der Abhängigkeit  $D$  aus, wenn die Abhängigkeit wirksam wird (mit Eintrittswahrscheinlichkeit der Ausfallursache  $A$ ) und wenn mindestens eine der Teilmengen von  $M$ , in denen  $x_i$  enthalten ist, eine Ausfallwahrscheinlichkeit größer als Null hat.

In Abb. 3.3 ist in Fortsetzung zu Abb. 3.2 für das Systemelement  $x_a$  gezeigt, welche Abhängigkeiten einbezogen werden müssen.



**Abb. 3.3** Fehlerbaumerweiterung bei Abhängigkeiten (Fortsetzung zu Abb. 3.2)

### 3.1.3 Beispiele zum Abhängigkeitsmodell

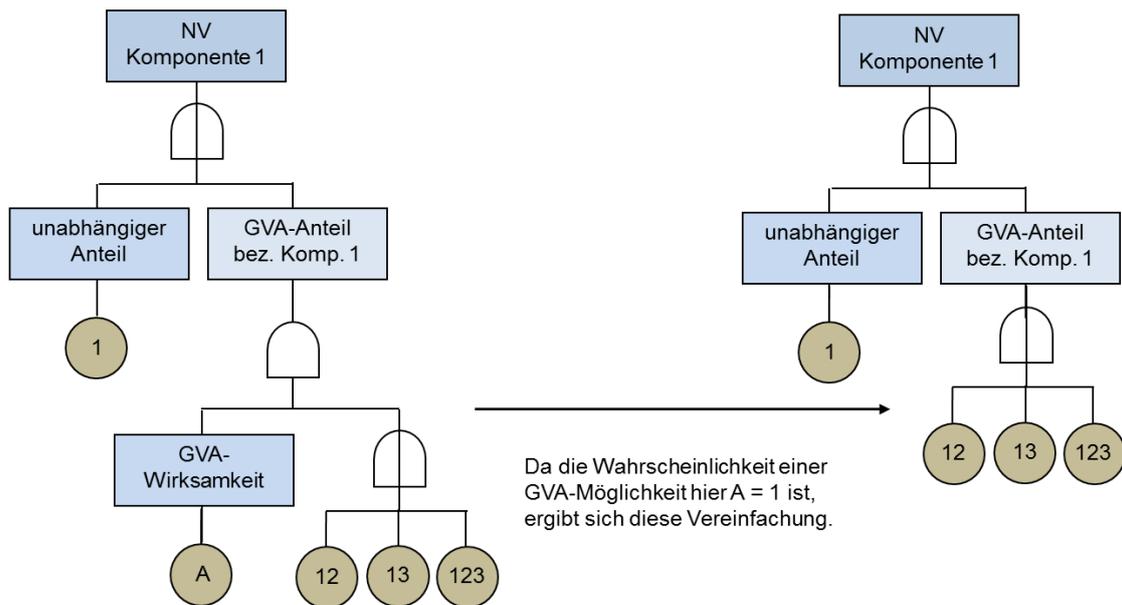
Mit dem hier beschriebenen Abhängigkeitsmodell können alle Arten von Abhängigkeiten beschrieben werden. Nachfolgend finden sich einige Beispiele.

#### 3.1.3.1 GVA-Modellierung mit dem Kopplungsmodell

Im Anhang B ist in Abb. B.3 die Bestimmung der Nichtverfügbarkeit eines Parallelsystems mit drei Komponenten mit der Fehlerbaummethode grafisch dargestellt. Im linken Fehlerbaum wurde angenommen, dass die Komponenten nur unabhängig voneinander

ausfallen können. Gehören die Komponenten 1, 2 und 3 zu einer GVA-Gruppe, d. h. es kann nicht angenommen werden, dass sie unabhängig voneinander ausfallen, erweitert sich der Fehlerbaum wesentlich. Im rechten Fehlerbaum von Abb. B.3 ist das beispielhaft für die Komponente 1 gezeigt.

Die GVA-Modellierung mit dem Kopplungsmodell nach dem Methodenband des Leitfadens /FAK 05/ kann ebenfalls mit dem allgemeinen Abhängigkeitsmodell  $\{M, A, C\}$  beschrieben werden. Im Beispiel geht es um ein Parallelsystem mit drei Komponenten, d. h.  $M = \{1, 2, 3\}$ . Die Abhängigkeit wird von einer unbekanntem Ursache herbeigeführt, es wird angenommen, dass diese Ursache mit Wahrscheinlichkeit 1 immer wirkt. Die Daten für  $C$  können in Abhängigkeit vom Komponententyp dem Datenband zum PSA-Leitfaden /FAK 05a/, Anhang A – Generische GVA-Wahrscheinlichkeiten entnommen werden. Aktualisierte GVA-Daten finden sich im Ergänzungsband /FAK 15/, Anhang A. Die Fehlerbaumdarstellung vereinfacht sich, siehe Abb. 3.4.



**Abb. 3.4** GVA-Modellierung und Kopplungsmodell

### 3.1.3.2 Modellierung mit dem Betafaktor-Modell

Bei Erdbeben-PSA ist es gegenwärtige Praxis, dass BSK gleichen Typs, die derselben Ebene zugeordnet werden können, in einer Menge  $M$  zusammengefasst werden und unterstellt wird, dass alle Elemente der Menge ein vollständig korreliertes Ausfallverhalten haben. Sobald die Belastung einer BSK überschritten wird, fallen alle BSK aus

/KLU 09/. Bei der Modellierung dieser Abhängigkeit bei SPSA wird oft der sogenannte  $\beta$ -Faktor-Ansatz genutzt, eine Methode, die zur Bewertung von GVA in PSA der Stufe 1 für eine geringe Anzahl von Redundanzen eingesetzt wurde /KLU 09/, /PEL 11/. Dabei wird angenommen, dass sich die Unverfügbarkeit  $p$  einer BSK aus der Menge der BSK mit vollständig korreliertem Ausfallverhalten in einen abhängigen und einen unabhängigen Teil aufteilen lässt:

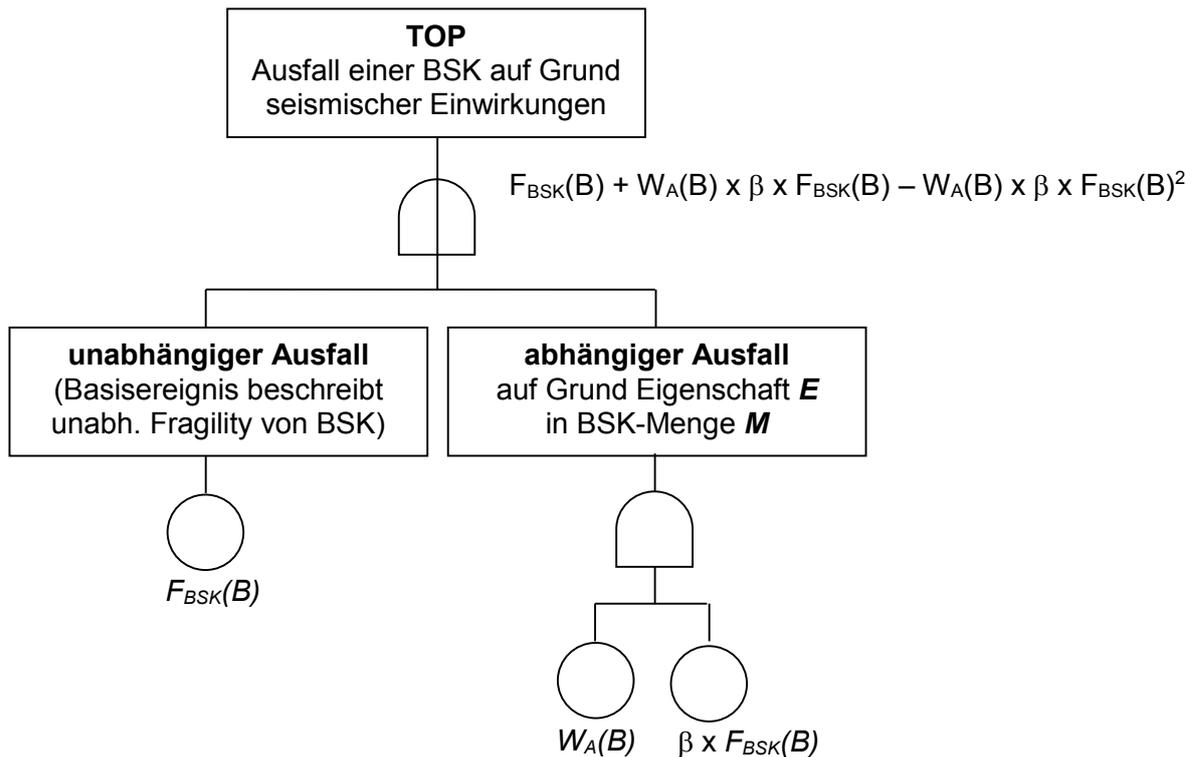
$$p = (1 - \beta) \cdot p_{unabh} + \beta \cdot p_{abh}$$

$\beta$ ,  $0 \leq \beta \leq 1$  ist der sogenannte  $\beta$ -Faktor. Der  $\beta$ -Faktor beschreibt den Anteil, den eine gemeinsame Ursache am Ausfall einer BSK hat.

In /KLU 09/, /PEL 11/ geht es vor allem um die Frage, wie der Faktor  $\beta$  bei der Annahme von seismischen Abhängigkeiten bestimmt werden kann. Nachfolgend wird diskutiert, ob das allgemein formulierte Modell der Einbeziehung von seismischen Abhängigkeiten beliebiger Art aus /FRE 10/ auch den Ansatz des  $\beta$ -Faktor-Modells umfasst.

$A$  sei eine gemeinsame Eigenschaft der BSK aus einer Menge  $M$ , die bei einem Erdbeben als Ursache zum abhängigen Ausfall von BSK aus  $S$  führen kann. Im Fall der Anwendung des  $\beta$ -Faktor-Modells wird in /KLU 09/, /PEL 11/ davon ausgegangen, dass  $A$  die Aufstellung von Komponenten gleichen Typs auf gleicher Ebene beschreibt (siehe dazu auch das Beispiel in Kapitel 6.1.2. Diese Eigenschaft wird mit Wahrscheinlichkeit  $W_A(B)$  wirksam; dabei ist  $B$  die maximale Beschleunigung,  $W_A$  heißt Wirksamkeitsfunktion von  $A$ . Aus /KLU 09/, /PEL 11/ geht nicht hervor, ab welcher Beschleunigung das  $\beta$ -Faktor-Modell angewendet wird. Es wird nun angenommen, dass bei Wirksamwerden von  $A$  auf Grund der seismischen Einwirkung alle BSK aus  $M$  gleichzeitig ausfallen. Das wird mit der Kopplungsfunktion  $c(A, M) = \beta$  beschrieben. Es wird angenommen, dass die Art der Kopplung unabhängig von der Beschleunigung ist, d. h. unabhängig von der Erdbebenstärke.

Im Fall  $F_{BSK}(B)$  ergibt sich für den seismisch bedingten Ausfall einer BSK näherungsweise die Ausfallwahrscheinlichkeit  $F_{BSK}(B) + \beta \times F_{BSK}(B)$ , (siehe Abb. 3.5).



**Abb. 3.5** Fehlerbaumeinbindung  $\beta$ -Faktor-Methode

Hier ergibt sich ein Unterschied zur GVA-Modellierung mit dem  $\beta$ -Faktor-Modell. Dabei wird üblicherweise angenommen, dass die Gesamtausfallwahrscheinlichkeit einer BSK unverändert bleibt. Diese Annahme ist bei GVA durchaus berechtigt, da man annehmen kann, dass bei der statistischen Schätzung der (unabhängigen) Ausfallwahrscheinlichkeit einer BSK implizit die Ausfälle auf Grund GVA einbezogen werden. Im vorliegenden Modell wurde die Fragility-Funktion der BSK so bestimmt, dass keine abhängigen Anteile enthalten sind, d. h. die Fragility-Funktion beschreibt tatsächlich nur den unabhängigen seismischen Ausfall der BSK. Somit ist die seismische Ausfallwahrscheinlichkeit nicht künstlich erhöht, wie in /PEL 11/ argumentiert.

### 3.1.3.3 Ausfall eines Hilfssystems

Ist die Verfügbarkeit mehrerer Systemelemente von der ordnungsgemäßen Funktion eines Hilfssystems abhängig, kann das in Kap. 3.1.2 beschriebene Abhängigkeitsmodell zur Beschreibung der Ausfallbedingungen genutzt werden.

$$D_{\text{Hilfssystem}} = \{M_{\text{Hilfssystem}}, A_{\text{Hilfssystem}}, C_{\text{Hilfssystem}}\}$$

mit:

$M_{\text{Hilfssystem}}$  ... Menge aller vom Hilfssystem abhängigen BSK

$A_{\text{Hilfssystem}}$  ... Der Ausfall des Hilfssystems führt zum Ausfall aller BSK aus  $M_{\text{Hilfssystem}}$ ,  
A sei die bedingte Ausfallwahrscheinlichkeit des Hilfssystems.

$C_{\text{Hilfssystem}}$  ... Die Werte der Vektorelemente von  $C_{\text{Hilfssystem}}$  sind für alle Teilmengen  
aus  $M_{\text{Hilfssystem}}$  gleich Null bis auf die Gesamtmenge  $M_{\text{Hilfssystem}}$ . Dieses  
Vektorelement ist gleich Eins.

$M$  sei die Menge aller Systemelemente, die bei Ausfall des Hilfssystems versagen,  $A$  ist die Ausfallwahrscheinlichkeit des Hilfssystems. In diesem Fall ist ein Systemelement ausgefallen, wenn es auf Grund unabhängiger Gründe ausgefallen ist oder wenn das Hilfssystem versagt. Der Umfang der Abhängigkeitswirkung wird mit einem Vektor  $C$  beschrieben. Jedes Vektorelement von  $C$  steht für eine Teilmenge der Elemente von  $M$  und gibt die bedingte Wahrscheinlichkeit dafür an, dass die Systemelemente aus dieser Teilmenge bei Wirksamwerden der Abhängigkeit gemeinsam ausfallen. Im vorliegenden Fall sind alle Vektorelemente Null, nur das Vektorelement, das alle Elemente von  $M$  enthält, ist gleich 1, d. h. fällt das Hilfssystem aus, fallen alle durch das Hilfssystem versorgten Komponenten aus.

### 3.1.3.4 Korrelation von Ausfällen bei seismischen Einwirkungen

Zur Ableitung der Korrelation von Ausfällen der BSK  $X$  und  $Y$  werden zuerst die benötigten mathematischen Zusammenhänge dargestellt. Dabei handelt es sich um die Begriffe Kovarianz und Korrelationskoeffizient sowie um die seismische Kapazität einer BSK.

#### Kovarianz und Korrelationskoeffizient

$X, Y$  seien Zufallsgrößen mit den Erwartungswerten  $E_X$  und  $E_Y$  sowie den Streuungen  $D_X$  und  $D_Y$ .

$$D_X = E(X - E_X)^2 = E(X - E_X)(X - E_X)$$

$$D_Y = E(Y - E_Y)^2$$

$\text{COV}(X, Y) = E(X - E_X)(Y - E_Y)$  ist die Kovarianz der Zufallsgrößen  $X$  und  $Y$ .

Die Kovarianz ist positiv, wenn  $X$  und  $Y$  tendenziell einen gleichsinnigen linearen Zusammenhang besitzen, d. h. hohe Werte von  $X$  gehen mit hohen Werten von  $Y$  einher

und niedrige mit niedrigen. Die Kovarianz ist hingegen negativ, wenn X und Y einen gegensinnigen linearen Zusammenhang aufweisen, d. h. hohe Werte der einen Zufallsvariablen gehen mit niedrigen Werten der anderen Zufallsvariablen einher. Ist das Ergebnis 0, so besteht kein linearer Zusammenhang zwischen den beiden Variablen (nichtlineare Beziehungen sind möglich).

Es gelten folgende Beziehungen (auf Begründungen oder Beweise wird hier verzichtet):

$$DX = \text{COV}(X,X), \quad DY = \text{COV}(Y,Y)$$

$$D(X+Y) = DX + DY + 2 \text{COV}(X,Y)$$

Verschiebungssatz:

$$\text{COV}(X,Y) = EXY - EXEY$$

$$\text{COV}(X,Y) = \text{COV}(Y,X)$$

Linearität der Kovarianz:

$$\text{COV}(aX+b,Y) = a \text{COV}(X,Y) \quad a, b \text{ sind konstante Parameter}$$

$$\text{COV}(X+Y,Z) = \text{COV}(X,Z) + \text{COV}(Y,Z) \quad Z \text{ ist eine weitere Zufallsgröße}$$

$$\text{COV}(X,a) = 0$$

Cauchy-Schwarz'sche Ungleichung:

$$|\text{COV}(X,Y)| \leq \sqrt{DX} \cdot \sqrt{DY}$$

Die Zufallsvariablen X und Y heißen unkorreliert, falls  $\text{COV}(X,Y) = 0$  gilt.

Stochastisch unabhängige Zufallsvariablen sind unkorreliert, denn es gilt  $EXY = EX EY$  und damit nach dem Verschiebungssatz  $\text{COV}(X,Y) = EXY - EXEY = 0$ .

Die Linearität der Kovarianz hat zur Folge, dass die Kovarianz vom Maßstab der Zufallsvariablen abhängt. So erhält man beispielsweise die zehnfache Kovarianz, wenn man anstatt X die Zufallsvariable 10X betrachtet. Insbesondere hängt der Wert der Kovarianz von den verwendeten Maßeinheiten der Variablen ab. Da diese Eigenschaft die absoluten Werte der Kovarianz schwer interpretierbar macht, betrachtet man häufig stattdessen den maßstabsunabhängigen Korrelationskoeffizienten:

$$\rho_{XY} = \rho(X,Y) = \frac{\text{COV}(X,Y)}{\sqrt{DX} \cdot \sqrt{DY}}$$

Aus der Unkorreliertheit folgt nicht die Unabhängigkeit. Nichtlineare Abhängigkeitsstrukturen werden von der Kovarianz nicht erfasst.

### Seismische Kapazität einer BSK

$B$  sei eine Zufallsgröße, die eine stochastische Eigenschaft einer BSK beschreibt (z. B. Lebensdauer – hier wäre  $B$  dann die Zeitdauer bis zum Ausfall der BSK - oder Kapazität im Hinblick auf seismische Intensität – hier wäre  $B$  eine Beschleunigung am Fußpunkt der BSK mit Maßeinheit  $g$ ).

Zur Konstruktion der Verteilung von  $B$  wird zum einen angenommen, dass Lognormalität vorliegt, d. h.  $B \sim LNV(m, \sigma)$  mit der Dichtefunktion

$$D_{LNV}(x) = \exp(-(\ln x - m)^2 / 2\sigma^2) / (\sigma \cdot x \cdot \sqrt{2\pi})$$

und dass zum anderen der Median  $B_{0,50}$  und die Streuung um diesen bekannt sind.

Man wählt folgenden Ansatz:

$$B = B_{0,50} \cdot \varepsilon \sim B_{0,50} \cdot LNV(0, \beta)$$

$\varepsilon$  ist lognormal verteilt mit Median 1 und Standardabweichung  $\beta$ .

Der Medianwert  $B_{0,50}$  ist der Wert der Zufallsgröße  $B$  bei dem die Wahrscheinlichkeit, dass die stochastische Eigenschaft (der in einem Zufallstest ermittelte Wert von  $B$ ) kleiner als  $B_{0,50}$  ist, gerade 0,5 beträgt.

Damit gilt  $B \sim LNV(\ln(B_{0,50}), \beta)$ ,

denn der Median einer Lognormalverteilung  $LNV(m, \beta)$  ist gleich  $\exp(m)$ , und somit ist  $m = \ln(B_{0,50})$ . Der zweite Parameter  $\sigma$  der Verteilung von  $B$  ergibt sich aus der Streuung um  $B_{0,50}$ , d. h.  $\sigma = \beta$ .

Für die Dichte einer Lognormalverteilung  $LNV(m, \beta)$  und  $m = \ln(B_{0,50})$  gilt:

$$D_{LNV}(x) = \exp(-(\ln(x / B_{0,50}))^2 / 2\beta^2) / (\beta \cdot x \cdot \sqrt{2\pi})$$

Im Folgenden wird also davon ausgegangen, dass die seismische Kapazität einer BSK logarithmisch normalverteilt ist und entsprechend dem eben vorgestellten Gedankenexperiment konstruiert werden kann. Dann wären zwei Parameter zu schätzen:  $\beta$  (stochastische Unsicherheit) und der Median  $B_{0,50}$  der Verteilung. Der Median steht in

diesem Fall für die maximale Bodenbeschleunigung, bei welcher die BSK mit Wahrscheinlichkeit 0,5 ausgefallen ist.

Ausgehend von dieser Erkenntnis wird jetzt eine Zufallsgröße  $Z$  konstruiert, die die Kapazität einer BSK strukturmechanisch definiert: eine BSK fällt aus, wenn die Belastung die Belastbarkeit übersteigt.

$X \sim \text{LNV}(\mu_X, \beta_X)$  sei die Zufallsgröße der Belastung

$Y \sim \text{LNV}(\mu_Y, \beta_Y)$  sei die Zufallsgröße der Belastbarkeit

$$Z = X - Y$$

Ist  $Z > 0$ , fällt die BSK aus.

Unter den obigen Annahmen für  $X$  und  $Y$ , ist  $Z$  normalverteilt mit Mittelwert  $\mu_Z = \mu_X - \mu_Y$  und Standardabweichung  $\beta_Z = \sqrt{\beta_X^2 + \beta_Y^2}$ .

### Korrelation von Ausfällen bei seismischen Einwirkungen

Die Ableitung der Formeln folgt den Ausführungen in /ZHA 01/.

Gegeben seien die BSK  $X$  und  $Y$ . Die Belastung (response) und die Belastbarkeit (capacity) der BSK werden durch die Zufallsgrößen  $X_c$ ,  $X_r$ ,  $Y_c$  und  $Y_r$  beschrieben. Eine BSK fällt aus, wenn die Belastung die Belastbarkeit übersteigt. Der Ausfall wird durch die Zufallsgröße  $Z$  beschrieben (siehe auch die Zusammenstellung der Zufallsgrößen in Tab. 3.1).

**Tab. 3.1** Ausfälle von BSK bei seismischen Einwirkungen (ohne Verteilungsannahme)

BSK	Belastbarkeit (capacity)	Belastung (response)	Ausfall
$X$	$X_c$ Standardabweichung $\sigma_{xc}$	$X_r$ Standardabweichung $\sigma_{xr}$	$Z_X = X_c - X_r$
$Y$	$Y_c$ Standardabweichung $\sigma_{yc}$	$Y_r$ Standardabweichung $\sigma_{yr}$	$Z_Y = Y_c - Y_r$

Für die Korrelationskoeffizienten zwischen den Belastungen und der Belastbarkeit der BSK gilt:

$$\rho_{X_c Y_c} = \rho(X_c, Y_c) = \frac{COV(X_c, Y_c)}{\sqrt{DX_c} \cdot \sqrt{DY_c}} = \frac{COV(X_c, Y_c)}{\sigma_{X_c} \sigma_{Y_c}}$$

und

$$\rho_{X_r Y_r} = \rho(X_r, Y_r) = \frac{COV(X_r, Y_r)}{\sqrt{DX_r} \cdot \sqrt{DY_r}} = \frac{COV(X_r, Y_r)}{\sigma_{X_r} \sigma_{Y_r}} .$$

Nun sei  $Z_X = X_c - X_r$  und  $Z_Y = Y_c - Y_r$ .

Die Komponente X ist ausgefallen, wenn  $Z_X > 0$ ; die Komponente Y ist ausgefallen, wenn  $Z_Y > 0$  ist.

Der entsprechende Korrelationskoeffizient zum gemeinsamen Ausfall von X und Y ist

$$\rho_{XY} = \rho(X, Y) = \frac{COV(Z_X, Z_Y)}{\sqrt{DZ_X} \cdot \sqrt{DZ_Y}}$$

Der Ausfall von X und Y ist korreliert (abhängig), wenn  $\rho_{XY} = k, (0 < k < 1)$ .

Ist  $k = 0$ , ist der Ausfall von X und Y unabhängig, bei  $k = 1$  liegt vollständige Korrelation vor.

Wenn nun (vernünftigerweise) angenommen wird, dass  $X_c$  und  $X_r$  sowie  $Y_c$  und  $Y_r$  unabhängig sind, kann  $\rho_{XY}$  folgendermaßen umgeformt werden:

$$\begin{aligned} DZ_X &= E(Z_X - EZ_X)^2 = E((X_c - X_r - E(X_c - X_r))(X_c - X_r - E(X_c - X_r))) \\ &= E(X_c - EX_c)^2 - 2E(X_c - EX_c)(X_r - EX_r) + E(X_r - EX_r)^2 \\ &= DX_c + DX_r = \sigma_{X_c}^2 + \sigma_{X_r}^2 \end{aligned}$$

$$DZ_Y = DY_c + DY_r = \sigma_{Y_c}^2 + \sigma_{Y_r}^2$$

$$\begin{aligned} COV(Z_X, Z_Y) &= E(Z_X - EZ_X)(Z_Y - EZ_Y) = E(Z_X Z_Y - Z_X EZ_Y - Z_Y EZ_X + EZ_X EZ_Y) \\ &= E((X_c - X_r)(Y_c - Y_r) - (X_c - X_r)E(Y_c - Y_r) - (Y_c - Y_r)E(X_c - X_r) + E(X_c - X_r)E(Y_c - Y_r)) \\ &= E(X_c Y_c - X_c Y_r - X_r Y_c + X_r Y_r - X_c E Y_c + X_c E Y_r + X_r E Y_c - X_r E Y_r - Y_c E X_c + Y_c E X_r + Y_r E X_c - Y_r E X_r \\ &\quad + E X_c E Y_c - E X_c E Y_r - E X_r E Y_c + E X_r E Y_r) \\ &= COV(X_c, Y_c) + COV(X_r, Y_r) \end{aligned}$$

Damit ergibt sich für  $\rho_{XY}$

$$\rho_{XY} = \rho(X, Y) = \frac{COV(Z_X, Z_Y)}{\sqrt{DZ_X} \cdot \sqrt{DZ_Y}} = \frac{\sigma_{X_c} \sigma_{Y_c}}{\sqrt{\sigma_{X_c}^2 + \sigma_{X_r}^2} \sqrt{\sigma_{Y_c}^2 + \sigma_{Y_r}^2}} \rho_{X_c Y_c} + \frac{\sigma_{X_r} \sigma_{Y_r}}{\sqrt{\sigma_{X_c}^2 + \sigma_{X_r}^2} \sqrt{\sigma_{Y_c}^2 + \sigma_{Y_r}^2}} \rho_{X_r Y_r}$$

(Formel 3.1)

Es wird jetzt weiterhin angenommen, dass die Zufallsgrößen  $X_r$ ,  $Y_r$ ,  $X_c$  und  $Y_c$  lognormal verteilt sind mit den Parametern in der folgenden Tab. 3.2 (siehe dazu das Gedankenexperiment zur Ableitung der seismischen Kapazität einer BSK).

**Tab. 3.2** Ausfälle von BSK bei seismischen Einwirkungen (mit Verteilungsannahme)

BSK	Belastbarkeit (capacity)	Belastung (response)	Ausfall
X	$X_c \sim LNV(\mu_{X_c}, \sigma_{X_c})$	$X_r \sim LNV(\mu_{X_r}, \sigma_{X_r})$	$Z_X = \ln X_c - \ln X_r = \ln \frac{X_c}{X_r}$
Y	$Y_c \sim LNV(\mu_{Y_c}, \sigma_{Y_c})$	$Y_r \sim LNV(\mu_{Y_r}, \sigma_{Y_r})$	$Z_Y = \ln Y_c - \ln Y_r = \ln \frac{Y_c}{Y_r}$

Wie zuvor auch ist die Komponente X ausgefallen, wenn  $Z_X > 0$  (d. h.  $X_c/X_r > 1$ ) ist, die Komponente Y ist ausgefallen, wenn  $Z_Y > 0$  (d. h.  $Y_c/Y_r > 1$ ) ist.

Wir erneut angenommen, dass  $X_c$  und  $X_r$  sowie  $Y_c$  und  $Y_r$  unabhängig sind, so gilt für die Korrelation entsprechend (Formel 3.1).

$$\rho_{XY} = \rho(X, Y) = \frac{\sigma_{X_c} \sigma_{Y_c}}{\sqrt{\sigma_{X_c}^2 + \sigma_{X_r}^2} \sqrt{\sigma_{Y_c}^2 + \sigma_{Y_r}^2}} \rho_{X_c Y_c} + \frac{\sigma_{X_r} \sigma_{Y_r}}{\sqrt{\sigma_{X_c}^2 + \sigma_{X_r}^2} \sqrt{\sigma_{Y_c}^2 + \sigma_{Y_r}^2}} \rho_{X_r Y_r}$$

mit

$$\rho_{X_c Y_c} = \frac{E(\ln X_c - \mu_{X_c})(\ln Y_c - \mu_{Y_c})}{\sigma_{X_c} \sigma_{Y_c}} = \frac{E \ln X_c \ln Y_c - \mu_{X_c} \mu_{Y_c}}{\sigma_{X_c} \sigma_{Y_c}} \quad \text{(Formel 3.2)}$$

und

$$\rho_{X_r Y_r} = \frac{E(\ln X_r - \mu_{X_r})(\ln Y_r - \mu_{Y_r})}{\sigma_{X_r} \sigma_{Y_r}} = \frac{E \ln X_r \ln Y_r - \mu_{X_r} \mu_{Y_r}}{\sigma_{X_r} \sigma_{Y_r}}$$

Der Korrelationskoeffizient zum gesamten Ausfallverhalten der BSK X und der BSK Y ergibt sich aus der Summe der normierten Korrelationskoeffizienten der Belastungs- und Belastbarkeitsanteile. Wird für die Belastungs- und die Belastbarkeitsverteilung eine Lognormalverteilung angenommen, kann (Formel 3.2) angewendet werden.

Für das gleichzeitige Versagen der Komponenten X und Y gilt:

$$P((Z_X > 0) \wedge (Z_Y > 0)) = \iint_{0 \leq x, y < \infty} f_{Z_X Z_Y}(x, y) dx dy$$

Dabei ist  $f_{Z_x Z_y}$  die zweidimensionale Normalverteilung (siehe auch /PEL 11/).

Für mehrere BSK kann die Formel entsprechend erweitert werden.

Eine weitere Möglichkeit ist mit der Erfassung seismischer Abhängigkeiten als Korrelation zwischen Tragfähigkeitsparametern (vgl. /JON 03/, S. 106 nach /REE 85/) gegeben:

$$\rho = \frac{\beta_1^* \cdot \beta_2^*}{\beta_1 \cdot \beta_2}$$

Dabei sind

$\beta_i^*$  logarithmische Standardabweichung der Komponente i,

$\beta_i$  Variationsanteile,

die den korrelierten Anteil widerspiegeln.

Ist  $\rho = 1$ , liegt vollständige Korrelation vor. Dann ist  $\beta_i^* = \beta_i$ .

Ist  $\rho = 0$ , dann liegt Unabhängigkeit vor,  $\beta_i^* = 0$ .

### 3.1.3.5 Abhängigkeiten bei seismischen Einwirkungen

In Anhang 0 ist ein einfaches Beispiel konstruiert. Dort ist in Abb. B.6 gezeigt, wie ein Fehlerbaum erweitert werden muss, wenn Abhängigkeiten auf Grund seismischer Einwirkungen berücksichtigt werden.

## 3.2 Erdbeben und Folgeereignis Brand

Ein aktueller Überblick zu den probabilistischen Methoden der Einschätzung und Bewertung erdbebenbedingter Folgeeinwirkungen und den dabei auftretenden Problemen wird in /MAR 15/ oder /AMI 15/ gegeben.

### 3.2.1 Allgemeines Vorgehen

Nachfolgend wird beschrieben, wie parallel zur Erstellung einer seismischen Ausrüstungsliste S-EL die Abhängigkeitsliste S-DL um die Beschreibung seismisch bedingter Brände ergänzt werden kann.

Die S-EL enthält alle BSK, die auf Grund seismischer Einwirkungen ausfallen können und deren Fehlfunktionen einen Beitrag zur Häufigkeit von Schadenszuständen liefern können. Die Vorgehensweise bei der sukzessiven Aufstellung der Liste findet sich verallgemeinert in Kapitel 2.3.2.2 und speziell für seismische Einwirkungen in Kapitel 2.3.2.4. Auf Grund der vorläufigen S-EL werden die seismisch relevanten Räume gefunden. Zu jeder BSK der vorläufigen S-EL ist deren zugehörige Standort (Raum entsprechend AKZ) zu bestimmen. Ein Raum, der eine BSK aus der S-EL enthält, wird seismisch relevant genannt. Alle seismisch relevanten Räume werden begangen, d. h. dass auch jede Redundanz begangen wird. Für die Begehungen werden raumbezogene Begehungsformblätter (Checklisten) mit einer Vielzahl von Informationen zur Verfügung gestellt, damit kein Bewertungsaspekt übersehen werden kann. Um nicht die Übersicht zu verlieren, sollten dabei die ordnenden Funktionen einer Datenbank genutzt werden. Eine geeignete Datenbank ist in /TUE 10/ vorgestellt worden (siehe auch Kapitel 4.2).

Während der Begehungen der seismisch relevanten Räume werden alle Räume identifiziert, in denen eine Brandgefahr auf Grund seismischer Einwirkungen besteht. Dazu werden alle seismisch relevanten Räume begutachtet, aber auch jeder direkte Nachbarraum eines seismisch relevanten Raumes. Erdbebenbedingte Brände in Nachbarräumen seismisch relevanter Räume, die selbst nicht seismisch relevant sind, können nur risikoerhöhende Schäden hervorrufen, wenn der Brand sich in den benachbarten seismisch relevanten Raum ausbreitet. Für die gefundenen Räume werden Brandfragilitäten bestimmt, und für jeden dieser Räume wird eine Abhängigkeit  $D$  in die Abhängigkeitsliste S-DL aufgenommen.

Unter einer Raum-Brandfragilität  $F_{\text{BRAND}}(\text{Raum}, B)$  wird die Wahrscheinlichkeit eines seismisch bedingten Raumausfalls durch Brand verstanden. Die Raum-Brandfragilität wird von der Intensität  $B$  des Erdbebens bestimmt und ergibt sich aus dem Produkt der seismisch bedingten Wahrscheinlichkeit für eine Brandentstehung im Raum und der Wahrscheinlichkeit für einen Misserfolg der Brandbekämpfung.

Entsprechend dem in Kapitel 3.1.2 eingeführten Abhängigkeitsmodell lässt sich eine raumbezogene brandbedingte Ausfallabhängigkeit der BSK in einem Raum folgendermaßen beschreiben:

$$D = \{M_{\text{RAUM}}, \text{Art der Abhängigkeit}, C_{\text{LÖSCHUNG}}\}$$

Art der Abhängigkeit Die Abhängigkeit ergibt sich aus einem seismisch bedingten Brand in einem Raum. Die Wirksamkeitsfunktion dieser Abhängigkeit ist  $F_{\text{BRAND}}(\text{Raum}, B)$ . Diese Funktion beschreibt die bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit eines seismisch bedingten Brandes im Raum.

$M_{\text{RAUM}}$  Menge der seismisch relevanten BSK im betrachteten Raum.  
An dieser Stelle werden auch Kabel in das seismische Anlagenmodell eingeführt, bzw. es werden auch solche seismisch relevanten BSK in  $M_{\text{RAUM}}$  aufgenommen, deren Kabel durch den betrachteten Raum verlaufen.

$C_{\text{LÖSCHUNG}}$  Wahrscheinlichkeit, dass die möglichen Löschmaßnahmen im betrachteten Raum nicht zum Erfolg führen.

Für alle BSK, die in einer brandbedingten Abhängigkeit  $D$  und einer entsprechenden BSK-Menge  $M_{\text{RAUM}}$  enthalten sind, ist eine Modellerweiterung vorzunehmen, um auch die seismisch hervorgerufenen Brände quantitativ zu berücksichtigen.

In Kapitel Anhang 0 ist ein einfaches Beispiel zur Durchführung probabilistischer Analysen beschrieben. In Tab. B.1 ist eine seismisch bedingte Brandabhängigkeit  $D_5$ , und deren Umsetzung ist im Fehlerbaum (Abb. B.7) erläutert. Das allgemeine Vorgehen ist in Tab. 3.3 beschrieben.

**Tab. 3.3** Schrittweises Vorgehen zur Erweiterung des seismischen Anlagenmodells um brandbedingte Ausfälle

Allgemeine Vorgehensweise		Erläuterungen und Beispiel
1.	S-EL	S-EL ist die seismische Ausrüstungsliste. Diese Liste enthält alle seismisch relevanten BSK einschließlich der Raumzuordnung, d. h. zu jeder BSK ist der zugehörige Raum bekannt.
		Beispiel: Als Beispiel wird ein Raum R betrachtet.
2.	SRR	Aufgrund der Raumzuordnung in S-EL werden alle seismisch relevanten Räume (SRR) identifiziert.

Allgemeine Vorgehensweise		Erläuterungen und Beispiel
		<p>Beispiel: Im Beispielraum R befinden sich n seismisch relevante BSK. Diese Information ist in S-EL enthalten. <math>M_R</math> bezeichne die Menge dieser BSK.</p>
3.	SRBR	<p>Identifikation der seismisch relevanten Brandräume (SRBR). SRBR sind SRR oder deren direkt benachbarte Räume, bei denen auf Grund eines Erdbebens ein Brand entstehen kann.</p> <p>Beispiel: Der Beispielraum R sei ein SRBR.</p>
4.	Festlegung der Brandabhängigkeiten	<p>Auch Abhängigkeiten durch Brandereignisse werden mit dem Abhängigkeitsmodell <math>D = \{M, A, C\}</math> beschrieben. Die Abhängigkeitsliste S-DL wird ergänzt. Für jeden SRBR muss die Menge M beschrieben werden. M enthält alle BSK, die auf Grund eines Brandes in einem SRBR ausfallen.</p> <p>Beispiel: Im Beispielraum R befinden sich n seismisch relevante BSK, d. h. M besteht aus n BSK. M wird um die BSK aus S-EL erweitert, deren Kabel durch den Raum R verlaufen.</p>
5.	Modell-erweiterung	<p>Das Anlagenmodell wird um die festgestellten Brandabhängigkeiten D erweitert.</p> <p>Beispiel: In Bezug auf einen Brand in Raum R wird das Anlagenmodell so erweitert, dass für alle BSK aus der zugehörigen BSK-Menge M ein zusätzliches Basisereignis die seismisch bedingte Brandausfallwahrscheinlichkeit beschreibt.</p>

Soweit das theoretische Vorgehen. Nachfolgend werden einige Aspekte der praktischen Umsetzung diskutiert. Dabei handelt es sich vor allem um folgende Fragen:

- Identifikation von Räumen mit seismisch bedingter Brandgefahr,
- Bestimmung bedingter Eintrittswahrscheinlichkeiten eines seismisch bedingten Brandes,
- Bestimmung der Ausfallwahrscheinlichkeit der Brandbekämpfung nach einem Erdbeben.

### 3.2.2 Identifikation von Räumen mit erdbebenbedingter Brandgefahr

Die Identifikation erdbebenbedingter Brandszenarien und die Abschätzung der bedingten räumlichen Eintrittswahrscheinlichkeiten stellen die eigentlichen Herausforderungen bei der Einbeziehung brandbedingter Ausfälle in SPSA dar. Sind die möglichen Brandszenarien identifiziert, lässt sich relativ problemlos der Einfluss dieser Szenarien auf das Risiko mit den Informationen aus SPSA und Brand-PSA abschätzen.

In /LIN 14/ wird auf der Grundlage von Eintrittswahrscheinlichkeiten und den Auswirkungen von Brandszenarien ein Auswahlverfahren seismisch relevanter Brandräume vorgeschlagen. Die nachfolgenden Ausführungen sind dieser Veröffentlichung entnommen.

- **Welche Zündquellen müssen bei seismischen Einwirkungen besonders berücksichtigt und bewertet werden?**

Damit ein Brand entsteht, muss eine Zündquelle mit hinreichend großer Zündenergie in Kontakt mit brennbaren Stoffen kommen. Bei einem Erdbeben können z. B. Funken sowohl aus mechanischen als auch elektrischen Ursachen entstehen. Weitere Zündenergie kann von heißen Oberflächen, wie der Ummantelung rotierender Einrichtungen (Pumpen, Motoren, Kompressoren, Lüfter, Kühler) oder von freigelegten Abschnitten von Dampfleitungen (zerstörte oder wegen bevorstehender Instandhaltungsaktivitäten entfernte Isolierung) ausgehen. Bei Begehungen sind diese Zündmöglichkeiten zu bewerten. So ist z. B. auf ausreichende Flexibilität von Kabelverbindungen zu achten.

Seismisch bedingte Brände wurden insbesondere an Einrichtungen beobachtet, die nicht gegen Erdbeben ausgelegt sind, deshalb werden derartige Einrichtungen sowohl als Zündquellen als auch Brennstoffquellen besonders kritisch bewertet. Nach KTA-Regel 2101.1 /KTA 15/ sind allerdings in baulichen Anlagen mit sicherheitstechnischer Bedeutung Einrichtungen,

- die brennbare Stoffe freisetzen können, oder
- die eine Entzündung ermöglichen können,

grundsätzlich gegen Einwirkungen eines Erdbebens auszulegen.

- **Auf welche Brandlasten (brennbare Stoffe) muss ein besonderes Augenmerk gelegt werden?**

Es gibt viele verschiedene Arten von Brandlasten in Kernkraftwerken. Als Feststoffe vorliegende Brandgüter sind (meist) schwer entzündbar. Brennbare Gase und flüssige Brennstoffe können nicht nur leichter entzündet werden, es entstehen auch auf Grund ihres großen Heizwerts und des Potenzials der Brandausbreitung gefährlichere Brände.

Die Entzündung von Kabelisolationsmaterialien und Plastik im Zusammenhang mit Erdbeben kann durch seismisch verursachte Fehler bei Kabelverbindungen entstehen. Flüssige Brennstoffe, wie Dieselkraftstoff oder Schmieröle, können sich an heißen Oberflächen entzünden oder auch durch Kabelfehler (Lichtbögen bei einem Spannungsniveau von mehr als 480 V) entzündet werden. Gasförmige Brandlasten, wie Wasserstoff oder Propan, und die entsprechenden Aufbewahrungsorte und Transportleitungen müssen besonders kritisch begutachtet werden, denn hier genügt ein Funken zur Entzündung.

Nachfolgend sind einige wichtige Entzündungsorte und -arten aufgeführt:

- Entzündung auf Grund eines hochenergetischen Lichtbogens bei seismisch bedingtem Kabelversagen,
- Explosionsartiges Versagen auf Grund eines hochenergetischen Lichtbogens bei seismisch bedingtem Kabelversagen,
- Zerstörung von Wasserstoffleitungen und -tanks auf Grund seismischer Einwirkungen, Entzündung,
- Zerstörung von Brennstoffleitungen und -tanks (Diesel) auf Grund seismischer Einwirkungen, Entzündung führt zu großflächigen Ölbränden,
- Entzündung von Turbinenschmieröl,
- Seismisch verursachtes Versagen der Verankerung von Pumpen (mit großem Ölinventar) führt zu einer Ölleckage mit Entzündungsgefahr,
- Seismisch verursachtes Versagen der Verankerung eines ölgefüllten Transformators führt zu einer Ölleckage mit Entzündungsgefahr,

- Seismisch verursachtes Versagen bei der Verankerung hydraulischer Einrichtungen führt zu einer Ölleckage mit Entzündungsgefahr.

- **Was kann zur Entzündungswahrscheinlichkeit gesagt werden?**

Die Wahrscheinlichkeit eines seismisch bedingten Brandes bei einem gegebenen Erdbeben berechnet sich aus dem Produkt der Wahrscheinlichkeiten für ein seismisch verursachtes BSK-Versagen, welches z. B. zu einer Ölleckage führt, und für eine erfolgreiche Zündung des Brennstoffs. Zur Bestimmung des BSK-Versagens kann das Sicherheitsreservefaktorverfahren eingesetzt werden.

Die Wahrscheinlichkeit eines seismisch verursachten BSK-Versagens ist abhängig von der maximalen Freifeldbeschleunigung  $B$ . Die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Zündung ist im Großen und Ganzen nicht abhängig von  $B$ . Diese Wahrscheinlichkeit ist abhängig vom Vorhandensein und vom Umfang der in der Nähe des Brennstoffs vorhandenen Zündquellen sowie von der Energie, die benötigt wird, um das Brandgut zu entzünden. Die erforderliche Zündenergie hängt von Art und Menge des Brandguts ab.

In /LIN 14/ sind Beispiele für Zündwahrscheinlichkeiten in einer petrochemischen Einrichtung (nach einer Brennstoffleckage) gegeben; bei flüssigen Brennstoffen betragen die Wahrscheinlichkeiten zwischen 0.01 und 0.08, bei gasförmigen Brennstoffen zwischen 0.01 und 0.3.

Für die Entzündung von festem Brennstoff, wie Kabelisolationsmaterialien, ist eine sehr hohe Zündenergie erforderlich. Es kann unterstellt werden, dass die erdbebenbedingte Zündung von festen Brennstoffen nur eine minimale Wahrscheinlichkeit besitzt.

- **Qualitative Auswahl seismisch bedingter Brandszenarien**

In Tab. 3.3 ist das schrittweise Vorgehen zur Erweiterung des seismischen Anlagenmodells um brandbedingte Ausfälle beschrieben. Im dritten Schritt findet die Auswahl der seismisch relevanten Brandräume (SRBR) statt. Nachfolgend werden einige Auswahlkriterien hervorgehoben. Ausgangspunkt der Auswahl ist die Liste der seismisch relevanten Räume (SRR). Jeder Raum wird daraufhin untersucht, ob eine spezielle Konstellation von Brandlasten und Zündquellen vorhanden ist, die einen seismisch bedingten Brand möglich macht.

In Tab. 3.4 sind einige wesentliche BSK aufgeführt, die dazu führen, dass der zugehörige Raum als SRBR ausgewählt wird (nach /LIN 14/).

**Tab. 3.4** BSK als Zündquellen mit Brandlasten

–	Behälter, Flaschen und Rohrleitungen (einschließlich Turbine, Hilfskessel), die Wasserstoff, Propan oder andere brennbare Gase enthalten
–	Oberirdische Behälter und Rohrleitungen, die Dieselkraftstoff enthalten
–	Behälter, Komponenten und Rohrleitungen, die Schmieröle enthalten
	• Turbine
	• Turbinenölbehälter
	• Ölgefüllte Transformatoren
	• Pumpen (insbesondere große Pumpen)
	• Kompressoren
	• Rohrleitungen
–	Behälter, Komponenten und Rohrleitungen, die Hydrauliköl enthalten
–	Elektrische Einrichtungen mit Kabeln oder Sammelschienenverbindungen bei Spannungen von 480 V und mehr
	• Schaltanlagen/Sammelleitungen/Antriebe von Motoren
	• Pumpen
	• Ölgefüllte Transformatoren
	• Kompressoren
	• andere Komponenten

Es wird insbesondere nach solchen Brandszenarien gesucht, die in ihrer Auswirkung über die Erdbebenschädigungen hinausgehen. Andererseits muss untersucht werden, ob durch die seismisch bedingten Zerstörungen über die in der Brand-PSA modellierten Brandausbreitungsmöglichkeiten hinaus weitere Brandausbreitungswege möglich sind (Zerstörung von Brandwänden, Versagen von Durchdringungsabschlüssen, wie Brandschutztüren oder -klappen). Wenn die gemeinsamen Auswirkungen von erdbebenbedingten Ausfällen und Ausfällen auf Grund eines erdbebenbedingten Brandes nicht signifikant die alleinige Auswirkung der erdbebenbedingten Ausfälle übersteigt, kann das postulierte, erdbebenbedingte Brandszenario vernachlässigt werden.

Wie bei der Durchführung von Brand-PSA wird zumindest beim Screening angenommen, dass bei einem nicht beherrschten Brand (hier bei einem erdbebenbedingten

Brand) alle BSK im Raum ausfallen, von denen in der Analyse angenommen wird, dass diese auf Grund von Brandwirkungen ausfallen können.

Bei der Auswahl von Brandszenarien sollten auch noch die durchzuführenden Personalhandlungen bei der Brandbekämpfung einbezogen werden. Bei einem seismisch bedingten Brand sind ein erhöhtes Stressniveau und verschärfte Diagnosebedingungen zu berücksichtigen. Bei notwendigen Aktionen vor Ort sind die infolge der seismischen Einwirkungen veränderten Umgebungsbedingungen zu beachten.

- **Quantitative Auswahl seismisch bedingter Brandszenarien**

Zum quantitativen Screening können zur Bewertung zwei Wahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit von der maximalen Freifeldbeschleunigung herangezogen werden:

- Wahrscheinlichkeit des seismisch bedingten Ausfalls einer brandrelevanten BSK (siehe Tab. 3.4),
- Zündwahrscheinlichkeit.

Die Wahrscheinlichkeit eines seismisch bedingten BSK-Versagens, das zu einem Brand führt, kann konservativ durch die Fragility der BSK in Bezug auf Verankerung und Haltevorrichtungen begrenzt werden. Die bedingte Zündwahrscheinlichkeit lässt sich auf Grund von Erfahrungen aus der Industrie konservativ auf 0,1 für alle diejenigen BSK setzen, die auf Grund seismischer Einwirkungen zur Brandquelle werden können.

- **Begehungshinweise zur Identifikation seismisch relevanter Brandräume**

Seismisch relevante Räume enthalten BSK, deren Ausfall auf Grund seismischer Einwirkungen möglich ist und deren Ausfall zum seismischen Risiko beitragen würde. Die seismisch relevanten Räume werden gefunden, indem in der vorläufigen seismischen Ausrüstungsliste S-EL die enthaltenen BSK ihren Räumen zugeordnet werden. Räume mit BSK aus S-EL werden seismisch relevante Räume SRR genannt.

Die Menge der SRR wird begangen, um aus der vorläufigen S-EL die endgültige S-EL zu generieren. Die vorläufige S-EL enthält hauptsächlich die BSK, die als Basisereignisse in der PSA der Stufe 1 modelliert sind. Die Durchführung der Ergänzung der vorläufigen S-EL ist in Kapitel 2.3.2.4 beschrieben, hier werden jetzt noch einige Anmer-

kungen zur Ergänzung der S-EL mit BSK gemacht, die bei seismischen Einwirkungen zu Brandquellen werden können.

Räume, die seismische Brandquellen enthalten und in denen die Folgen des Brandes zum seismischen Risiko beitragen können, werden seismisch relevante Brandräume SRBR genannt. Ohne Beschränkung der Allgemeinheit wird bei vorgegebener Raumstruktur nur eine Brandausbreitung der Tiefe 1 betrachtet, d. h. ein Brand kann sich höchstens in seinen direkten Nachbarraum ausbreiten. Dies ist keine Einschränkung, weil man die Raumstruktur flexibel ändern kann. Ausgangspunkt der Raumaufteilung eines Gebäudes ist allerdings die durch das Anlagenkennzeichnungssystem vorgegebene Struktur. Das Vorgehen besteht in zwei Schritten:

- Ein seismisch relevanter Raum ist auch ein seismisch relevanter Brandraum, wenn eine BSK aus Tab. 3.4 enthalten ist. Die BSK wird in die S-EL aufgenommen.
- Ein Nachbarraum eines seismisch relevanten Raums der vorläufigen S-EL wird zum seismisch relevanten Brandraum, wenn eine BSK aus Tab. 3.4 enthalten ist. Die entsprechende BSK wird in die S-EL aufgenommen.

Nachfolgend findet sich eine Auswahl von Hinweisen, die bei den Begehungen zur Identifikation SRBR beachtet werden sollten (siehe dazu mehr in /LIN 14/):

- Sind Zünd- und Brennstoffquellen im Raum?  
Wenn das Entweichen von flüssigem Brennstoff angenommen wird, befinden sich Zündquellen mit ausreichender Zündenergie im Raum, um einen Brand zu verursachen? Sind die Zündquellen ausreichend gesichert (z. B. keine seismische Zerstörung möglich)? Können die Zündquellen in Kontakt mit dem Brennstoff kommen? Befindet sich brennbares Material im Raum? Ist das brennbare Material ausreichend gesichert (z. B. keine seismische Zerstörung oder Verteilung möglich)? Kann das brennbare Material in Kontakt mit der Zündquelle kommen? Sind die Zünd- und Brennstoffquellen im Raum ausreichend gesichert, um die Wahrscheinlichkeit einer Entzündung zu minimieren? Kann eine Entzündung zu einem signifikanten Brand führen? Wie sind die brennbaren Materialien im Raum verteilt? Ist eine schnelle Brandausbreitung möglich?
- Können durch seismische Einwirkungen zusätzliche Brandausbreitungsmöglichkeiten entstehen (zusätzlich zu den in der Brand-PSA der Stufe 1 behandelten Brandabläufen)?

- Gibt es zusätzlich zu den bisherigen BSK der S-EL risikorelevante BSK im Raum (oder im Nachbarraum), die auf Grund eines Brandes ausfallen können?
- Sind nach dem Erdbeben im Raum Personalhandlungen durchzuführen? Können diese Personalhandlungen zusätzlich durch einen Brand im Raum beeinflusst werden?

### 3.2.3 Quantitative Bewertung erdbebenbedingter Brände

Im vorangegangenen Kapitel wurde qualitativ beschrieben, wie seismisch relevante Brandräume identifiziert werden. Für jeden SRBR  $R$  wird ein Abhängigkeitsmodell  $D_R$  aufgestellt mit  $D_R = \{M_R, F_{\text{BRAND}}(R,B), C_{\text{LÖSCHUNG}}(R,B)\}$  (siehe Kapitel 3.2.1).

Ein SRBR ist entweder selbst ein SRR oder ein direkter Nachbarraum eines SRR, da zur Vereinfachung der Analysen angenommen wird, dass sich ein Brand höchstens bis in den Nachbarraum ausbreitet. Dies bedeutet keine Beschränkung der Allgemeinheit, denn bei der Aufstellung des Abhängigkeitsmodells kann von der durch das Anlagenkennzeichnungssystem vorgegebenen Raumgröße abgewichen werden, um die mögliche Brandausbreitung angemessen beschreiben zu können.

Es wird weiterhin die verallgemeinernde Annahme getroffen, dass ein Brand in einem Raum bei Misslingen aller möglichen Brandbekämpfungsmaßnahmen zum Ausfall aller BSK im Raum führt. Ist zusätzlich die Brandbarriere zum Nachbarraum ausgefallen, fallen auch alle BSK im Nachbarraum aus. Eine Analyse kann variiert werden, indem die Raumgröße verändert wird.

#### **Bestimmung der bedingten Eintrittswahrscheinlichkeit eines seismisch bedingten Brandes im SRBR $R$**

Am 16. Juli 2007 gab es in Japan ein Erdbeben ca. 16 km vom Kernkraftwerk Kashiwazaki-Kariwa entfernt. An diesem Standort gibt es sieben Kraftwerksblöcke. Der durchschnittliche maximale Wert der Bodenbeschleunigung (untere Etage im Reaktorgebäude) betrug 0,66 g. Kurz nach dem Beben trat ein Brand auf.

Auf Grund starker Bodenverschiebungen gab es an einem Transformator (von insgesamt 40 Transformatoren) einen Kurzschluss mit Funkenflug. Es entzündete sich Öl aus einer ebenfalls seismisch bedingten Leckage (es gab insgesamt fünf Ölleckagen

bei Transformatoren im Kernkraftwerk). Der Brand wurde zwei Minuten nach dem Erdbeben entdeckt. Die Brandlöschung mit einem Schlauch von einem Hydranten schlug fehl. Auf Grund des Erdbebens bestand ein Leck in der Löschwasserleitung. Der Einsatz einer externen Feuerwehr verzögerte sich, da sämtliche Telefonleitungen besetzt waren. Nach erfolgter Benachrichtigung brauchte die externe Feuerwehr etwa eine Stunde bis zum Kernkraftwerk auf Grund des durch das Erdbeben verursachten Verkehrschaos im Umfeld des Kraftwerks. Zwei Stunden nach Brandentdeckung war der Brand schließlich gelöscht. Weiterhin trat eine Ölleckage am Schmieröltank der turbinengetriebenen Speisewasserpumpe auf. Das Leckageöl entzündete sich nicht.

Dabei handelte es sich um den ersten, weltweit bekannt gewordenen Fall eines seismisch bedingten Brandereignisses in einem Kernkraftwerk. Eine rein statische Ermittlung der Eintrittshäufigkeit  $F_{\text{BRAND}}(R,B)$  scheidet somit aus. Es wird im Folgenden davon ausgegangen, dass ein seismisch relevanter Raum  $R$  so gewählt wurde, dass gerade eine BSK aus Tab. 3.4 enthalten ist. Es ist also die seismisch bedingte Brandeintrittshäufigkeit an dieser BSK in Abhängigkeit von der maximalen Freifeldbeschleunigung  $B$  zu bestimmen.

In der Literatur /LIN 14/, /MAT 08/ werden zwei Methoden angesprochen:

- Nutzung der seismischen Versagenswahrscheinlichkeit der BSK /LIN 14/  
In /LIN 14/ wird vorgeschlagen, die seismische Versagenswahrscheinlichkeit einer BSK als konservative Abschätzung für die Eintrittswahrscheinlichkeit eines seismisch bedingten Brandes zu nutzen. Das entspricht der Annahme, dass der seismische Ausfall der entsprechenden BSK immer zu einem Brand führt.

Die seismisch bedingte Versagenswahrscheinlichkeit einer BSK wird mit dem Sicherheitsreservfaktorverfahren abgeleitet (siehe in Kapitel 3.1.3.4 den Abschnitt zur seismischen Kapazität einer BSK). Die Konservativität des Vorschlags kann, falls sinnvoll möglich, abgemindert werden, indem nur die Sicherheitsfaktoren bei der Bestimmung der Fragility-Kurve der BSK berücksichtigt werden, die zu einem brandauslösendem Versagen führen können.

- Ableitung einer seismisch bedingten Brandversagenskurve für eine BSK /MAT 08/  
In /MAT 08/ ist ein BSK-bezogenes Modell zur Beschreibung der Eintrittshäufigkeit eines Brandes bei Erdbeben abgeleitet worden; nachfolgend findet sich eine grobe Beschreibung des Vorgehens (siehe dazu auch /TUE 10/).

Die Brandeintrittshäufigkeit (pro Jahr)  $H_{\text{Brand}}$  einer BSK bei Erdbeben gegebener Stärke ergibt sich aus

$$H_{\text{Brand}} = P_{\text{Brandaus}} \cdot \gamma$$

Dabei ist  $P_{\text{Brandaus}}$  die Wahrscheinlichkeit für ein brandrelevantes Vorläuferereignis (z. B. Ölleckage) und  $\gamma$  die Entzündungswahrscheinlichkeit.

#### *Transformatorbrand*

Wertet man das Brandereignis vom 16. Juli 2007 im Kernkraftwerk Kashiwazaki-Kariwa aus, erhält man, dass  $H_{\text{Brand}} = 0,025$  für einen Transformator bei einem Erdbeben der Stärke 0,66 g beträgt. Dabei ist  $P_{\text{Brandaus}} = 0,125$  (5 Ölleckagen bei 40 Transformatoren) und  $\gamma = 0,2$  (1 Entzündung bei 5 Leckagen).

#### *Ölleckage*

Wertet man das Brandereignis vom 16. Juli 2007 im Kernkraftwerk Kashiwazaki-Kariwa aus, erhält man, dass  $H_{\text{Brand}} = 1,48 \text{ E-}05$  für einen Ölbehälter bei einem Erdbeben der Stärke 2,91 g beträgt. Am Standort des Kernkraftwerks Kashiwazaki-Kariwa gibt es 49 Schmierölbehälter, d. h.  $P_{\text{Brandaus}} = 0,0204$  (1/49).

Es gilt weiterhin  $\gamma = 7,2 \text{ E-}04$  (siehe nächsten Abschnitt).

#### *Entzündungswahrscheinlichkeit*

Zur Bestimmung der Entzündungswahrscheinlichkeit  $\gamma$  wird von folgendem empirischen Zusammenhang zwischen Brandeintrittshäufigkeit  $H$  und Entzündungswahrscheinlichkeit  $\gamma_m$  einer BSK in einem Kernkraftwerk ausgegangen:

$$\gamma = \gamma_m \cdot (1 - \exp(-\alpha \cdot H))$$

Dabei ist  $\gamma_m$  die maximal angenommene Entzündungswahrscheinlichkeit und  $\alpha$  ein empirisch zu bestimmender Parameter. In /MAT 08/ wird  $\gamma_m = 0,5$  gesetzt (Expertenannahme).

Für Transformatoren kennt man (aus /NRC 08/, Tab. C-3) eine generische Brandeintrittshäufigkeit von  $1,45 \text{ E-}03/\text{a}$ , aus vorherigen Überlegungen wissen wir, dass  $\gamma = 0,2$  gilt und  $\alpha$  kann berechnet werden ( $\alpha = 353$ ).

Es ergibt sich damit folgende Formel für die Entzündungswahrscheinlichkeit:

$$\gamma = 0,5 \cdot (1 - \exp(-353 \cdot H)) .$$

In /NRC 08/, Tab. C-3 ist keine generische Eintrittshäufigkeit für Brände an einem Ölbehälter gegeben. Man nimmt 0,5 Ausfälle an und errechnet für die Eintrittshäufigkeit 4,1 E-06/a. Es ergibt sich  $\gamma = 7,2 \text{ E-}04$ .

#### Seismische Brandkapazität von BSK

Ausgehend von den Fragilities einer BSK, werden brandbedingte Fragilities abgeleitet.  $B_{0,50}$  sei der Median der Fragility-Kurve einer BSK,  $B_{\text{BRAND},0,50}$ , der Median der zugehörigen brandbedingten Fragility-Kurve.

Aus japanischen Quellen gilt:  $B_{0,50}$  ist gleich 0,66 g für Transformatoren und 3,4 g für Ölbehälter. Daraus ergibt sich das Verhältnis zwischen  $B_{0,50}$  und  $B_{\text{BRAND},0,50}$  von 1,54 für Transformatoren und 1,12 für Ölbehälter (siehe auch Tab. 3.5).

**Tab. 3.5** Seismische Brandkapazitäten für ausgewählte BSK nach /MAT 08/

BSK	$B_{0,50}$ [g]	$H_{\text{Brand}}$ [1/Jahr]	$\gamma$	$B_{\text{Brand}, 0,50}$ [g]
Transformator	0,66	1,45 E-03	0,2	1,02
Schmierölbehälter	3,4	4,10 E-06	0,00072	3,82
große Ölbehälter	3,4	6,70 E-06	0,023	4,72
Schaltpult Warte	6,5	1,20 E-03	0,173	8,56
Kabelprieschen	7,0	5,20 E-05	0,0091	9,67
Dieselgenerator	2,2	4,00 E-03	0,33	2,79
Turbine	2,7	6,00 E-03	0,44	3,54

#### Bestimmung der Ausfallwahrscheinlichkeit der Brandbekämpfung unter Erdbebenbedingungen

Zur quantitativen Bewertung einer Abhängigkeit  $D_R = \{M_R, F_{\text{BRAND}}(R,B), C_{\text{LÖSCHUNG}}(R,B)\}$  ist  $C_{\text{LÖSCHUNG}}(R,B)$  zu bestimmen. Dazu kann keine allgemeine Vorschrift abgeleitet werden.  $C_{\text{LÖSCHUNG}}$  ist abhängig von der Erdbebenintensität. Ein sehr konservativer Ansatz besteht darin, dass angenommen wird, dass die Brandbekämpfung ab einer gegebenen Freifeldbeschleunigung B mit Wahrscheinlichkeit 1 ausfällt.

Weiterhin besteht die Möglichkeit, auf die Ergebnisse der Brand-PSA der Stufe 1 zurückzugreifen. Dort wurden für ausgewählte Räume brandspezifische Ereignisabläufe aufgestellt, mit denen die Brand-Schadenswahrscheinlichkeit im Raum quantifiziert werden kann. Diese Ereignisabläufe müssen in Hinblick auf die möglichen Folgen der seismischen Einwirkung modifiziert werden, so schlug z. B. bei dem schon erwähnten seismischen Brandereignis im Kernkraftwerk Kashiwazaki-Kariwa der erste Versuch einer Brandlöschung auf Grund eines Lecks (Erdbebeneinwirkung!) in der Löschwasserleitung fehl. Der Einsatz einer externen Feuerwehr verzögerte sich, da sämtliche Telefonleitungen besetzt waren. Nach erfolgter Benachrichtigung brauchte die externe Feuerwehr auf Grund des Verkehrschaos nach dem Erdbeben im Umfeld des Kraftwerks eine Stunde bis zum Kernkraftwerk.

### **Erweiterung des Anlagenmodells um brandbedingte Ausfälle aus $D_R$**

$M_R$  enthält alle seismisch relevanten BSK, die durch einen Brand im Raum  $R$  ausfallen können. Das sind zum einen die BSK im Brandraum  $R$  selbst (einschließlich der Kabel) und zum anderen die BSK im direkten Nachbarraum zu  $R$ .

Für jede BSK aus  $M_R$  ist das Anlagenmodell entsprechend zu erweitern (siehe dazu das Beispiel in Anhang B und dort speziell Abb. B.7)

## 4 Aspekte der Quantifizierung von Erdbeben-PSA

Ist die Intensität eines Erdbebens am Standort größer als  $I = 7$ , sollte entsprechend den Vorgaben des Methodenbands zum PSA-Leitfaden /FAK 05/ eine detaillierte probabilistische Analyse der übergreifenden Einwirkung Erdbeben durchgeführt werden (siehe Tab. 2.15), um eine ausreichende Belastbarkeit des Kernkraftwerks gegen seismische Einwirkungen nachzuweisen. Die Intensität eines Erdbebens ist ein Maß für die Stärke eines Erdbebens und über die tabellarische Definition (siehe Tab. 9.2) ist diese Kenngröße direkt mit dem sich ergebenden Schaden verknüpft. Die Intensität selbst kann aber nicht als Eingangsgröße für probabilistische Berechnungen verwendet werden. Dazu werden die (horizontalen) Antwortspektren der Bodenbewegung am Standort benötigt. Für vereinfachte quasistatische Analysen ist die maximale Freifeldbeschleunigung  $B_{\max}$  wichtig.  $B_{\max}$  kann im Freifeldantwortspektrum durch den Einhängewert abgelesen werden.

An einem Standort wird das Bemessungserdbeben bestimmt mit der zugehörigen maximalen Freifeldbeschleunigung  $B_{\text{BEB}}$ . Die Sicherheit einer BSK bei einem Bemessungserdbeben wird durch den Sicherheitsreservefaktor  $SR$  beschrieben. Zur Bewertung der BSK benötigt man eine Fragility-Kurve, d. h. zu jeder Beschleunigung soll die entsprechende bedingte Wahrscheinlichkeit für das Versagen dieser BSK angegeben werden können (siehe /TUE 10/, /FAK 05/ oder auch Kapitel 3.1.3.4 im vorliegenden Bericht zur seismischen Kapazität einer BSK).

Ohne grundlegende Modellannahmen zur Form der Fragility-Kurve kommt man nicht weiter. Man nimmt nun an, dass sich die Beschleunigungsverteilung am Standort bezüglich einer Bezugsbeschleunigung mit Hilfe von zwei logarithmisch normalverteilten Verteilungen darstellen lässt. Als Bezugsbeschleunigung wählt man  $B_{0,5}$ . Das ist die Beschleunigung, bei der die BSK mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 % ausfällt.

$$B = B_{0,5} \cdot \varepsilon_R \cdot \varepsilon_U$$

mit  $\varepsilon_R \sim LNV(0, \beta_R)$  und  $\varepsilon_U \sim LNV(0, \beta_U)$

Daraus lässt sich dann die Versagenskurvenschar ermitteln:

$$F(B, Q) = NV\left(\frac{\ln(B/B_{0,5}) + \beta_U \cdot NV^{-1}(Q)}{\beta_R}\right) \quad (\text{Formel 4.1})$$

Zur Ermittlung von  $B_{0,5}$  wird das Sicherheitsreservefaktorverfahren (siehe /FAK 05/) eingesetzt.

$$\text{Es gilt: } SR = \frac{B_{0,50}}{B_{BEB}}$$

$B_{BEB}$  ist bekannt. Zur Bestimmung von  $B_{0,5}$  ist  $SR$  zu ermitteln.

$SR$  ist das Produkt aus vier Sicherheitsfaktoren. Die vier Sicherheitsfaktoren sind zu bestimmen. Jeder Faktor wird als Zufallsvariable aufgefasst. Die aleatorischen und epistemischen Unsicherheiten für jeden Faktor werden bestimmt.

Für eine mittlere Kurve gilt:

$$F(B) = NV\left(\frac{\ln(B/B_{0,5})}{\beta_C}\right) \text{ mit } \beta_C = \sqrt{\beta_U^2 + \beta_R^2} \quad (\text{Formel 4.2})$$

#### 4.1 Rechentechnische Hilfsmittel

Es wird nun angenommen, dass ein seismisches Anlagenmodell qualitativ und quantitativ erstellt ist, d. h. alle relevanten, durch die seismische Einwirkung hervorgerufenen Ausfallmöglichkeiten von BSK sind mit der Hilfe von Ereignis- und Fehlerbäumen in ihrem strukturellen Zusammenhang beschrieben und alle Ausfälle in ihrer Abhängigkeit von der Intensität quantitativ bewertbar. Mit der Hilfe dieses Modells kann die erdbebenbedingte Kernschadenswahrscheinlichkeit  $SCDP(B)$  für jede gegebene maximale Freifeldbeschleunigung  $B$  berechnet werden. Im Modell werden die Nichtverfügbarkeiten der erforderlichen Systemfunktionen und die bedingten Wahrscheinlichkeiten erdbebenbedingter auslösender Ereignisse betrachtet. Eine Fragility-Funktion  $FBSK(B)$  ist für jede BSK aus der seismischen Ausrüstungsliste  $S-EL$  gegeben.  $FBSK(B)$  ist die Versagenswahrscheinlichkeit der betrachteten BSK bei einem Erdbeben mit maximaler Freifeldbeschleunigung  $B$ . Weiterhin sind alle erforderlichen Abhängigkeitsmodelle  $\{M, A, C\}$  bestimmt, quantifiziert und in das Anlagenmodell eingepasst.

Zusätzlich zum Anlagenmodell wird angenommen, dass eine standortspezifische Häufigkeit von Überschreitenshäufigkeiten  $H(B)$  bekannt ist. Dann kann die integrale seismisch bedingte Kernschadenshäufigkeit bestimmt werden:

$$SCDF = \int_0^{\infty} H(B) \left( \frac{dSCDP(B)}{dB} \right) dB$$

Dazu wird die Beschleunigungsachse geeignet in Intervalle unterteilt mit den Stützstellen  $B_0, B_1, \dots, B_n, B_{n+1}$ , wobei  $B_0 = 0$  und  $B_{n+1} = \infty$  ist.

Sei  $SCDF(x, y)$  die seismische Kernschadenshäufigkeit für das Beschleunigungsintervall  $[x, y]$

$$SCDF(x, y) = \int_x^y H(B) \left( \frac{dSCDP(B)}{dB} \right) dB$$

dann ist

$$SCDF = \int_0^{\infty} H(B) \left( \frac{dSCDP(B)}{dB} \right) dB = \sum_{i=0}^n SCDF(B_i, B_{i+1})$$

Für eine Näherung  $\overline{SCDF}$  von SCDF werden  $B_1$  and  $B_n$  derart gewählt, dass  $SCDF(0, B_1)$  und  $SCDF(B_n, \infty)$  kleiner als ein vorgegebener Schwellenwert  $T$  (z. B.  $T = 1.0 \text{ E-}08$ ) sind.

Somit ergibt sich für die Näherung

$$\overline{SCDF} = 2 \cdot T + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n-1} (B_{i+1} - B_i) \cdot (H(B_i) \cdot SCDP(B_i) + H(B_{i+1}) \cdot SCDP(B_{i+1})).$$

Im Verlauf der Arbeiten sind rechnerische Hilfsmittel entstanden, die zur Veranschaulichung bei seismischen Analysen herangezogen werden können. Dabei handelt es sich zum einen um ein MS EXCEL<sup>®</sup>-Programm zur Veranschaulichung von Fragility-Kurven und ein weiteres zur Berechnung von integralen seismischen Versagenshäufigkeiten. Beide Programme sind selbsterklärend und werden hier nur in Abb. 4.1 und Abb. 4.2 sowie Abb. 4.3 vorgestellt.

## Datenblatt zur Veranschaulichung von Fragilitätskurven

<Seismische Versagenswahrscheinlichkeiten.xlsx>

Es sind einzugeben:  $F_{\text{Median}}$  und die Unsicherheiten  $\beta_u$  und  $\beta_r$



Sollte  $F_{\text{Median}}$  oder die Unsicherheiten nicht gegeben sein, dann folgende Berechnung:

HCLPF statt  $F_{\text{Median}}$  gegeben:

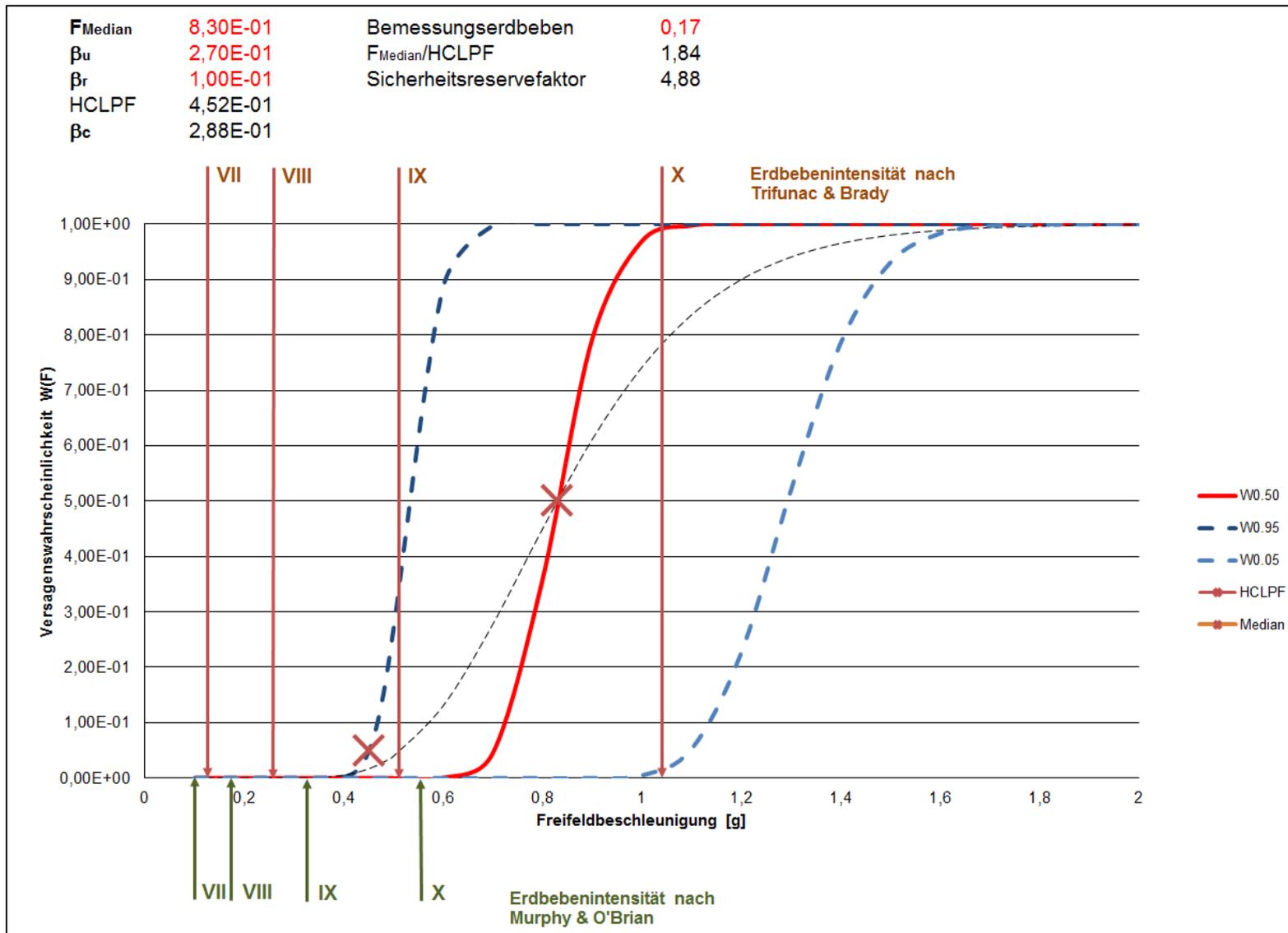
HCLPF: 4,52E-01  $F_{\text{Median}}$  8,31E-01

HCLPF und  $F_{\text{Median}}$  gegeben, aber keine Unsicherheiten, dann Annahme, dass  $\beta_u = \beta_r$

HCLPF: 3,41E-01  $\beta_u, \beta_r$  2,70E-01

Neben der Fragilitätskurve wird noch der Sicherheitsreservfaktor der entsprechenden BSK ausgegeben. Dazu ist die Freifeldbeschleunigung des Bemessungserdbebens einzugeben.

**Abb. 4.1** Datenblatt zur Veranschaulichung von Fragility-Kurven (Erläuterungen)



**Abb. 4.2** Ausgabedatenblatt zur Veranschaulichung von Fragility-Kurven

Anzahl Stützstellen n	10	
Eingabe Häufigkeiten	Freifeldbeschleunigung [g]	Überschreitenshäufigkeit [1/a]
1	0,100	9,08E-03
2	0,200	9,08E-03
3	0,350	2,66E-03
4	0,500	7,71E-04
5	0,750	4,18E-04
6	1,000	1,38E-04
7	1,500	8,24E-05
8	2,200	2,38E-05
9	3,300	5,16E-06
10	4,800	5,61E-07
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		
19		
20		

Eingabe Versagenskurve V			
Median	2,22	bc	0,40
bu	0,33	HCLPF	0,90
br	0,22		

Ergebnisse:	Schadenshäufigkeit/a
Quantil 0,05	2,18E-06
Quantil 0,50	1,91E-05
Punktwert	2,60E-05
Quantil 0,95	7,27E-05

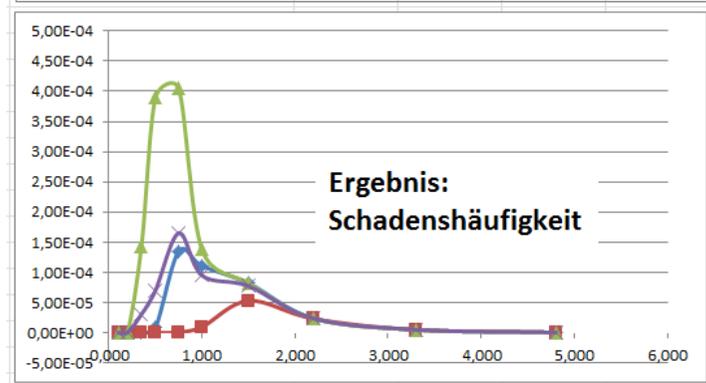
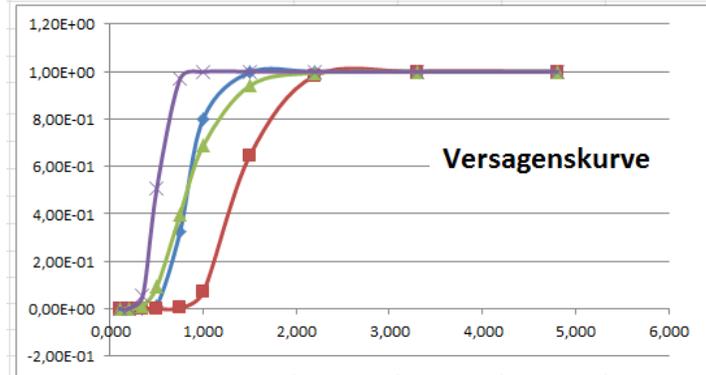
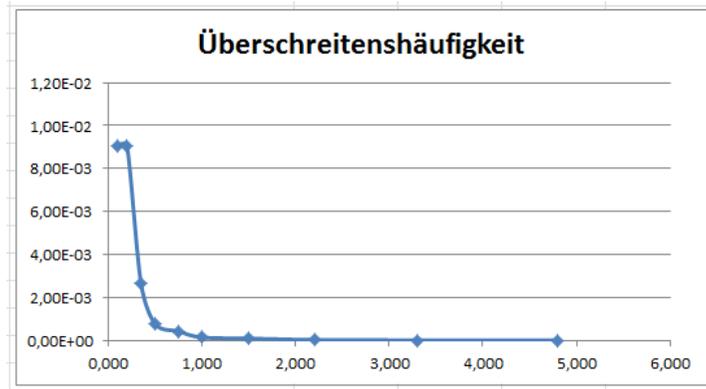


Abb. 4.3 Berechnung der integralen erdbebenbedingten Schadenshäufigkeit pro Jahr

## 4.2 Datenbank zur Bereitstellung seismischer Eingabedaten

Zur unterstützenden Durchführung einer SPSA wurde eine MS ACCESS®-Datenbank <DB SPSA> entwickelt /TUE 10/, siehe Start-Formblatt in Abb. 4.4. Diese Datenbank wurde beispielhaft aufgebaut, um im Verlauf der Erarbeitung einer Erdbeben-PSA die erforderlichen Daten aufzunehmen, aufzubereiten und in den verschiedenen Phasen der Projektbearbeitung geeignet zur Verfügung zu stellen.



**Abb. 4.4** Datenbank <DB SPSA>

### 4.2.1 Allgemeine Datenbankanforderungen zur Unterstützung von SPSA

Nachfolgend sind die wichtigsten Forderungen an eine Datenbasis für SPSA zusammengestellt (entsprechend /IAE 11/, Punkte III-67 bis III-69). Die Nutzung von Datensammlungen zu SPSA kann die notwendigen PSA-Modellerweiterungen bei seismischen Ereignissen mit den Listen S-EL und S-DL wesentlich erleichtern. Die Datensammlungen können sowohl im Format MS EXCEL® oder MS ACCESS® angelegt werden. Folgende Tabellen sollten laut /IAE 11/ in der Datensammlung enthalten sein:

- BSK-Tabelle (in /IAE 11/: component table, structural interaction table):  
Die BSK-Tabelle enthält das AKZ der Struktur, des Gebäudes oder der Komponente, das zugehörige Gebäude und die Kote der Aufstellung, das zugehörige Basisereignis im Anlagenmodell der Stufe 1 sowie das entsprechende seismische Basisereignis, eine Beschreibung der BSK und Angaben zur Fragility der Komponente. Zusätzlich sind noch Informationen zu den seismischen auslösenden Ereignissen aufzunehmen:  
*Anmerkung zu <DB SPSA>:*  
Diese Art der in /IAE 11/ geforderten BSK-Tabelle ist in der <DB SPSA> so umgesetzt, dass auf der Grundlage der vorliegenden Informationen zu allen BSK das Auswahlverfahren zur Bereitstellung der S-EL effektiv durchgeführt werden kann. Die Menge der BSK umfasst auch Personalhandlungen.
- Standort-Tabelle (in /IAE 11/: soil interaction table):  
Die Standort-Tabelle enthält seismische Informationen zum Standort.  
*Bemerkung zu <DB SPSA>:*  
Diese Art der in /IAE 11/ geforderten Standort-Tabelle ist in der <DB SPSA> nicht angelegt. Es ist allerdings die Tabelle der jährlichen Überschreitenshäufigkeiten für seismische Belastungen enthalten.
- Tabelle der seismischen Korrelationen (in /IAE 11/: seismic correlation table):  
Diese Tabelle enthält Daten zu den seismischen Korrelationen zwischen den BSK.  
*Anmerkung zu <DB SPSA>:*  
Diese Art der in /IAE 11/ geforderten Tabelle der seismischen Korrelationen ist in der <DB SPSA> angelegt. Es können sogenannte Abhängigkeitsmengen  $M$  festgelegt und hinterlegt werden (siehe Abhängigkeitsmodell  $\{M, A, C\}$ , Kapitel 3.1.2. Es werden sämtliche Abhängigkeiten aus S-DL (nach Durchführung des Auswahlverfahrens, vgl. Kapitel 2.3.2.3) eingetragen.
- Tabelle der seismisch bedingten Auslöser (in /IAE 11/: seismic initiator table):  
Die Auslöser-Tabelle enthält Informationen zu den in der PSA Stufe 1 betrachteten auslösenden Ereignissen und den seismisch bedingten auslösenden Ereignissen einschließlich Beschreibungen.  
*Anmerkung zu <DB SPSA>:*  
Diese Art der in /IAE 11/ geforderten Standort-Tabelle ist in der <DB SPSA> nicht angelegt, kann allerdings problemlos ergänzt werden.
- Tabelle der Personalhandlungen bei seismischen Ereignissen (in /IAE 11/: seismic human failure event table):

Die Personalhandlungstabelle enthält alle Informationen (insbesondere umfassende Beschreibung der Tätigkeit oder Aufgabe und der zugehörigen Fehlerwahrscheinlichkeiten) zu den in der PSA Stufe 1 modellierten Personalhandlungen und zu den Personalhandlungen, die auf Grund der seismischen Einwirkungen auf die Anlage durchgeführt werden müssen.

*Anmerkung zu <DB SPSA>:*

Diese Art der in /IAE 11/ geforderten Personalhandlungstabelle ist in der BSK-Tabelle von <DB SPSA> enthalten.

– S-EL-Tabelle:

Diese Tabelle enthält die seismische Ausrüstungsliste (siehe z. B. Kapitel 2.3.2.4). Jede BSK der S-EL enthält Informationen zur Fragility der BSK. Dazu wird in /IAE 11/ angeregt, die mediane Kapazität  $B_{0,50}$  und die mittlere Variabilität  $\beta_c$  anzugeben.

*Anmerkung zu <DB SPSA>:*

Die Datenbank <DB SPSA> enthält eine Tabelle <tb/Verswahr> zur Aufnahme, Speicherung und Recherche von Versagenswahrscheinlichkeiten, deren Anwendung weit über die in /IAE 11/ angeregten Nutzungsmöglichkeiten hinausgeht, dazu mehr im nächsten Kapitel.

#### 4.2.2 Fragilities von BSK

Die Datenbank <DB SPSA> enthält eine Tabelle <tb/Verswahr> zur Aufnahme, Speicherung und Recherche von Versagenswahrscheinlichkeiten. Diese Tabelle wurde im Verlauf des Vorhabens ergänzt und an die Erfordernisse der Durchführung einer SPSA innerhalb des Konzepts zur Durchführung einer standortspezifischen PSA angepasst.

Die Tabelle <tb/Verswahr> ist wie in Tab. 4.1 dargestellt strukturiert.

**Tab. 4.1** Struktur der Tabelle <tb/Verswahr> der Datenbank <DB SPSA>

Feldname	Felddatentyp	Beschreibung
VW_ID1	Text (6) Primärschlüssel	Kurzbezeichnung der Fragility der Länge 6, dient zur eindeutigen Kennzeichnung der Fragility und zur Zuordnung in Auswertungsprogrammen wie CRAVEX oder RiskSpectrum®
VW_F05	Double Standardwert: -1	$B_{0,50}$ Median der Fragility-Kurve $F(B)$ , $F(B_{0,50}) = 0,50$

Feldname	Felddatentyp	Beschreibung
VW_HCLPF	Double Standardwert: -1	$B_{HCLPF}$ , HCLPF-Wert; es gilt $F(B_{HCLPF}, 0,95) = 0,05$
VW_BETAU	Double Standardwert: 0,3	$\beta_U$ epistemische Unsicherheit
VW_BETAR	Double Standardwert: 0,2	$\beta_R$ aleatorische Unsicherheit
VW_INFO	Memo	Text zur ausführlichen Beschreibung der Fragility, d. h. insbesondere, für welche BSK die Fragility-Kurve abgeleitet wurde, welcher Schadensmechanismus angenommen wurde usw.
VW_tag	Text (255)	Sammelbezeichnung für die BSK (dient zum Filtern der Daten, z. B. können alle Fragility-Kurven zu Pumpen herausgesucht und verglichen werden)
VW_Bmax	Double	Sollte zu einer Fragility-Kurve einer BSK angegeben sein, für welchen zugehörigen Wert der maximalen Freifeldbeschleunigung die Ableitung vorgenommen wurde, kann dieser Wert hier eingetragen werden.
VW_DQ	Text (5)	Wo stammen die Daten her? Datenquelle (Kurzbezeichnung der Länge 5), Bezug zur Tabelle <tblDatenquellen> in der Datenbank <DB SPSA>. Dort ist die Quelle ausführlich beschrieben bzw. sogar ein entsprechender Link angebracht.

Bisher wurden die in Tab. 4.2 aufgeführten Literaturstellen ausgewertet und die dort enthaltenen Fragilities in die Datenbank-Tabelle übernommen.

Es muss darauf hingewiesen werden, dass die Datenbank und einige der darin enthaltenen Daten nicht öffentlich verfügbar sind. Weiterhin ist anzumerken, dass nicht alle Quellen gesichtet wurden und die genutzten Quellen nicht vollständig ausgewertet wurden. Es ist geplant, die Tabelle nach und nach zu ergänzen und schließlich aktuell zu halten.

**Tab. 4.2** Bisher ausgewertete Literaturstellen mit Fragility-Angaben

VW_DQ	Quelle
DQ021	Aus einer Sicherheitsüberprüfung für ein deutsches Kernkraftwerk - Daten sind nicht veröffentlicht. (Die entsprechende Literaturstelle ist in der Datenbank spezifiziert.)
DQ025	Helander, J., K. Jänkälä; The Update of Seismic Probabilistic Risk Analysis for Loviisa PSA, PSAM 11, June 2012, Helsinki /HEL 11/

VW_DQ	Quelle
DQ026	Seewald, J.: Erstellung eines vereinfachten Verfahrens zur Bestimmung des Erdbebenrisikos von Kernkraftwerken, Diplomarbeit, März 2012 /SEE 12/
DQ028	Bohn, M P., J. A. Lambright: Procedures for the External Event Core Damage Frequency Analyses for NUREG-1150, NUREG/CR-4840, SAND88-3102; November 1990, (Table 3.3) /BOH 90/
DQ032	IAEA-TECDOC-1487 /IAE 06/
DQ033	Seismische PSA für GKN I (siehe auch Literaturstelle /KLA 08/)
DQ034	Aus einer Sicherheitsüberprüfung für ein deutsches Kernkraftwerk -Daten sind nicht veröffentlicht. (Die entsprechende Literaturstelle ist in der Datenbank spezifiziert.)
DQ036	U.S. NRC: Risk Assessment of Operational Events Handbook, Vol. 2 – External Events, January 2008 /NRC 08/
DQ037	Park, Y. J., et al. Survey of seismic fragilities used in PRA studies of NPP, Nuclear Engineering and Design 62 (1998), S. 185-195 /PAR 98/  Für 35 BSK-Kategorien wurde ausgewertet, welche Fragilities in durchgeführten (Anzahl wird angegeben) SPSA genutzt wurden. Es wird (auch in der Datenbank) eine Spannweite von Werten angegeben.

#### 4.2.2.1 Eingabe von Fragilities

In die Tabelle <tblVerswahr> können sowohl generische als auch anlagenspezifische Versagenswahrscheinlichkeiten eingetragen werden. Eine VW-Kurve ist eindeutig festgelegt durch Angabe des HCLPF- bzw. des Medians der Freifeldbeschleunigung und der Unsicherheiten  $\beta_U$  und  $\beta_R$  (siehe Formel 4.1).

In der Fachliteratur sind oft nicht alle Werte angegeben, deshalb sind folgende Festlegungen getroffen worden:

- Ist nur der HCLPF-Wert (oder nur der Median) gegeben, so wird  $\beta_U = 0,3$  und  $\beta_R = 0,2$  gesetzt.
- Sind der HCLPF-Wert und die Unsicherheiten  $\beta_U$  und  $\beta_R$  gegeben, so wird der Median berechnet (Änderungsabfrage <VW HCLPF in Median>).
- Sind der Median und die Unsicherheiten  $\beta_U$  und  $\beta_R$  gegeben, so wird der HCLPF-Wert berechnet (Änderungsabfrage <VW Median in HCLPF>).

- Sind der Median und der HCLPF-Wert und keine Unsicherheiten gegeben, so wird angenommen, dass  $\beta_U = \beta_R$  ist (Änderungsabfrage <VW HCLPF und Median in Beta>).

Zu jeder neuen Fragility ist eine Kategorie anzugeben (Feld VW\_tag). Bisher sind die Kategorien (englisch: Tags) in der nachfolgenden Tab. 4.3 verwendet worden:

**Tab. 4.3** BSK-Kategorien in der Fragility-Tabelle

BSK-Kategorien		
Antrieb	Armatur	Batterie
Bauwerk	Behälter	Containment
Diesel	Druckhalter	Druckspeicher
Elektrische Ausrüstung	Freiluftschaltanlage	Gebäude
Kabel	Kamin	KKW
Pumpe	RDB	Rohrleitung
Schaltanlage	Schrank	Transformator
Wärmetauscher	Wechselrichter	

Beim Hinzufügen neuer Daten, sollte immer erst geprüft werden, ob die neuen Werte einer schon vorhandenen Kategorie zugeordnet werden können. Es wird empfohlen, die Datenbank (und das Feld der Kategorien VW\_tag) zu überarbeiten, wenn hinreichend viele BSK-Fragilities in der Datenbank enthalten sind.

Die Eingabe neuer Werte erfolgt direkt in die Datenbanktabelle (siehe Abb. 4.5) oder über ein bereitgestelltes Datenbankformular (siehe Abb. 4.6).

	VW_ID1	Median	HCLPF	beta u	beta R	Info	VW_tag	VW_Quelle	VW_Bmax
*		-1,00	-1,00	0,30	0,20				

**Abb. 4.5** Dateneingabe direkt in die Tabelle <tblVerswahr> der Datenbank <DB SPSA>

**Versagenswahrscheinlichkeiten**

**Name:** GKN113    **BSK-Kategorie:** Gebäude    **Datenquelle:** KLA

**Infos zur Versagenswahrscheinlichkeit**

SPSA GKN1: Notspeisegebäude, Versagen der Außenwände durch dynamischen Erddruck - (bu und bR waren in der Quelle nicht gegeben, errechnet mit Annahme bU=bR)

**maximale Freifeldbeschleunigung bei Bemessung oder Einsatz der BSK [g]** 0,17

**Median [g]** 4,71

**HCLPF [g]** 1,83

**betaU-Wert:** 0,29    **berechnet:** Median/HCLPF 2,57

**betaR-Wert:** 0,29    **Si-Reservefaktor** 27,71

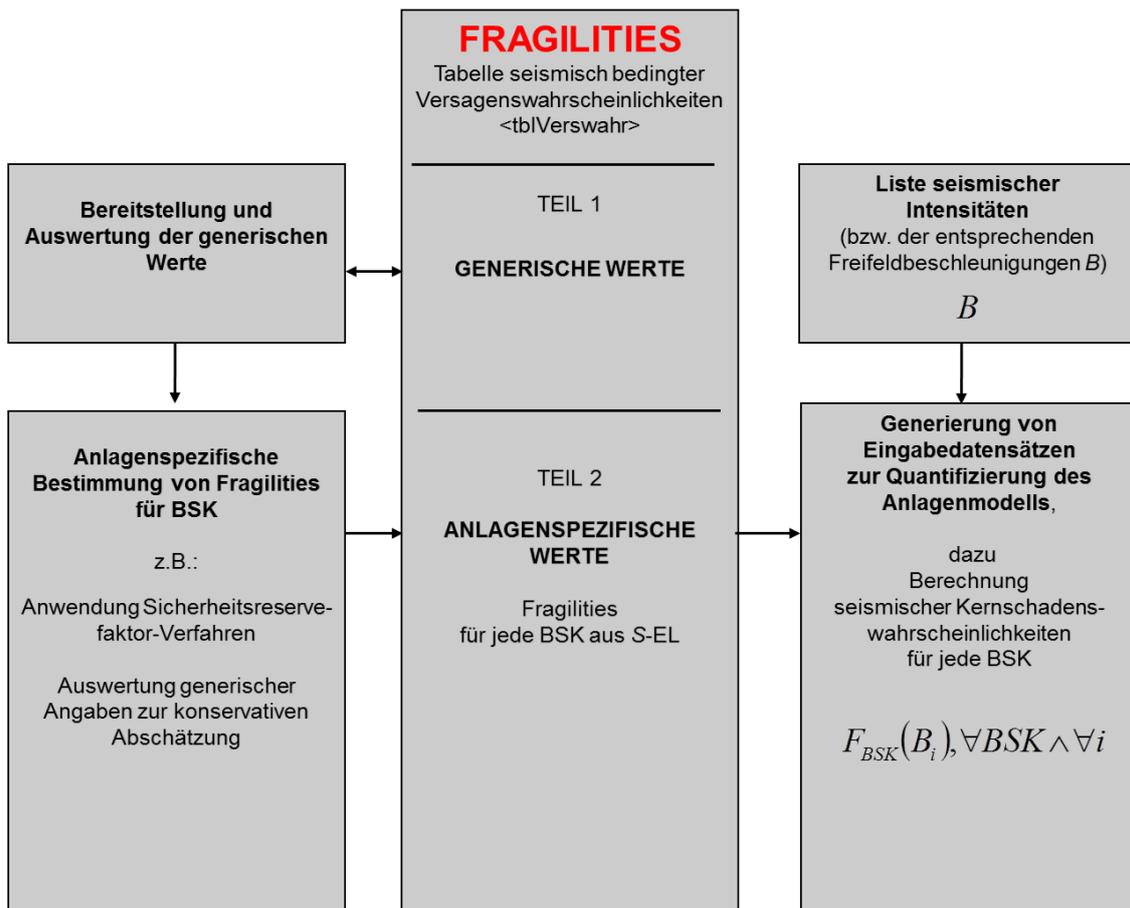
Liste    ◀ ▶ ✖ ➕

Datensatz: 28 von 190    Ungefiltert    Suchen

**Abb. 4.6** Dateneingabe über ein Datenbankformular der Datenbank <DB SPSA> (Eingabe blaue Felder)

#### 4.2.2.2 Nutzung der Daten für anlagenspezifische PSA

Die Nutzung der Tabelle <tb/Verswahr> zur Berechnung von Fragilities in Abhängigkeit von einer gegebenen Freifeldbeschleunigung für alle BSK in einem konkreten seismischen Anlagenmodell ist in /FRE 10/ erläutert. Hier erfolgt nur eine kurze Zusammenfassung (siehe auch Abb. 4.7).



**Abb. 4.7** Nutzung der Tabelle erdbebenbedingter Versagenswahrscheinlichkeiten

Nimmt man an, dass die S-EL vorliegt (zur Ableitung siehe Kapitel 2.3.2.4), kann das genutzte Anlagenmodell entsprechend erweitert werden (siehe Kapitel 2.3.2). Für jede BSK der S-EL wurde entschieden, in welcher Tiefe, mit welchem Detaillierungsgrad eine Fragility-Kurve abgeleitet werden muss (siehe Abb. 2.7).

Jede abgeleitete Fragility-Kurve wird in einem Datensatz der Tabelle <tblVerswahr> unter einem Kennzeichen VW\_ID1 (siehe Tab. 4.1) zur weiteren Verwendung bereitgestellt. Aus dem Anlagenmodell wird eine Liste von seismisch relevanten BSK erstellt, jeder BSK wird die entsprechende Fragility-Kurve zugeordnet. Mit Hilfe der Angaben zur Fragility-Kurve kann nun für jede gegebene Freifeldbeschleunigung die seismische Versagenswahrscheinlichkeit für jede BSK errechnet werden. Dieser Datensatz wird an das Anlagenmodell übergeben und unter Einbeziehung der entsprechenden Überschreitenshäufigkeit kann die seismische Kernschadenshäufigkeit für die gegebene maximale Freifeldbeschleunigung berechnet werden.

Es ist noch anzumerken, dass die Fragility-Kurven einer anlagenspezifischen PSA in der Datenbank <tb/Verswahr> auch als generische Werte für Untersuchungen zur Bewertung der seismischen Kapazität einer BSK genutzt werden können (mehr dazu im nächsten Abschnitt).

#### 4.2.2.3 Nutzung der Fragilities zur Bewertung der seismischen Widerstandsfähigkeit von BSK

Nachfolgend wird auf die Nutzungsmöglichkeiten der Fragility-Kurven in der Tabelle <tb/Verswahr> als Informationsquelle bei der Bewertung von BSK in Hinblick auf ihre seismische Widerstandsfähigkeit eingegangen. Weiterhin wurde im Projektverlauf eine Reihe von Literaturquellen zur Ergänzung der Datenbank ausgewertet. Ein Datenbankauszug ist in Tab. 4.4 als Beispiel enthalten. Aktuell sind ca. 250 Datensätze zu Fragilities von BSK enthalten (Stand August 2015).

**Tab. 4.4** Auszug aus der Tabelle <tb/Verswahr> der Datenbank <DB SPSA>

ID	Median	HCLPF	$\beta_U$	$\beta_R$	BSK-Klasse	Detailinfo	Quelle
G00019	20,50	9,01	0,30	0,20	Armatur	Halterung von Armaturen, oberer Wert	DQ037
NRC25	3,80	1,30	0,35	0,30	Batterie	Batterien und Batteriestände	DQ036
484023	3,00	0,77	0,53	0,30	Behälter	Behälter (groß, horizontal)	DQ032
GKN212	1,23	0,36	0,42	0,33	Schalt-schrank	Motorsteuerungs-, Nieder- und Mittelspannungsschalt-schranke, Relais-Versagen während Erdbeben	DQ021
KWG04	1,12	0,30	0,53	0,27	Gebäude	Notspeisegebäude	DQ034
G00056	0,62	0,27	0,30	0,20	NSF	Keramikisolatoren, oberer Wert	DQ037

In /BOH 90/ heißt es zur Nutzung generischer Versagenswahrscheinlichkeiten, dass man immer auf die Originalquelle zurückgreifen sollte (das ist in der Datenbank möglich, die zugehörige Datenquelle ist angegeben), um die BSK, für die eine Fragility gesucht wird, in ihren Eigenschaften und Einsatzbedingungen mit denen der generischen Komponente zu vergleichen. Jede Abweichung muss sorgfältig registriert und überprüft

werden. Sind die Abweichungen zu groß (und die BSK relevant), sind anlagenspezifische Ableitungen der Versagenswahrscheinlichkeiten durchzuführen.

In /KAS 02/, Anhang E wird betont, dass es unmöglich sei, für alle BSK der S-EL anlagenspezifische Versagenswahrscheinlichkeiten bereitzustellen. Viele der BSK und auch die Verteilungssysteme sind inhärent robust gegen seismische Einwirkungen. Eine detaillierte Untersuchung der seismischen Versagenswahrscheinlichkeit erübrigt sich, wenn die durch Erdbeben bedingte Ausfallrate der BSK klein ist im Vergleich zu den Ausrüstungen, die für das seismische Risiko der Anlage dominant sind. Dazu ist ein Screening-Level zu definieren, in das folgende Parameter einbezogen werden: das seismische Risiko, die Unsicherheit bezüglich des Medians der Versagenswahrscheinlichkeit und das relative Kernschadenspotenzial bei Ausfall.

In /NRC 91/ wird ausgeführt, dass eine seismische Ausfallanalyse für eine BSK bis 1,5 g ausgeführt werden sollte, es sei denn man kann mit Sensitivitätsanalysen nachweisen, dass ein niedrigerer Wert berechtigt wäre. Weiterhin muss bei dem abzuleitenden Kriterium berücksichtigt werden, dass die Unsicherheit von Versagenswahrscheinlichkeiten mit der Ausfallart variiert.

Die Anwendung der genannten Regeln sowie die Auswertung ergeben die in der nachfolgenden Tab. 4.5 genannten Schwellenwerte für den Auswahlprozess.

**Tab. 4.5** Schwellenwerte zur BSK-Bewertung

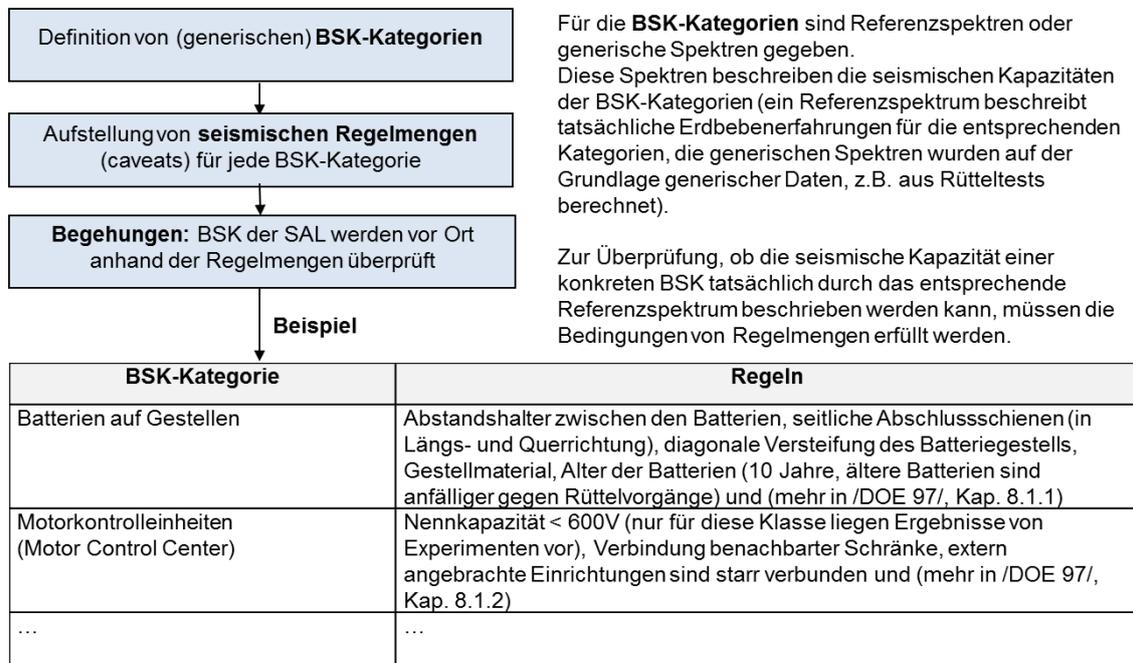
Eigenschaften der BSK	Median [g]	HCLPF [g]	Median/HCLPF
Flexible, duktile Strukturen oder BSK	1,5	0,5	3,0
Sprödigkeit oder funktionale Ausfallarten	1,22	0,57	2,14

Die Kenngröße Median/HCLPF wird im Ausgabeformular der Tabelle <tb/Verswahr> angezeigt (siehe Abb. 4.6).

In /TUE 10/ wurde auf der Grundlage von /DOE 97/ ein Verfahren zur Bewertung der seismischen Robustheit technischer Ausrüstungen beschrieben. Hier bietet sich eine Erweiterung der Datenbank in Hinblick auf die Nutzung der angegebenen Werte als konservative Abschätzungen der Versagenswahrscheinlichkeit für ausgewählte BSK in einer durchzuführenden SPSA an. Es sind für jede BSK-Kategorie Eigenschaften in Regelmengen (caveats) zu hinterlegen, die durch die konkrete BSK erfüllt sein müs-

sen, damit der in der Tabelle <tbl>Verwahr</tbl> der Datenbank <DB> SPSA</DB> enthaltene Wert als konservativer Wert genutzt werden kann.

Bei Begehungen ist zu prüfen, ob die Bedingungen der Regelmengen durch die konkrete BSK erfüllt werden (siehe auch Abb. 4.8).



**Abb. 4.8** Klassifikation von BSK nach ihrer sicherheitstechnischen Bedeutung

In /BEN 91/ sind Erfahrungswerte für die untere und obere Grenze des HCLPF84%-Wertes für BSK gegeben, die bei Einhaltung der angegebenen technischen Merkmale (das sind wieder eine Anzahl gegebener Regeln) als generische Größen verwendet werden können. Diese Werte gelten für den Maximalwert im 84 %-Fraktile-Freifeldspektrum am Standort der betrachteten Anlage bei einer Dämpfung von  $D = 0,05$  als makroseismische Kenngröße. Im Rahmen der PSA wird jedoch die Starrkörperbeschleunigung des 50 %-Fraktile-Spektrums (Medianspektrum) als Kennwert verwendet. Die Werte sind also umzurechnen.



## 5 Zusammenfassung

Auf der Grundlage umfangreicher Recherchen zum internationalen Stand von Wissenschaft und Technik auf dem Gebiet von Risikoanalysen für übergreifende Einwirkungen, der Einbeziehung eigener methodischer Untersuchungen zur Durchführung derartiger Analysen, insbesondere für die übergreifenden Einwirkungen Erdbeben und anlageninterner Brand, sowie den Erfahrungen, die bei der Durchführung wie auch bei der Begutachtung probabilistischer Sicherheitsanalysen gewonnen werden konnten, wird im vorliegenden Bericht das grundsätzliche Vorgehen bei der Erarbeitung einer Risikoanalyse unter Einbeziehung eines umfassenden standortbezogenen Spektrums übergreifender Einwirkungen beschrieben und ausführlich sowohl an einfachen theoretischen Beispielen als auch an Beispielen aus aktuellen Sicherheitsanalysen deutscher Kernkraftwerke erläutert.

Das Kernstück des vorliegenden Berichts besteht in der Beschreibung des grundsätzlichen Vorgehens bei der Durchführung einer standortspezifischen PSA der Stufe 1 unter Einbeziehung aller Risiken, die durch übergreifende Einwirkungen von innen und außen hervorgerufen werden.

Der erste Arbeitsschritt bei der Durchführung einer HPSA besteht in der Festlegung der übergreifenden Einwirkungen, die am konkreten Standort auftreten können. Dazu wurde eine Zusammenstellung übergreifender Einwirkungen und deren Kombinationen angefertigt. Auf der Grundlage dieser Zusammenstellung generischer übergreifender Einwirkungen kann mit einem Auswahlverfahren unter Einbeziehung von behördlichen Vorgaben und Erkenntnissen aus Standortanalysen und -begehungen eine Liste der für den Standort zu bewertenden übergreifenden Einwirkungen begründet abgeleitet werden. Alle am Standort zu betrachtenden übergreifenden Einwirkungen sind in Bezug auf die notwendige Tiefe der probabilistischen Untersuchungen zu klassifizieren. Dabei wird zwischen übergreifenden Einwirkungen unterschieden, deren Risikobeitrag vernachlässigbar ist, übergreifenden Einwirkungen, für die aufgrund des nachgewiesenen geringen Risikobeitrags eine quantitative Grobabschätzung ausreichend ist, sowie übergreifenden Einwirkungen, die im Detail probabilistisch zu analysieren sind.

Zur quantitativen Bestimmung des Risikobeitrags einer übergreifenden Einwirkung auf der Grundlage eines vorhandenen PSA-Anlagenmodells der Stufe 1 wird folgendes Vorgehen vorgeschlagen. Zuerst sind Listen zu erstellen, die alle BSK enthalten, die durch die entsprechende übergreifende Einwirkung in ihrer Funktionsweise beeinträch-

tigt werden und diese Beeinträchtigung zur Risikoerhöhung beiträgt. Davon enthält eine Liste die einzelnen BSK und eine weitere die Ausfallabhängigkeiten zwischen mehreren BSK, die durch die übergreifende Einwirkung zu berücksichtigen sind.

Zusätzlich zu dem allgemein beschriebenen Vorgehen bei der Durchführung von HPSA wird der Frage der Modellierung von Abhängigkeiten im bedingten Ausfallverhalten der Einrichtungen eines Kernkraftwerks bei übergreifenden Einwirkungen nachgegangen. Dazu wird ein allgemeines Abhängigkeitsmodell formuliert und an vielen Beispielen gezeigt, wie die erkannten Abhängigkeiten in die Fehlerbaummodellierung übernommen werden können.

Bei der beschriebenen Methode zur Durchführung von Risikountersuchungen weiterer übergreifender Einwirkungen wird die bisher praktizierte Herangehensweise bei der Durchführung von standortbezogenen Risikoanalysen in mehrere Richtungen erweitert:

- Notwendigkeit der Durchführung einer standortbezogenen Auswahl der in die Analyse einzubindenden übergreifenden Einwirkungen auf der Grundlage einer vorgegebenen Liste generischer übergreifender Einwirkungen.
- In Analogie zur seismischen Ausrüstungsliste ist für jede im Detail zu analysierende übergreifende Einwirkung eine entsprechende Ausrüstungsliste abzuleiten und zur systematischen Modellerweiterung des vorliegenden PSA-Modells für interne Auslöser zu nutzen.
- Den Ausrüstungslisten werden sogenannte Abhängigkeitslisten zur Seite gestellt. Mit einer Abhängigkeitsliste für eine übergreifende Einwirkung wird sichergestellt, dass keine durch die übergreifende Einwirkung bedingte Ausfallabhängigkeit zwischen den BSK übersehen werden kann.

Der Bericht enthält auf Grund seines weitgefächerten fachlichen Spektrums eine Vielzahl von Fachtermini und Abkürzungen, die an entsprechender Stelle des Berichts definiert und erläutert werden. Zur Verbesserung der Lesbarkeit ist ein umfangreiches Glossar zum Nachschlagen angegeben. Das Literaturverzeichnis hat bibliografischen Charakter, d. h. es dient dem interessierten Leser sich einen Überblick zum aktuellen Stand der internationalen Untersuchungen auf dem Gebiet der Risikobewertung übergreifender Einwirkungen zu verschaffen.

## 6 Literaturverzeichnis

Die mit einem \* markierten Literaturangaben sind im Anhang A zur Bestimmung des Stands von Wissenschaft und Technik näher beschrieben. Dabei wurden insbesondere solche Inhalte konspektiert, die zu den wesentlichen Inhalten des vorliegenden Berichts interessante Aspekte beitragen. Bei einigen weiteren Artikeln sind kurze Angaben zum Inhalt gemacht.

/AMI 15/ Amico, P. J., et al.: A preliminary approach to PRA for seismically-induced internal fires and floods, in: Proceedings of ANS PSA 2015 International Topical Meeting on Probabilistic Safety Assessment and Analysis, Sun Valley, ID, April 26-30, 2015, on CD-ROM, American Nuclear Society, La-Grange Park, IL, 2015.

[http://www.psa2015.org/Presentations/Session\\_20-4\\_\(Paper\\_12177\)\\_Amico,\\_Macheret,\\_Kassawara.pdf](http://www.psa2015.org/Presentations/Session_20-4_(Paper_12177)_Amico,_Macheret,_Kassawara.pdf).

/ANS 03/ American Nuclear Society (ANS): External-Events PRA Methodology, ANSI/ANS-58.21-2003.

<http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1204/ML12044A209.pdf>.

/ANS 07/\* American Nuclear Society (ANS): External Events Methodology Standard, ANSI/ANS-58.21-2007.

<http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1204/ML12044A209.pdf>.

/ASA 13/ ASAMPSA\_E: Advanced Safety Assessment Methodologies: Extended PSA, Arbeitsmaterialien zu einem laufenden EU-Projekt, 2013 – 2016

/ASM 09/ Addenda to ASME/ANS RA-S-2008, Standard for Level 1/ Large Early Release Frequency Probabilistic Risk Assessment for Nuclear Power Plant Applications, An American National Standard, ASME/ANS RA-Sa-2009, 2009.

/BAB 05/ Babst, S., et al.: Brand-PSA für das Kernkraftwerk Philippsburg, Block 1 (KKP-1) im Leistungsbetrieb, GRS-A-3278, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, Juni 2005.

[http://grs-portal.grs.de/Docs/Dokumente/3000-3499%20\(2001-2007\)/GRS-A-3278.pdf](http://grs-portal.grs.de/Docs/Dokumente/3000-3499%20(2001-2007)/GRS-A-3278.pdf).

- /BAB 11/ Babst, S., et al.: Methoden zur Durchführung von Brand-PSA im Nichtleistungsbetrieb, GRS-A-3579, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, Germany, Januar 2011.  
[http://grs-portal.grs.de/Docs/Dokumente/3500-3999%20\(2009-20xy\)/GRS-A-3579.pdf](http://grs-portal.grs.de/Docs/Dokumente/3500-3999%20(2009-20xy)/GRS-A-3579.pdf).
- /BAB 13/ Babst, S., et al.: Vergleichende probabilistische Untersuchungen zur brandbedingten Gefährdung der Brennelement-Lagerbeckenkühlung in der Nachbetriebsphase, Technischer Bericht im Vorhaben FM8832, März 2013
- /BAB 15/ Babst, S., M. Röwekamp, M. Schwarz, M. Türschmann: Conducting Fire PSA for the post-commercial shutdown phase, in: 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, France, August 2015, <https://www.oecd-nea.org/nsd/docs/2015/csni-r2015-12.pdf>.
- /BEN 91/ Benjamin, J. R., et al.: A Methodology for assessment of Nuclear Power Plant Seismic Margin (Revision 1), EPRI NP-6041-M, Final Report, August 1991.  
<http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=NP-6041-SLR1>.
- /BMI 76/ Bundesministerium des Inneren (BMI): Richtlinie für den Schutz von Kernkraftwerken gegen Druckwellen durch chemische Reaktionen durch Auslegung der Kernkraftwerke hinsichtlich ihrer Festigkeit und induzierter Schwingungen sowie durch Sicherheitsabstände, Stand: August 1976, Bekanntmachung 13. September 1976 (BAnz. 1976, Nr. 179), in: Handbuch Reaktorsicherheit und Strahlenschutz, Kap. 3.6, Stand 12/2001, 1976, [www.bfs.de/de/bfs/recht/rsh/volltext/3\\_BMU/3\\_6.pdf](http://www.bfs.de/de/bfs/recht/rsh/volltext/3_BMU/3_6.pdf).
- /BMU 15/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke, Bekanntmachung vom 3. März 2015, BAnz AT 30.02.2015 B2, [http://www.bfs.de/SharedDocs/Downloads/BfS/DE/rsh/3-bmub/3\\_0\\_1.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=6](http://www.bfs.de/SharedDocs/Downloads/BfS/DE/rsh/3-bmub/3_0_1.pdf?__blob=publicationFile&v=6).

- /BOH 90/ Bohn, M. P., J. A. Lambright: Procedures for the External Event Core Damage Frequency Analyses for NUREG-1150; NUREG/CR-4840 – SAND88-3102, Albuquerque, NM, 1990.
- /DEC 14/ Decker, K., H. Brinkman: List of external hazards to be considered in ASAMPSA\_E, ASAMPSA\_E/WP21/D21.2/2014-12, unveröffentlichtes Arbeitsmaterial, 2014.
- /DOE 97/ U.S. Department of Energy (DOE): Seismic Evaluation Procedure for Equipment in U.S. Department of Energy Facilities, DOE/EH-0545; März 1997, <http://hss.energy.gov/seismic/seismic.pdf>.
- /ENS 09/ Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI): Probabilistische Sicherheitsanalyse (PSA): Qualität und Umfang, Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen, ENSI-A05, Brugg, Januar 2009, [http://static.ensi.ch/1313043860/a-005\\_d.pdf](http://static.ensi.ch/1313043860/a-005_d.pdf).
- /EPR 03/ Electric Power Research Institute (EPRI): Seismic Probabilistic Risk Assessment Implementation Guide, EPRI 1002989, Palo Alto, CA, 2003. <http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=0000000001002989>.
- /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, <http://doris.bfs.de/jspui/handle/urn:nbn:de:0221-201011243824>.
- /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/handle/urn:nbn:de:0221-201011243838>.

- /FAK 15/ Facharbeitskreis (FAK) Probabilistische Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke: Ergänzungsband zu Methoden und Daten zur probabilistischen Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke, Entwurf vom 4.05.2015, Salzgitter, 2015.
- /FLE 05/\* Fleming, K. N.: On The Issue of Integrated Risk – A PRA Practitioners Perspective, in: Proceedings of the ANS International Topical Meeting on Probabilistic Safety Analysis, American Nuclear Society, LaGrange Park, IL, 2005, S. 11-15,  
<http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/commission/slides/2011/20110728/fleming-integrated-risk-paper.pdf>.
- /FLE 15/ Fleming, K. N.: On the risk significance of seismically induced multi-unit accidents, in: Proceedings of ANS PSA 2015 International Topical Meeting on Probabilistic Safety Assessment and Analysis, Sun Valley, ID, April 26-30, 2015, on CD-ROM, American Nuclear Society, LaGrange Park, IL, 2015,  
<http://www.bing.com/search?q=On+the+risk+significance+of+seismically+induced+multi-unit+accidents&src=IE-TopResult&FORM=IETR02&conversationid=>.
- /FRE 07/ Frey, W., von Linden J., Türschmann M.: Ergänzende Dokumentation zur Brand-PSA für das Kernkraftwerk Philippsburg, Block 1, Technischer Bericht, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, Dezember 2007.
- /FRE 10/ Frey, W. et al.: Modellierung und Quantifizierung erdbebenbedingter Ereignisabläufe, GRS-A-3549, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, Juni 2010, <http://www.grs.de/publikation/grs-A-3549>.
- /GRO 15/ Groudev, P., et al.: Methodology for Selecting Initiating Events and Hazards for Consideration in an Extended PSA, Arbeitsbericht ASAMPSA\_E/ WP30 /D30.3 / unveröffentlichtes Arbeitsmaterial, 2015.

- /GRS 90/ Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Deutsche Risikostudie, Phase B, ISBN: 3-88585-809-6, Verlag TÜV Rheinland, 1990, [http://www.grs.de/sites/default/files/pdf/Dt. Risikostudie Kernkraftwerke Phase B.pdf](http://www.grs.de/sites/default/files/pdf/Dt._Risikostudie_Kernkraftwerke_Phase_B.pdf).
- /HAK 07/ Hakata, T.; Seismic PSA method for multiple nuclear power plants in a site, Reliability Engineering & System Safety 92, 2007, S. 883-894, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832006001104>.
- /HEL 11/ Helander, J., K. Jänkälä: The Update of Seismic Probabilistic Risk Analysis for Loviisa Nuclear Power Plant, Y-tunnus 0109160-2 ALV-NRO FI01091602 Kotipaikka Espoo, 2011, <http://www.npsag.org/upload/userfiles/file/CastleMeeting2011/Papers/13%20-%20Paper.pdf>.
- /HER 12/ Herb, J.: Fault Tree Auto-Generator: How to Cope with Highly Redundant Systems”, in: 11<sup>th</sup> International Probabilistic Safety Assessment and Management Conference and the Annual European Safety and Reliability Conference 2012 (PSAM11 ESREL 2012), ISBN: 978-1-62276-436-5, Curran Associates, Inc., Red Hook, NY, 2012.
- /HIR 07/ Hirano, M., et al.: Outline of Seismic PSA Implementation, Standards of the Atomic Energy Society of Japan, in: Specialist Meeting on the Seismic Probabilistic Safety Assessment of Nuclear Facilities, Jeju Island, Republic of Korea, 6-8 November 2006, NEA/CSNI/R(2007)14, Paris, 2007, [http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=NEA/CSNI/R\(2007\)14&docLanguage=En](http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=NEA/CSNI/R(2007)14&docLanguage=En).
- /HOL 04/ Hollnagel, E.: Barriers and Accident Prevention, Burlington: Ashgate Publishing Ltd., ISBN 978-0-7546-4301-2, 2004.
- /HUA 11/ Huang, Y.-N., A. S. Whittaker, N. Luco: A probabilistic seismic risk assessment procedure for nuclear power plants: (I) Methodology Nuclear Engineering and Design, 2011, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029549311005346>.

- /IAE 02/ International Atomic Energy Agency (IAEA): External Human Induced Events in Site Evaluation for Nuclear Power Plants, Safety Guide No. SG-3.1, Wien, Mai 2002,  
[http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1126\\_scr.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1126_scr.pdf).
- /IAE 03/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Site Evaluation for Nuclear Installations, Safety Requirements No. NS-R-3, Wien, November 2003,  
[http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1177\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1177_web.pdf).
- /IAE 03a/ International Atomic Energy Agency (IAEA): External Events Excluding Earthquakes in the Design of Nuclear Power Plants, Safety Guide No, NS-G-1.5, Wien, November 2003,  
[http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1159\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1159_web.pdf).
- /IAE 03b/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Seismic Design and Qualification for Nuclear Power Plants, Safety Guide No. NS-G-1.6, Wien, November 2003,  
[http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1158\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1158_web.pdf).
- /IAE 03c/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Flood Hazard for Nuclear Power Plants on Coastal and River Sites, Safety Guide No. NS-G-3.5, Wien, Dezember 2003,  
[http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1170\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1170_web.pdf).
- /IAE 03d/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Meteorological Events in Site Evaluation for Nuclear Power Plants, Safety Guide No. NS-G-3.4, Wien, Mai 2003,  
[http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1148\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1148_web.pdf).
- /IAE 03e/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Extreme External Events in the Design and Assessment of Nuclear Power Plants, IAEA-TECDOC-1341, Wien, März 2003,  
[http://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/te\\_1341\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/te_1341_web.pdf).

- /IAE 04/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Design of Reactor Containment Systems for Nuclear Power Plants, Safety Guide No. NS-G-1.10, Wien, September 2004,  
[http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1189\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1189_web.pdf).
- /IAE 04a/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Protection against Internal Hazards other than Fire and Explosion in the Design of Nuclear Power Plants, Safety Guide No. NS-G-1.11, Wien, September 2004,  
[http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1191\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1191_web.pdf).
- /IAE 04b/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Geotechnical Aspects of Site Evaluation and Foundations for Nuclear Power Plants, Safety Guide No, NS-G-3.6, Wien, Dezember 2004,  
[http://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/pub1195\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/pub1195_web.pdf).
- /IAE 06/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Advanced nuclear plant design options to cope with external events, IAEA-TECDOC-1487, Wien, Februar 2006, [http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te\\_1487\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1487_web.pdf).
- /IAE 09/\* International Atomic Energy Agency (IAEA): Evaluation of Seismic Safety for Existing Nuclear Installations, Safety Guide No. NS-G-2.13, Wien, 2009,  
[http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1379\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1379_web.pdf).
- /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, Wien, April 2010,  
[http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1430\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1430_web.pdf).
- /IAE 10a/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations, Specific Safety Guide, IAEA Safety Standards Series No. SSG-9 (replaces NS-G-3.3), Wien, 2010,  
[http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1448\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1448_web.pdf).

- /IAE 11/\* International Atomic Energy Agency (IAEA): A Methodology to Assess the Safety Vulnerabilities of Nuclear Power Plants against Site Specific Extreme Natural Hazards, Wien, 2011,  
[http://gnssn.iaea.org/actionplan/Shared%20Documents/Action%2001%20-%20Safety%20Assessments/Methodology-to-Assess-the-Safety-Vulnerabilities\\_Nov2011.pdf](http://gnssn.iaea.org/actionplan/Shared%20Documents/Action%2001%20-%20Safety%20Assessments/Methodology-to-Assess-the-Safety-Vulnerabilities_Nov2011.pdf).
- /IAE 11a/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Meteorological and Hydrological Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations, Specific Safety Guide, IAEA Safety Standards Series No. SSG-18 (replaces NS-G-3.4 and NS-G-3.5), Wien, 2011,  
[http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1506\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1506_web.pdf).
- /IAE 12/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Safety of Nuclear Power Plants: Design, Specific Safety Requirements SSR-2/1, Wien, 2012,  
[http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1534\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1534_web.pdf).
- /IAE 12a/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Volcanic Hazards in Site Evaluation for Nuclear installations, Specific Safety Guide, IAEA Safety Standards Series No. SSG-2/1 Wien, 2012,  
[http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1552\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1552_web.pdf).
- /JON 03/ Jonczyk, J.: Methoden zur Erfassung und Eingrenzung von Anlagenteilen bei erdbebenspezifischen Ausfalleffekten und zur Quantifizierung des Ausfalls von Sicherheitsfunktionen bei seismischen Abhängigkeiten, GRS-A-3181, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, Dezember 2003.  
[http://grs-portal.grs.de/Docs/Dokumente/3000-3499%20\(2001-2007\)/GRS-A-3181.pdf](http://grs-portal.grs.de/Docs/Dokumente/3000-3499%20(2001-2007)/GRS-A-3181.pdf).
- /KAS 02/\* Kassawara, R.: Seismic Fragility Application Guide, EPRI 1002988, Final Report, Electric Power research institute (EPRI), Palo Alto, CA, Dezember 2002,  
<http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=0000000001002988>.

- /KLA 08/ Klapp, U., A. Stroh, M. K. Ravindra: Seismische PSA für GKN I, Präsentation (CD) beim TÜV-Symposium Probabilistische Sicherheitsanalysen in der Kerntechnik, Mannheim, April 2008.
- /KLU 09/\* Klügel, J.-U.: On the treatment of dependency of seismically induced component failures in Seismic PSA, SMiRT 20, Espoo, August, 2009.
- /KLU 12/ Klügel, J.-U.: Risikobeurteilung komplexer Unfallszenarien, atw 57, Jg. (2012) Heft 5, 2012,  
[http://www.kernenergie.de/kernenergie/service/fachzeitschrift-atw/hefte-themen/2012/mai/04\\_risikobeurteilung\\_komplexer\\_unfallszenarien.php](http://www.kernenergie.de/kernenergie/service/fachzeitschrift-atw/hefte-themen/2012/mai/04_risikobeurteilung_komplexer_unfallszenarien.php).
- /KLU 15/\* Klug, J., M. Kumar: Summary report of already existing guidance on the implementation of external hazards in extended L1 PSA, ASAMPSA\_E/WP22/ D22.1 / 2015-11, unveröffentlichtes Arbeitsmaterial, 2015.
- /KNO 03/ Knochenhauer, M., P. Louku: Guidance for external events analysis, SKI Report 02:27, Stockholm, Februar 2003,  
[http://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/Global/Publikationer/SKI\\_import/030516/62c5d56ad473aa9a4c1c2c13e622ded5/SKI%20Report%2002\\_27.pdf](http://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/Global/Publikationer/SKI_import/030516/62c5d56ad473aa9a4c1c2c13e622ded5/SKI%20Report%2002_27.pdf).
- /KRA 08/ Krauß, M., G. Thuma: Untersuchungen zu extremen Wetterereignissen und Witterungsbedingungen, GRS-A-3426, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln Dezember 2008,  
<http://www.grs.de/publikation/grs-A-3426>.
- /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](http://www.kta-gs.de/d/regeln/2200/2201_1_r_2011_11.pdf).

- /KTA 15/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA): Sicherheitstechnische Regel des KTA: KTA 2101, Brandschutz in Kernkraftwerken, Teil 1-3, Fassung 2015-11, November 2015,  
[http://www.kta-gs.de/d/regeln/2100/2101\\_1\\_r\\_2015\\_11.pdf](http://www.kta-gs.de/d/regeln/2100/2101_1_r_2015_11.pdf).  
[http://www.kta-gs.de/d/regeln/2100/2101\\_2\\_r\\_2015\\_11.pdf](http://www.kta-gs.de/d/regeln/2100/2101_2_r_2015_11.pdf).  
[http://www.kta-gs.de/d/regeln/2100/2101\\_3\\_r\\_2015\\_11.pdf](http://www.kta-gs.de/d/regeln/2100/2101_3_r_2015_11.pdf).
- /KUM 15/\* Kumar, M., et al.: Lessons of the Fukushima Dai-ichi accident for PSA, ASAMPSA\_E/WP30/D30.2/2015-08, unveröffentlichtes Arbeitsmaterial, 2015.
- /KUR 14/ Kuramoto, T., et al., 2014. Development of Implementation Standard Concerning the Risk Evaluation Methodology Selection for the External Hazards, in: Proceedings of 12<sup>th</sup> International Probabilistic Safety Assessment and Management Conference (PSAM12), Honolulu, HI, Juni 2014,  
[http://psam12.org/proceedings/paper/paper\\_298\\_1.pdf](http://psam12.org/proceedings/paper/paper_298_1.pdf).
- /KUZ 15/ Kuzmina, I., et al.: Insights from IAEA technical meeting on complementary safety assessment of NPP robustness against the impact of extreme events: challenges and developments, in: Proceedings of ANS PSA 2015 International Topical Meeting on Probabilistic Safety Assessment and Analysis, Sun Valley, ID, April 26-30, 2015, on CD-ROM, American Nuclear Society, LaGrange Park, IL, USA, 2015,  
<http://www.psa2015.org/Sessions/Session12-1.pdf>.
- /LIN 14/ Lin, J. C., D. J. Wakefield, J. Redington: Screening of Seismic-Induced Fires, in: Proceedings of 12<sup>th</sup> International Probabilistic Safety Assessment and Management Conference (PSAM12), Honolulu, HI, USA, Juni 2014,  
[http://psam12.org/proceedings/paper/paper\\_590\\_1.pdf](http://psam12.org/proceedings/paper/paper_590_1.pdf).
- /MAR 15/ Martinez-Guridi, G., et al.: n modeling the risk from seismically induced fires and floods, in: Proceedings of ANS PSA 2015 International Topical Meeting on Probabilistic Safety Assessment and Analysis, Sun Valley, ID, April 26-30, 2015, on CD-ROM, American Nuclear Society, LaGrange Park, IL, USA, 2015,  
<http://www.psa2015.org/Sessions/Session20-3.pdf>.

- /MAT 08/ Matsuoka, T, K. Ogura: Development of Risk Assessment Method for Fires caused by Earthquake, in: Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management (PSAM9), Hong Kong, China, 18-23 May 2008,  
[http://members3.jcom.home.ne.jp/1227779501/paper\\_339\\_1.pdf](http://members3.jcom.home.ne.jp/1227779501/paper_339_1.pdf).
- /NAR 11/ Narumiya, Yoshiyuki et al.: An impact-based approach in selecting external events for PRA at a NPP, in: 11<sup>th</sup> International Probabilistic Safety Assessment and Management Conference and the Annual European Safety and Reliability Conference 2012 (PSAM11 ESREL 2012), ISBN: 978-1-62276-436-5, Curran Associates, Inc., Red Hook, NY, 2012.
- /NRC 91/ U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC): Procedural and Submittal Guidance for the Individual Plant Examination of External Events (IPEEE) for Severe Accident Vulnerabilities, NUREG-1407, Washington, DC, 1991,  
<http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0635/ML063550238.pdf>.
- /NRC 08/ U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC): Risk Assessment of Operational Events Handbook, Vol. 2 – External Events, Revision 1.01, Januar 2008, <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0803/ML080300179.pdf>.
- /NRC 12/ U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC): Guidance for Performing a Tsunami, Surge, or Seiche Hazard Assessment. JLD-ISG 2012-06, Oktober 2012.
- /PAR 98/ Park, Y. J., et al. : Survey of seismic fragilities used in PRA studies of NPP, Nuclear Engineering and Design 62, 1998, S. 185-195.
- /PEL 11/\* Pellissetti, M., U. Klapp: Erfassung von abhängigen erdbebenbedingten Ausfällen in Fehlerbaummodellen der seismischen PSA, Präsentation (CD) beim TÜV-Symposium Probabilistische Sicherheitsanalysen in der Kerntechnik, Mannheim, Mai 2011.
- /PIH 14/ Pihl, J., et al.: Synthesis of the initial survey related to PSAs End-Users needs, ASAMPSA\_E/ WP10 / D10.2 / 2014-01, unveröffentlichtes Arbeitsmaterial, 2014.

- /PIL 15/ Piljugin, E., J. Herb: Weiterentwicklung der FMEA-Methodik für Überflutungsszenarien, GRS-A-3780, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Garching/Köln, März 2015.
- /PLG 83/ Pickard Lowe And Garrick Inc. (PLG): Seabrook Station Probabilistic Safety Assessment –Section 13.3 Risk of Two Unit Station, Prepared for Public Service Company of New Hampshire, PLG-0300, 1983.
- /REE 85/ Reed, J. W., et al.: Analytical Techniques for Performing Probabilistic Seismic Risk assessment of Nuclear Power Plants, ICOSSAR 85, Kobe, May 1985.
- /RSK 81/ Reaktorsicherheitskommission des BMU (RSK): RSK-Leitlinien für Druckwasserreaktoren, 3. Ausgabe v. 14. Oktober 1981, BAnz Nr. 69a, 1982.
- /SAU 14/ Saunders, M. B., E. T. Burns: Characterizing Fire PRA Quantitative Models: An Evaluation of the Implications of Fire PRA Conservatism, in: Proceedings of 12<sup>th</sup> International Probabilistic Safety Assessment and Management Conference (PSAM12), Honolulu, HI, Juni 2014.
- /SCH 13/\* Schroer, S., M. Modarres: An event classification schema for evaluating site risk in a multi-unit nuclear power plant probabilistic risk assessment, Reliability Engineering and System Safety 117, 2013, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832013000756>.
- /SEE 12/ Seewald, J.: Erstellung eines vereinfachten Verfahrens zur Bestimmung des Erdbebenrisikos von Kernkraftwerken, Diplomarbeit, Bochum, März 2012.
- /SOE 14/\* Sörman, J., et al.: Method for Analysing Extreme Events, in: Proceedings of 12<sup>th</sup> International Probabilistic Safety Assessment and Management Conference (PSAM12), Honolulu, HI, USA, Juni 2014.
- /SPE 13/ Sperbeck, S. T., M. Tüschmann: How to construct a seismic risk model? Kerntechnik 78 (2013) Nr. 2, 2013, <http://www.hanser-elibrary.com/doi/abs/10.3139/124.110333>.

- /TEO 15/ Teolis, D. S., et al.: Screening of external hazards per part 6 of the PRA Standard for the AP1000 Plant, in: Proceedings of ANS PSA 2015 International Topical Meeting on Probabilistic Safety Assessment and Analysis, Sun Valley, ID, April 26-30, 2015, on CD-ROM, American Nuclear Society, LaGrange Park, IL, 2015,  
[http://www.psa2015.org/Presentations/Session\\_28-1\\_\(Paper\\_12169\)\\_Teolis,\\_et\\_al.pdf](http://www.psa2015.org/Presentations/Session_28-1_(Paper_12169)_Teolis,_et_al.pdf).
- /TUE 10/ Türschmann, M., et. al.: Verfahren zur Klassifizierung von Bauwerken, Systemen und Komponenten in Hinblick auf ihre sicherheitstechnische Bedeutung bei seismischen Einwirkungen, GRS-A-3472, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, Juni 2010,  
<http://www.grs.de/publikation/grs-A-3472>.
- /TUE 13/ Türschmann, M., S. T. Sperbeck: Quantification of Seismic Risk – Modeling of Dependencies, in: Proceedings of PSAM Topical Conference “In the light of the Fukushima Dai-ichi Accident”, 14.-18. April 2013, Tokyo, Japan, April 2013.
- /TUE 14/ Türschmann, M., S. Sperbeck, G. Thuma: Recent Research on Natural Hazards PSA in Germany and Future Needs, in: 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): Probabilistic Safety Assessment (PSA) of Natural External Hazards Including Earthquakes, Workshop Proceedings, 17-20 June 2014, Prague, Republic, NEA/CSNI/R(2014)9, Paris, 2014,  
<https://www.oecd-nea.org/nsd/docs/2014/csni-r2014-9.pdf>.
- /TUE 15/ Türschmann, M., H. Holtschmidt, M. Röwekamp: Recent Research on Hazards PSA, IEM8 - International Experts' Meeting on Strengthening Research and Development Effectiveness in the Light of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, IAEA, Wien, 16 – 20 Februar 2015.

- /TUE 15a/ Türschmann, M., M. Röwekamp, S. Babst: Concept for Comprehensive Hazards PSA and Fire PSA Application, Progress in Nuclear Energy, 2015, <http://dx.doi.org/10.1016/j.pnucene.2015.03.21>,  
<http://www.sciencedirect.com/science/journal/aip/01491970>.
- /TUE 15b/ Türschmann, M. et al: Conducting Fire PSA for the Post-commercial Shut-down Phase, in: 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>.
- /TUE 15c/ Türschmann; M., et al.: Aufstellung, Quantifizierung und Auswertung von Brand-Ereignisabläufen, GRS-A-3837, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln, November 2015.
- /MIT 13/ Vitazkova, J., E. Cazzoli: Common risk target for severe accidents of nuclear power plants based on IAEA INES scale, Nuclear Engineering and Design 262, 2013, S. 106-125,.  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029549313002136>.
- /VOS 08/ Vose, D.: Risk Analysis – A quantitative guide, John Wiley & Sons, ISBN: 978-0-470-51284-5, March 2008.
- /WAT 03/ Watanabe, Y., T. Oikawa, K. Muramatsu: Development of the DQFM method to consider the effect of correlation of component failures in seismic PSA of nuclear power plant, Reliability Engineering System Safety 79, 2003, S. 265-279,  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832002000534>.
- /WEN 13/ WENRA Reactor Harmonization Working Group (RHWG): Safety of new NPP designs, März 2013,  
[http://www.wenra.org/media/filer\\_public/2013/04/30/rhwg\\_safety\\_of\\_new\\_npp\\_designs.pdf](http://www.wenra.org/media/filer_public/2013/04/30/rhwg_safety_of_new_npp_designs.pdf).

/ZEN 10/ Zentner, I.: Numerical computation of fragility curves for NPP equipment, Nuclear Engineering and Design 240, 2010.

/ZHA 01/ Zhang, T., W. Long, Y. Sato: Analysis of Nuclear Power Plants Involving Failure-Correlation of Subsystems caused by Earthquake, Transactions of SMiRT 16, Washington, DC, August 2001.



## 7      **Abbildungsverzeichnis**

Abb. 2.1	Durchführung einer standortspezifischen HPSA unter Berücksichtigung von Abhängigkeiten	13
Abb. 2.2	Klassifikation der übergreifenden Einwirkungen aus der Liste $L_{ges}$	13
Abb. 2.3	Unterteilung übergreifender Einwirkungen	22
Abb. 2.4	Ableitung der Liste $L_{ges}$ aller standortspezifischen übergreifenden Einwirkungen	54
Abb. 2.5	Berücksichtigung von mehreren auslösenden Ereignissen (Fortsetzung für den Notstromfall siehe Abb. 2.6)	66
Abb. 2.6	Ereignisablauf seismisch bedingter Notstromfall (Fortsetzung von Abb. 2.5)	66
Abb. 2.7	Bereitstellung der Listen $H$ -EL und $H$ -DL (allgemein)	73
Abb. 2.8	Modellerweiterung der Basis-PSA	77
Abb. 2.9	Nutzung von Ausrüstungs- und Abhängigkeitslisten zur Fehlerbaumerweiterung um brandbedingte Ausfälle	87
Abb. 2.10	Bestimmung der Kernschadenshäufigkeit durch biologische Phänomene (siehe auch die Erläuterungen in Tab. 2.16 zu den markierten Arbeitspunkten)	93
Abb. 3.1	Durchführung von Fehlerbaumanalysen	101
Abb. 3.2	Fehlerbaumerweiterung bei Abhängigkeiten	103
Abb. 3.3	Fehlerbaumerweiterung bei Abhängigkeiten (Fortsetzung zu Abb. 3.2)	104
Abb. 3.4	GVA-Modellierung und Kopplungsmodell	105
Abb. 3.5	Fehlerbaumeinbindung $\beta$ -Faktor-Methode	107
Abb. 4.1	Datenblatt zur Veranschaulichung von Fragility-Kurven (Erläuterungen)	132

Abb. 4.2	Ausgabedatenblatt zur Veranschaulichung von Fragility-Kurven	133
Abb. 4.3	Berechnung der integralen erdbebenbedingten Schadenshäufigkeit pro Jahr	134
Abb. 4.4	Datenbank <DB SPSA>	135
Abb. 4.5	Dateneingabe direkt in die Tabelle <tb/Verswahr> der Datenbank <DB SPSA>	140
Abb. 4.6	Dateneingabe über ein Datenbankformular der Datenbank <DB SPSA> (Eingabe blaue Felder)	141
Abb. 4.7	Nutzung der Tabelle erdbebenbedingter Versagenswahrscheinlichkeiten	142
Abb. 4.8	Klassifikation von BSK nach ihrer sicherheitstechnischen Bedeutung	145

## 8 Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Standorte von Kernkraftwerken mit großer Blockzahl	17
Tab. 2.2	Gruppe A 'seismotektonische Einwirkungen	24
Tab. 2.3	Gruppe B 'Hochwasser und hydrologische Einwirkungen'	25
Tab. 2.4	Gruppe C 'meteorologische Einwirkungen'	27
Tab. 2.5	Gruppe D 'extraterrestrische Einwirkungen'	31
Tab. 2.6	Gruppe E 'biologische Einwirkungen einschließlich Befall'	31
Tab. 2.7	Gruppe F 'geologische Einwirkungen'	32
Tab. 2.8	Gruppe H 'naturbedingter Brand'	34
Tab. 2.9	Gruppe Z 'zivilisatorische Einwirkungen'	34
Tab. 2.10	Auflistung der Einwirkungen von innen	38
Tab. 2.11	Beispiel für eine Ereignismatrix anhand der EVA-Liste aus dem PSA-Methodenband /FAK 05/	45
Tab. 2.12	Standortspezifische Klassifikation des übergreifenden Ereignisses Flugzeugabsturz	59
Tab. 2.13	Standortspezifische Klassifikation des übergreifenden Ereignisses Explosionsdruckwelle	61
Tab. 2.14	Standortspezifische Klassifikation des übergreifenden Ereignisses Hochwasser	61
Tab. 2.15	Standortspezifische Klassifikation des übergreifenden Ereignisses Erdbeben	62
Tab. 2.16	Bestimmung der Kernschadenshäufigkeit durch biologische Phänomene (Erläuterungen zu Abb. 2.10)	94
Tab. 3.1	Ausfälle von BSK bei seismischen Einwirkungen (ohne Verteilungsannahme)	111

Tab. 3.2	Ausfälle von BSK bei seismischen Einwirkungen (mit Verteilungsannahme)	113
Tab. 3.3	Schrittweises Vorgehen zur Erweiterung des seismischen Anlagenmodells um brandbedingte Ausfälle	116
Tab. 3.4	BSK als Zündquellen mit Brandlasten	121
Tab. 3.5	Seismische Brandkapazitäten für ausgewählte BSK nach /MAT 08/	127
Tab. 4.1	Struktur der Tabelle <tb/Verswahr> der Datenbank <DB SPSA>	137
Tab. 4.2	Bisher ausgewertete Literaturstellen mit Fragility-Angaben	138
Tab. 4.3	BSK-Kategorien in der Fragility-Tabelle	140
Tab. 4.4	Auszug aus der Tabelle <tb/Verswahr> der Datenbank <DB SPSA>	143
Tab. 4.5	Schwellenwerte zur BSK-Bewertung	144
Tab. 9.1	Glossar	169
Tab. 9.2	Europäische Makroseismische Skala	179

## 9 Abkürzungen und Begriffe

Im nachfolgenden Glossar sind Definitionen zu den im Bericht verwendeten Begrifflichkeiten angegeben sowie Abkürzungen und häufig gebrauchte Symbole erläutert.

**Tab. 9.1** Glossar

<b>Begriff, Bezeichnung, Abkürzung</b>	<b>Erläuterungen und Verweise</b>
A	<p>Beschreibungsgröße einer Abhängigkeit <math>\rightarrow D</math> im zugehörigen <math>\rightarrow</math> Abhängigkeitsmodell <math>\{M, A, C\}</math>.  <math>A</math> ist die Ausfallursache bei Abhängigkeit.            Die Wirksamkeit der Ausfallursache kann in der Mehrzahl der Fälle durch eine Funktion <math>W_A</math> (Wirksamkeitsfunktion von <math>A</math>) beschrieben werden. Diese Funktion beschreibt, mit welcher Wahrscheinlichkeit die Ausfallursache wirksam wird.            In Kap. 3.1.3 ist eine Reihe von Beispielen gegeben.</p>
AE	<p>Auslösendes Ereignis, siehe <math>\rightarrow</math> „Ereignis, auslösendes“            Ein Ereignis wird als auslösendes Ereignis bezeichnet, wenn ein Schadenszustand nur durch die Einleitung von Maßnahmen verhindert werden kann, die nicht zum Normalbetrieb der Anlage gehören.</p>
Abhängigkeitsmodell $\{M, A, C\}$	<p>Jede Art Abhängigkeit <math>\rightarrow D</math> wird mit einem Abhängigkeitsmodell <math>\{M, A, C\}</math> beschrieben.  <math>\rightarrow M</math> ist eine Menge von BSK, deren Ausfallverhalten abhängig ist.  <math>\rightarrow A</math> ist die Ausfallursache bei Abhängigkeit.  <math>\rightarrow C</math> beschreibt die tatsächliche Wirkung der Abhängigkeit.            In Kap. 3.1.3 ist eine Reihe von Beispielen gegeben.</p>
Antwortspektrum, Freifeld	<p>Intensitäten können nicht als Eingangsgrößen für strukturdynamische Berechnungen oder in Fehlerbaumanalysen verwendet werden. Hierfür werden vielmehr Antwortspektren der Bodenbewegung am Standort, so genannte Freifeldantwortspektren, benötigt. Üblicherweise werden Spektren der Bodenbeschleunigung in horizontaler Richtung verwendet. Für vereinfachte quasistatische Analysen kommt ferner der maximalen Freifeldbeschleunigung (auch: Starrkörperbeschleunigung, Nullperiodenbeschleunigung, Peak Ground Acceleration PGA, Zero Periodic Acceleration ZPA) eine herausragende Bedeutung zu. Diese kann im Freifeldantwortspektrum durch den (<math>\rightarrow</math>) Einhängewert (Periode <math>T \rightarrow 0</math> bzw. Frequenz <math>f \rightarrow \infty</math>) abgelesen werden.</p>
ASAMPSA_E	<p>Vorhaben im internationalem Rahmen (Teilnahme ca. 25 Organisationen aus mehr als 10 Ländern) zur Methodik der Durchführung einer <math>\rightarrow</math> Erweiterten PSA</p>

<b>Begriff, Bezeichnung, Abkürzung</b>	<b>Erläuterungen und Verweise</b>
Auswahlverfahren	Verfahren zur Auswahl derjenigen BSK, die auf Grund einer gegebenen übergreifenden Auswirkung ausfallen können.
B	Seismisch bedingte Beschleunigung am Fußpunkt einer BSK (im Bericht meist mit Maßeinheit $\rightarrow$ g)
$B_{0,50}$	Median von $\rightarrow F(B)$ ; bei einem Erdbeben mit einer maximalen horizontalen Beschleunigung $B_{0,50}$ beträgt die Versagenswahrscheinlichkeit der entsprechenden BSK 0,5
Basisereignis	Die kleinsten Einheiten im $\rightarrow$ PSA-Modell werden Basisereignisse genannt. Diese Ereignisse werden nicht weiter ausgeführt, der angemessene Detaillierungsgrad im Rahmen der Analysebedingungen ist erreicht. Bei PSA der Stufe 1 für interne Ereignisse beschreiben Basisereignisse meist den Ausfall einer speziellen Funktion technischer Komponenten. In solchen Fällen werden durch das Basisereignis der Komponentenumfang (Welche Bauteile gehören zur Komponente, welche nicht? Wo sind die Komponentengrenzen?), die komponentenbezogene Ausfallart und die zur Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit benötigten Zuverlässigkeitsparameter (Wie wird die Komponente eingesetzt? Art des Betriebs- und Wartungsregimes) beschrieben.
Basis-PSA	Die Basis-PSA ist eine begutachtete PSA der Stufe 1 für interne auslösende Ereignisse und dient als Ausgangspunkt der Durchführung einer $\rightarrow$ HPSA oder einer $\rightarrow$ H-PSA.
Bemessungserdbeben	Das Bemessungserdbeben ist das für die Auslegung gegen seismische Einwirkungen maßgebende Erdbeben. Auf der Grundlage des Bemessungserdbebens werden die ingenieurseismologischen Kenngrößen festgelegt. Unter Bemessungserdbeben können auch mehrere maßgebliche Beben oder die für die Auslegung maßgeblichen Bodenbewegungen am Standort der Anlage verstanden werden. /KTA 11/.
Bemessungsspektrum	Antwortspektrum, das der Erdbebenauslegung für das $\rightarrow$ Bemessungserdbeben zugrunde gelegt wird. (siehe auch $\rightarrow$ Bemessungsspektrum, $\rightarrow$ RRS)
$B_{HCLPF}$	$B_{HCLPF}$ ist die Beschleunigung, bei der es mit hohem Vertrauensgrad (95%) sehr unwahrscheinlich ist (0,05), dass die entsprechende BSK versagt.

Begriff, Bezeichnung, Abkürzung	Erläuterungen und Verweise
BSK	<p>BSK ist ein Sammelbegriff für alle Einrichtungen in einem Kernkraftwerk.</p> <p>Die Abkürzung wurde aus „<u>B</u>auwerke/bauliche Strukturen, <u>S</u>ysteme, <u>K</u>omponenten“ gebildet.</p> <p>In einer S-PSA z. B. muss nicht nur der Ausfall von aktiven Betriebs- und Sicherheitskomponenten betrachtet, sondern auch die Möglichkeit der Zerstörung von passiven Einrichtungen und deren Auswirkungen bewertet werden. Deshalb wird bei SPSA von BSK als umfassende Betrachtungseinheit gesprochen.</p> <p>BSK entspricht in der englischsprachigen Fachliteratur → SSC (structures, systems, components).</p>
BSK, <i>H</i> -relevant	<p>Eine → BSK wird <i>H</i>-relevant genannt, wenn in Bezug auf eine übergreifende Einwirkung <i>H</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– der Ausfall der BSK zur Entstehung eines auslösenden Ereignisses beiträgt</li> <li>oder</li> <li>– die BSK Teil eines Sicherheitssystems ist oder</li> <li>– der Ausfall der BSK eine oder mehrere BSK von Sicherheitssystemen zum Ausfall bringen kann.</li> </ul>
C	<p>Beschreibungsgröße einer Abhängigkeit → <i>D</i> im zugehörigen Abhängigkeitsmodell.</p> <p><i>C</i> beschreibt die tatsächliche Wirkung der Abhängigkeit, wenn die Ausfallursache <i>A</i> mit <math>W_A</math> zur Wirkung kommt.</p> <p>Für jede Teilmenge von <i>M</i> ist die bedingte gemeinsame Ausfallwahrscheinlichkeit gegeben.</p> <p>In Kap. 3.1.3 ist eine Reihe von Beispielen gegeben.</p>
capacity, (strength)	<p>Kapazität einer Komponente bei seismischer Beanspruchung; auch: Beanspruchbarkeit, Belastbarkeit, Leistungsfähigkeit</p>
CCI	<p>common cause initiator (eine geeignete und gängige Übersetzung ist nicht bekannt)</p> <p>Ein CCI ist ein Ereignis, das sowohl ein → AE verursacht als auch Systemfunktionen, die zu seiner Beherrschung benötigt werden, beschädigt.</p>
CDF	<p>Kernschadenshäufigkeit (Abkürzung aus dem englischen core damage frequency), meist bezogen auf ein Reaktorjahr, Maßeinheit [1/a]</p>
CDP	<p>(bedingte) Kernschadenswahrscheinlichkeit (Abkürzung aus dem Englischen - core damage probability), Wahrscheinlichkeit eines Kernschadens für ein gegebenes auslösendes Ereignis →AE</p>

<b>Begriff, Bezeichnung, Abkürzung</b>	<b>Erläuterungen und Verweise</b>
Cliff Edge Effect	Ein „cliff edge effect“ ist ein Fall von schwerem, anormalem Anlagenverhalten durch einen plötzlichen Übergang von einem Anlagenzustand in einen anderen auf Grund einer kleinen Parameteränderung. Eine kleine, minimale Änderung eines Anlagenparameters bewirkt eine große Änderung im Anlagenverhalten.
<i>D</i>	<i>D</i> steht für eine Abhängigkeit im Ausfallverhalten von ein oder mehreren → BSK. Jede Abhängigkeit <i>D</i> wird mit einem → Abhängigkeitsmodell beschrieben.
Einhängewert	Oberhalb einer Frequenz (> 20 Hz) ändert sich die Bodenbeschleunigung eines Erdbebens nicht mehr. Diese ab einer gewissen Frequenz konstante Beschleunigung wird Einhängewert genannt.
Einwirkung (Hazard)	Auf Einrichtungen einwirkende Kraft- und Verformungsgrößen oder Medien mit physikalischem, chemischem oder biologischem Einfluss oder eine Kombination derselben /BMU 15/.
Einwirkung, naturbedingte	Einwirkung, die durch Naturereignisse von außerhalb des Anlagengeländes hervorgerufen werden /BMU 15/.
Einwirkung, zivilisatorische	Einwirkung, die durch zivilisatorische Einflüsse außerhalb des Anlagengeländes hervorgerufen werden, einschließlich der Notstandsfälle /BMU 15/.
Ereignis, einleitendes	Störungen und Schäden an Komponenten und Anlagenteilen, die sich auf Grund der Anlagendynamik oder auf Grund von weiteren Störungen zu einem → auslösenden Ereignis entwickeln können /FAK 05/
Ereignis, auslösendes	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. /FAK 05/ (siehe auch → AE)

<b>Begriff, Bezeichnung, Abkürzung</b>	<b>Erläuterungen und Verweise</b>
Erweiterte PSA (Extended PSA)	<p>Eine Erweiterte → PSA wird für einen Standort mit einem oder mehreren Kernkraftwerksblöcken mit dem Ziel durchgeführt, das Risiko bezüglich aller Quellen von Radioaktivität abzuschätzen. Dabei werden für jede Quelle der Radioaktivität alle Betriebszustände und alle auslösenden Ereignisse und übergreifenden Einwirkungen von innen und außen einbezogen. (Definition sinngemäß aus /PIH 14/)</p> <p>Eine → HPSA ist ein Teil einer Erweiterten PSA. Es geht dabei nur um Brennstoffschäden (PSA Stufe 1) als Risikomaß. Im vorliegenden Bericht werden im wesentlichen Standorte mit einem Kraftwerksblock betrachtet. Zur Behandlung von Mehrblockstandorten, siehe die Anmerkungen in Kap. 2.1.4</p>
EVA	Übergreifende Einwirkung von außen
EVI	<p>Übergreifende Einwirkung von innen Eine Einwirkung heißt übergreifende Einwirkung von innen, wenn die Ursache der Einwirkung innerhalb des Anlagen- geländes (Grenze Anlagenzaun) zu finden ist.</p>
$F_{0.50}$	Median der Versagenswahrscheinlichkeit → F(B)
F(B)	Mittlere seismische Versagenskurve, siehe → F(B,Q)
F(B,Q), $F_{BSK}(B,Q)$	<p>Versagenswahrscheinlichkeit (→ Fragility) einer BSK bei gegebenem seismischen Parameter → B mit Vertrauensgrad Q; Manchmal wird statt F(B,Q) auch <math>F_{BSK}(B,Q)</math> genutzt, um die zugehörige BSK zu bezeichnen. Ist kein Vertrauensgrad Q angegeben, bezeichnet F(B) die mittlere Versagenskurve (siehe Formel 4.2)</p>
$F_{BRAND}(Raum,B)$	<p>brandbedingte Versagenswahrscheinlichkeit (→ Fragility) eines Raums bei gegebenem seismischen Parameter → B; <math>F_{BRAND}(Raum,B)</math> ergibt sich aus dem Produkt von bedingter Brandeintrittswahrscheinlichkeit im Raum und Wahrscheinlichkeit des Ausfalls aller Löschmaßnahmen. → Raumversagen</p>
F-EL	Ausrüstungsliste zur EVA Überflutung, F steht für flooding (siehe auch → H-PSA)

<b>Begriff, Bezeichnung, Abkürzung</b>	<b>Erläuterungen und Verweise</b>
Fragility	<p>Versagenswahrscheinlichkeit <math>F</math> einer <math>\rightarrow</math> BSK im Fall einer übergreifenden Einwirkungen</p> <p>Die Fragility einer BSK ist oft abhängig von der Intensität der übergreifenden Einwirkung, deshalb wird auch von einer Fragility-Funktion gesprochen.</p> <p>Speziell wird der Begriff Fragility beim erbebenbedingten Versagen einer BSK genutzt. Die seismische Fragility einer BSK ist abhängig von der Stärke des Bebens, hier meist angegeben in <math>\rightarrow</math> <math>B</math>, und dem Vertrauensgrad <math>Q</math>, siehe auch <math>\rightarrow</math> <math>F(B,Q)</math>. Mit <math>\rightarrow</math> <math>F(B)</math> wird die mittlere Versagenskurve bezeichnet (siehe Formel 4.2).</p>
Freifeldbeschleunigung, maximale $B_{\max}$	<p>Bezeichnet die an einem Standort aufgetretene maximale Freifeldbeschleunigung bei einem Erdbeben (auch: Starrkörperbeschleunigung, Nullperiodenbeschleunigung, Peak Ground Acceleration PGA, Zero Periodic Acceleration ZPA)</p>
g	Maßeinheit der Erdbeschleunigung, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
GVA	<p>gemeinsam verursachter Ausfall</p> <p>Begriff aus PSA der Stufe 1 für gleichzeitige (oder nahezu gleichzeitige) Ausfälle mehrerer Komponenten auf Grund einer (meist nicht spezifizierten) Ursache.</p>
$H$	<p><math>H</math> steht als Abkürzung für <math>\rightarrow</math> Hazard, d. h. für eine beliebige <math>\rightarrow</math> übergreifende Einwirkung (verwendet z. B. in <math>\rightarrow</math> <math>H</math>-EL oder <math>\rightarrow</math> <math>H</math>-DL)</p>
Hazard	$\rightarrow$ übergreifende Einwirkung
Hazards PSA	$\rightarrow$ HPSA
$H$ -EL	<p>Hazard Equipment List (Ausrüstungsliste bezogen auf die übergreifende Einwirkung <math>H</math>)</p> <p><math>H</math>-EL enthält alle BSK, die <math>H</math>-bedingt ausfallen können und dadurch einen Beitrag zur Schadenshäufigkeit liefern.</p> <p><math>H</math>-EL wird in einem umfassenden Auswahlprozess unter Einbeziehung von Anlagenbegehungen abgeleitet.</p>
$H$ -DL	<p>Hazard Dependency List (Abhängigkeitsliste bezogen auf die übergreifende Einwirkung <math>H</math>)</p> <p><math>H</math>-DL enthält alle Abhängigkeiten, die bei <math>H</math>-bedingten Ausfällen von BSK zu berücksichtigen sind.</p> <p>Die Abhängigkeiten werden mit dem <math>\rightarrow</math> Abhängigkeitsmodell beschrieben.</p> <p><math>H</math>-DL wird in einem umfassenden Auswahlprozess unter Einbeziehung von Anlagenbegehungen zusammengestellt.</p>
$H(B)$	<p>Funktion der standortspezifischen seismischen Überschreitenshäufigkeiten in Abhängigkeit von der Beschleunigung <math>\rightarrow</math> <math>B</math></p> <p>auch: seismic hazard curve</p>

Begriff, Bezeichnung, Abkürzung	Erläuterungen und Verweise
HCLPF	HCLPF (High Confidence Low Probability of Failure) Der HCLPF-Wert einer → BSK gibt die Beschleunigung → B an, bei der es mit hohem Vertrauensgrad (0,95) sehr unwahrscheinlich ( $\leq 0,05$ ) ist, dass die BSK versagt. Umso größer der HCLPF-Wert, desto robuster die BSK gegenüber Erdbeben.
Hochwasser, Überschwemmung	Als Überschwemmung wird eine Ansammlung größerer Wassermengen auf Geländeoberflächen als Folge von extremem Hochwasser, Deichbruch, extremen Niederschlägen, extremer Schneeschmelze o. ä. definiert.
HPSA	HPSA steht für: Hazards PSA Eine HPSA ist eine standortspezifische → PSA der Stufe 1 für ein vorab festgelegtes Risikomaß der Stufe 1 (Brennstoffschaden) unter Einbeziehung aller EVI/EVA und deren Kombinationen. Weitere Bezeichnungen: EVI/EVA-PSA, PSA für übergreifende Einwirkungen von innen und außen, standortbezogene PSA, → Erweiterte PSA
<i>H</i> -PSA	<i>H</i> -PSA steht für eine PSA in Bezug auf die übergreifende Einwirkung <i>H</i> , z. B. → <i>S</i> -PSA für Seismische PSA und <i>F</i> -PSA für Brand-PSA ( <i>F</i> steht dabei für Fire). <i>H</i> als Variable wird vor allem bei Ausrüstungs- und Abhängigkeitslisten → <i>H</i> -EL, → <i>H</i> -DL verwendet.
HW	Hochwasser
Integrität	Integrität bezeichnet das Vermögen druckbelasteter BSK, den spezifizierten Belastungen bezüglich Eintrittshäufigkeit und Belastungszeit in sicherheitstechnisch zulässiger Weise standzuhalten. Die Forderung nach Integrität schließt → Standsicherheit ein.
IPEEE	Individual Plant Examination of External Events
KSH	Kernschadenshäufigkeit
LER	Licensee event report
<b><i>L</i><sub>gen</sub></b>	kommentierte umfassende generische Liste übergreifender Einwirkungen. <b><i>L</i><sub>gen</sub></b> umfasst Auswertungen der internationalen Betriebserfahrung und Erkenntnisse aus der internationalen Fachliteratur. <b><i>L</i><sub>gen</sub></b> enthält sowohl einzelne übergreifende Einwirkungen als auch Einwirkungskombinationen. <b><i>L</i><sub>gen</sub></b> wird ständig aktualisiert.

<b>Begriff, Bezeichnung, Abkürzung</b>	<b>Erläuterungen und Verweise</b>
$L_{ges}$	Umfassende Liste standortspezifisch möglicher übergreifender Eiwirkungen $L_{ges}$ ist die Vereinigung der Listen $L_0$ , $L_{grob}$ und $L_{Detail}$ .
$L_0$	Teilmenge von $L_{ges}$ $L_0$ enthält alle übergreifenden Einwirkungen aus $L_{ges}$ mit vernachlässigbarem bedingtem Risiko.
$L_{grob}$	Teilmenge von $L_{ges}$ $L_{grob}$ enthält alle übergreifenden Einwirkungen aus $L_{ges}$ für die eine grobe Abschätzung des bedingten Risikos ausreichend ist.
$L_{Detail}$	Teilmenge von $L_{ges}$ $L_{Detail}$ enthält alle übergreifenden Einwirkungen aus $L_{ges}$ für die zur Abschätzung des bedingten Risikos eine vollständige probabilistische Analyse durchgeführt werden muss.
$M$	Beschreibungsgröße einer Abhängigkeit $\rightarrow D$ im zugehörigen Abhängigkeitsmodell. Abhängigkeitsmenge $M = \{BSK_1, BSK_2, \dots, BSK_n\}$ ist eine Menge von BSK vom Umfang $n$ .
Maßeinheit g	Erdbeschleunigung, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
Notstandsfall	Ereignisablauf infolge sehr seltener zivilisatorisch bedingter Einwirkungen von außen oder infolge der postulierten vollständigen Unverfügbarkeit der Warte
NRC	Nuclear Regulatory Commission
NW	Niedrigwasser
PGA	peak ground acceleration, maximale Freifeldbeschleunigung
PSA	Probabilistische Sicherheitsanalyse, siehe auch: → Basis-PSA, → Erweiterte PSA, → HPSA, → H-PSA, → PSA-Modell
psi	Maßeinheit (pound-force per square inch)

<b>Begriff, Bezeichnung, Abkürzung</b>	<b>Erläuterungen und Verweise</b>
PSA-Modell	Ein PSA-Modell der Stufe 1 umfasst die Menge der relevanten auslösenden Ereignisse mit den zugehörigen Eintrittshäufigkeiten. Die möglichen Ereignisverläufe sind mit Ereignisbäumen beschrieben. Die Ereignisbaumverzweigungen entstehen durch die Frage nach der Wirksamkeit von Sicherheitsfunktionen. Die Verzweigungswahrscheinlichkeiten können mit der Fehlerbaummethode berechnet werden. Die Menge der Ereignis- und Fehlerbäume bildet das sogenannte PSA-Modell. Die kleinsten Einheiten im PSA-Modell heißen → Basisereignisse.
Raumversagen	Man spricht von einem Raumversagen, wenn alle BSK eines Raums auf Grund einer übergreifenden Einwirkung ausgefallen sind (siehe z. B. brandbedingte Versagenswahrscheinlichkeit → $F_{\text{BRAND}}(\text{Raum}, B)$ eines Raums).
response	Belastung einer BSK durch eine seismische Einwirkung, auch: Beanspruchung
RLE	review level earthquake
S-AL SAL	seismische Ausrüstungsliste (engl. → S-EL) Ausgangspunkt für das → Auswahlverfahren ist eine umfassende Liste von BSK, deren Fehlfunktion bei seismischer Einwirkung einen Beitrag zur Häufigkeit der Gefährdungszustände liefern kann.
SCDF	Seismisch bedingte Kernschadenshäufigkeit (aus dem englischen: seismic → CDF), oft auch SCDF(B)
SCDP(B)	Kernschadenswahrscheinlichkeit bei einem angenommenen Erdbeben mit Beschleunigung → B
S-EL SEL	Seismic Equipment List (siehe → S-AL)
Sicherheitsreservefaktor	Der Sicherheitsreservefaktor $SR$ für eine → BSK ist definiert als das Verhältnis des Medians der maximalen horizontalen Freifeldbeschleunigung $B_{0,50}$ zum Wert der Beschleunigung des → Bemessungserdbebens $B_{\text{BEB}}$ .
SEWD	Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter
SMA	Seismic Margin Assessment (Methode zur Einschätzung seismischer Sicherheitsreserven)
S-PSA	seismische PSA, Erdbeben PSA
SR	→ Sicherheitsreservefaktor

<b>Begriff, Bezeichnung, Abkürzung</b>	<b>Erläuterungen und Verweise</b>
SRR	seismisch relevanter Raum Enthält ein Raum mindestens eine Komponente, die zum sicheren Abfahren benötigt wird oder mindestens eine Komponente, deren Ausfall zu einem störfallauslösenden Ereignis beitragen kann, dann wird der Raum seismisch relevant genannt. Alle SRR sind im Rahmen des → Auswahlverfahrens für SPSA zu begehen.
SRBR	Seismisch relevanter Brandraum Ein Raum wird SRBR genannt, wenn er eine BSK enthält, die auf Grund seismischer Einwirkungen zum Brandherd werden kann.
SSC	Structures, Systems and Components (siehe → BSK)
Standicherheit	Unter Standicherheit wird in einer → SPSA die Sicherheit gegen unzulässige Veränderung der Lage und des Aufstellungsortes einer → BSK verstanden (z. B. Umstürzen, Abstürzen, unzulässiges Verrutschen, Abreißen von Teilen). Standicherheit schließt die erforderliche Festigkeit und Stabilität von Stützkonstruktionen ein.
Übergreifende Einwirkung	Unter einer übergreifenden Einwirkung (auch → Hazard) wird ein einleitendes Ereignis verstanden, das zum Eintritt von auslösenden Ereignissen oder zum Ausfall von Sicherheitsfunktionen führen kann. Die Einwirkung heißt übergreifend, weil sie das Potential für redundanz-übergreifende Ausfälle hat oder seine Wirkungsmechanismen die gesamte Anlage betreffen können. Es werden übergreifende Einwirkungen von innen und außen unterschieden. Wird im vorliegenden Bericht allgemein von einer übergreifenden Einwirkung gesprochen, kann das sowohl eine einzelne Einwirkung (wie z. B. Erdbeben) als auch eine Kombination von mehreren Einwirkungen auf Grund von Abhängigkeiten (wie z. B. Erdbeben und Hochwasser) sein. Das unabhängige Auftreten von mehreren übergreifenden Einwirkungen ist bei längeren Einwirkungszeiten einer EVI/EVA vorsorglich in die Risikobetrachtung eines Standorts einzubeziehen. In /KUZ 15/ wird davon gesprochen, dass nur glaubwürdige Kombinationen von unabhängigen Einwirkungen zu analysieren sind.
$W_A$	Wirksamkeitsfunktion von → A im → Abhängigkeitsmodell $\{M, A, C\}$ (Mit welcher Wahrscheinlichkeit wird die Abhängigkeit wirksam?) Im Fall einer → SPSA ist $W_A(B)$ die Wahrscheinlichkeit dafür, dass A bei gegebenem seismischen Parameter B zu abhängigen Ausfällen von BSK aus M führen kann.

**Tab. 9.2** Europäische Makroseismische Skala

<b>Intensität</b>	<b>Kurzcharakteristik</b>	<b>Beobachtung</b>
I	nicht fühlbar	selbst unter günstigen Bedingungen nicht fühlbar
II	kaum bemerkbar	einzelne ruhende Personen nehmen die Erschütterungen wahr, vor allem in höher gelegenen Stockwerken von Gebäuden
III	schwach	schwache Erschütterungen werden durch Personen wahrgenommen, die sich innerhalb von Gebäuden befinden. Ruhende Personen fühlen ein Schwanken oder leichtes Erzittern
IV	Deutlich	von vielen Personen innerhalb von Gebäuden wahrnehmbar, außerhalb nur von einigen; manche Schlafende erwachen; die Stärke der Erschütterungen ist nicht beängstigend. Fenster, Türen und Geschirr klappern, hängende Objekte beginnen zu schwingen
V	Stark	Von den meisten Personen innerhalb von Gebäuden wahrnehmbar, außerhalb von einigen. Manche Personen flüchten aus Gebäuden, viele Schlafende erwachen. Gebäude erzittern komplett, hängende Objekte schwingen deutlich, Porzellan und Gläser stoßen vernehmlich zusammen. Die Erschütterungen sind stark, kopflastige Objekte fallen um. Türen und Fenster öffnen und schließen sich.
VI	leichte Gebäudeschäden	Wird von den meisten Personen innerhalb von Gebäuden wahrgenommen, außerhalb von den meisten. Viele Personen in Gebäuden erschrecken und flüchten nach draußen. Kleine Gegenstände fallen herunter. Leichte Schäden an normalen Gebäuden, so etwa Risse und Ausbrüche in Verputzen.
VII	Gebäudeschäden	Die meisten Personen in Gebäuden erschrecken und flüchten nach draußen. Möbel verrutschen und viele Gegenstände fallen aus Regalen und offenen Schränken. Viele normale Gebäude werden beschädigt, so etwa durch Mauerrisse und teilweise einstürzende Kamine.
VIII	schwere Gebäudeschäden	Möbel können umfallen. Viele normale Gebäude werden beschädigt: Kamine stürzen ein, große Mauerrisse, einige Gebäude fallen teilweise zusammen.
IX	zerstörernd	Hohe Strukturen wie Denkmäler oder Säulen fallen um oder werden verbogen. Viele normale Gebäude fallen teilweise zusammen, einige Gebäude werden vollständig zerstört.

<b>Intensität</b>	<b>Kurzcharakteristik</b>	<b>Beobachtung</b>
X	sehr zerstörend	Viele normale Gebäude stürzen ein.
XI	verwüstend	Die meisten normalen Gebäude stürzen ein.
XII	vollständig verwüstend	Fast alle über- und unterirdischen Bauwerke werden zerstört oder schwer beschädigt.

## Anhänge



## **A           Aufarbeitung des Standes von Wissenschaft und Technik**

### **A.1           Literaturauswertungen zur Durchführung von HPSA**

Die nachfolgend aufgeführten Fachartikel wurden im Verlauf des Vorhabens in Bezug auf die Durchführung standortspezifischer HPSA ausgewertet. Die im Detail betrachteten Artikel sind im Literaturverzeichnis mit einem \* gekennzeichnet. Bei nicht näher erläuterten Abkürzungen wird auf die Tabelle im Anhang B verwiesen.

#### **American Nuclear Society: External Events Methodology Standard /ANS 07/**

Es wird eine einfache Methode zur groben Abschätzung eines Systemschadens beschrieben. Dieses Vorgehen wird für die SMA-Methode zur Einschätzung seismischer Sicherheitsreserven empfohlen.

Für ein technisches System ist die Schadenshäufigkeit abzuschätzen. Dann ist folgendermaßen vorzugehen:

- Bestimmung der seismischen Gefährdungskurve  $H(B)$  mit  $B$  als Beschleunigungswert, Maßeinheit  $g$
- Bestimmung der BSK mit der geringsten HCLPF-Kapazität  $B_0 = HCLPF_0$  (Der Wert  $B_0$  wird als Versagensbeschleunigung für das gesamte System angenommen, d. h. natürlich auch, dass von einer vollständigen Abhängigkeit aller BSK des Systems ausgegangen wird.)
- Eine Abschätzung für die Schadenshäufigkeit ist  $H(B_0)$ .

#### **Klug, J., M. Kumar: Summary report of already existing guidance on the implementation of external hazards in extended Level 1 PSA /KLU 15/**

Im Bericht geht es um die Modellierung von BSK-Ausfällen, die durch übergreifende Einwirkungen verursacht werden. Das ist, wie in Kapitel 2.1.3 dargestellt, die Bearbeitungsstufe 3 (Ebene der BSK) der Durchführung einer PSA für übergreifende Einwirkungen.

Folgende Themen werden bearbeitet:

- Bestimmung der bedingten Ausfallwahrscheinlichkeit von BSK in Abhängigkeit von der Art der übergreifenden Einwirkung
- Was ist bei der Erweiterung des PSA der Stufe 1 um Einflüsse aus übergreifenden Einwirkungen zu beachten (Konsistenz der Annahmen für interne auslösende Ereignisse mit denen für übergreifende Einwirkungen)?
- Wie wird die Einwirkung von EVA-Kombinationen und Abhängigkeiten zwischen mehreren EVA modelliert?
- Gibt es Ansätze zur Durchführung grober Abschätzungen, die in kurzer Zeit und bei geringem Aufwand erste relevante Ergebnisse liefern?
- Wie werden Personalhandlungen in Abhängigkeit von der Art der übergreifenden Einwirkung beurteilt?
- Wie können Mehrblockanlagen in PSA der Stufe 1 bewertet werden? Welches Risikomaß ist anzuwenden? Dabei sind Kombinationen der Betriebszustände der verschiedenen Reaktoren einzubeziehen.

Nachfolgend werden einige Aspekte im Zusammenhang mit der vorliegenden Arbeit diskutiert.

In Kapitel 4.1.2 wird die Sicherstellung der Konsistenz von Annahmen und Randbedingungen erörtert, die in einer PSA der Stufe 1 getroffen wurden, mit den Annahmen, die für die Modellerweiterung bez. übergreifender Einwirkungen herangezogen wurden. Moderne PSA nutzen integral aufgestellte Anlagenmodelle, die oftmals das gesamte Spektrum möglicher Anlagenbetriebszustände umfasst. Auch dafür wird eine übergreifende Konsistenz aller Annahmen erforderlich. Es werden folgende Aspekte behandelt (und dementsprechend auch in Kapitel 2.1 berücksichtigt):

- Aufstellung der *H-EL*  
Grundsätzlicher Ausgangspunkt für alle übergreifenden Einwirkungen sind die im Anlagenmodell der PSA Stufe 1 enthaltenen Komponenten von Sicherheitssystemen. Notwendige Bedingung für Ergänzungen ist die Einhaltung der Komponentengrenzen über alle Stufen der Analyse hinweg, d. h. die Liste der BSK für ein übergreifendes Ereignis geht von den gleichen Komponentengrenzen aus wie für die BSK aus der PSA Stufe 1.

- Ausfallarten  
In der *H-EL* sind sowohl die BSK als auch die zugehörige Ausfallart dokumentiert. Ein besonderer Aspekt bei der Aufstellung von *H-EL* ist die Berücksichtigung der räumlichen Interaktionen, der durch das übergreifende Ereignis betroffenen BSK. Dieses Problem wird im vorliegenden Konzept anhand der *H-DL* behandelt (siehe Kapitel 2.3.2.3 und Kapitel 3.1.2).
- Anlagenbegehungen  
Anlagenbegehungen sind obligatorisch bei der Analyse übergreifender Einwirkungen jeder Art. Zu Umfang und Art der Durchführung gibt es sehr unterschiedliche Ansätze.
- Analyse von Personalhandlungen
- Quantifizierung, Rechencodes  
Die Rechencodes zur Auswertung der Anlagenmodelle sollten in der Lage sein, Erfolgspfade einzubeziehen.
- Interne übergreifende Ereignisse  
Für interne und externe übergreifende Ereignisse sollten vergleichbare Methoden angewendet und vergleichbare Annahmen getroffen werden. Diese Forderung wird mit dem hier vorgestellten Konzept einer standortspezifischen Hazards PSA erfüllt (siehe Kapitel 1).

Im Bericht wird auf eine Vielzahl von Literaturstellen in Hinblick auf die Durchführung von Hazards PSA ausgewertet. Folgende Auswertungen wurden teilweise für den vorliegenden Bericht übernommen: /IAE 09/, /IAE 10/, /IAE 11/.

**Kumar, M., et al: Lessons of the Fukushima Dai-ichi accident for PSA /KUM 15/**

Zur Identifikation von Hazards für PSA (entspricht in der vorliegenden Konzeption der Aufstellung der Liste  $\mathcal{L}_{gen}$ ) werden eine Reihe von Schlussfolgerungen gezogen:

- Die Bestimmung der Eintrittshäufigkeiten der übergreifenden Einwirkungen sollte den Standort selbst, die weitere Umgebung um den Standort und auch generische Daten weltweit einbeziehen.
- Die Bestimmung der Eintrittshäufigkeiten sollte alle Korrelationsmechanismen berücksichtigen (siehe weiter unten: ursachenbezogene Abhängigkeiten, phäno-

menologisch begründete Abhängigkeiten, zeitlich begründete Abhängigkeiten und bedingte übergreifende Einwirkungen).

- Eine notwendige Vorbedingung zur Identifikation von übergreifenden Einwirkungen für PSA ist hinreichendes wissenschaftliches Knowhow zu seltenen Szenarios mit potenziell großer Wirkung. Auf dem Gebiet der Geo-Wissenschaften ist der Wissensstand für einige übergreifende Einwirkungen noch nicht so entwickelt wie man es für PSA benötigen würde, aber das ist kein Argument, um diese Risikofelder zu vernachlässigen. Neue Erkenntnisse der Geo-Wissenschaften sind in die Risikoabschätzungen mit HPSA zu integrieren.
- Die Standortanalysen im Sicherheitsbericht sind zur Bestimmung Liste  $\mathcal{L}_{ges}$  in regelmäßigen Abständen zu aktualisieren.
- Die Identifikation von übergreifenden Einwirkungen sollte über die gängigen Einwirkungen wie interne und externe Überflutung oder interner Brand hinausgehen. Alle naturbedingten übergreifenden Einwirkungen am Standort sind zu betrachten, ein weites Spektrum seltener Ereignisse sollte einbezogen werden.
- Es gibt keine allgemein akzeptierten Methoden zur Extrapolation von Überschreitenshäufigkeiten (kleiner als  $1,0 \text{ E-}04/a$ ) auf solche Intensitäten, die nicht durch Daten gestützt sind. Bessere Methoden und Daten werden zur Begrenzung der Unsicherheiten der Extrapolationen von Häufigkeiten seltener Ereignisse benötigt.
- Der internationalen Betriebserfahrung sollte in Bezug auf Vorläuferereignisse zu übergreifenden Einwirkungen mehr Beachtung geschenkt werden. Die Auswertungsergebnisse sind systematisch zu nutzen bei der Identifikation anlagenspezifischer übergreifender Einwirkungen.
- Die Identifikation übergreifender Einwirkungen ist abhängig vom Risikomaß (Kernschadenshäufigkeit, Brennelementschaden im Brennelementlagerbecken, ...). Das ist bei der Aufstellung der Listen zu betrachtender übergreifender Einwirkungen zu beachten.

Vor der Anwendung von Auswahl-Kriterien zur Überprüfung der Notwendigkeit, ob übergreifende Einwirkungen detailliert untersucht werden müssen, sollte eine realistische Menge von Kombinationen übergreifender Einwirkungen auf der Grundlage einzelner übergreifender Einwirkungen von innen und außen abgeleitet und der Liste der auszuwählenden Einwirkungen hinzugefügt werden.

Eine systematische Überprüfung eventuell vorhandener Abhängigkeiten sollte vorgenommen werden, indem man

- übergreifende Einwirkungen identifiziert, die gleichzeitig und unter gleichen Bedingungen auftreten (z. B. Wind und Schnee),
- übergreifende Einwirkungen und weitere interne Ereignisse identifiziert, die gleichzeitig auftreten (z. B. bei Fortbestehen einer übergreifenden Einwirkung),
- übergreifende Einwirkungen von außen identifiziert, die andere übergreifende Einwirkungen von außen induzieren (z. B. seismisch bedingter Tsunami),
- übergreifende Einwirkungen von außen identifiziert, die andere übergreifende Einwirkungen von innen induzieren (z. B. seismisch bedingte anlageninterne Brände),
- übergreifende Einwirkungen von innen identifiziert, die andere übergreifende Einwirkungen von innen induzieren (z. B. interne Überflutung hervorgerufen durch Geschosswirkung),

Der betrachtete Abhängigkeitsmechanismus sollte zumindest folgendes umfassen:

- ursachenbezogene Abhängigkeit (z. B. Erdbeben und Tsunami),
- phänomenologisch begründete Abhängigkeit (z. B. Klimaereignisse – starker Wind und starker Regen, ...)
- zeitlich begründete Abhängigkeit (z. B. übergreifende Einwirkungen, die während einer langen Zeiträume in einem heißen Sommer eintreten)
- induzierte übergreifende Einwirkungen (siehe oben).

#### **Fleming, Karl N.: On the Issue of Integrated Risk – A PRA Practitioners Perspective /FLE 05/**

Die ersten Resultate zur Risikoanalyse des Kernkraftwerk-Standorts Seabrook /PLG 83/ wurden 1983 veröffentlicht und zwar vor der baulichen Fertigstellung von Block 2 und vor Erteilung der Inbetriebnahmegenehmigung von Block 1. Das ist lange her und seitdem hat sich auf dem Gebiet der Risikoanalysen von Kernkraftwerken viel getan. Nichtsdestotrotz wurde bei der damaligen Analyse von vornherein auch an die Bestimmung des Standortrisikos gedacht. Erst nach den Ereignissen von Fukushima mit der Beschädigung mehrerer Kraftwerksblöcke an einem Standort durch eine übergreifende Einwirkung begann eine intensive Beschäftigung der internationalen Fach-

gemeinde mit den Auswirkungen übergreifender Einwirkungen auf Anlagenstandorte mit mehr als einem Block.

Am Standort Seabrook gibt es zwei im Wesentlichen unabhängig arbeitende Kernkraftwerks-Blöcke; jeder Block hat seine eigenen Notstromdiesel und seine eigenen Nebenkühlwasserpumpen. Es gibt nur einen geringen Umfang an gemeinsam genutzten Ausrüstungen. Trotzdem bestehen eine Reihe von Abhängigkeiten, die bei der Modellbildung zur Berechnung des Risikos berücksichtigt werden müssen, z. B.:

- Gemeinsam genutzte Systeme  
(z. B. Netzanbindung, Einlaufstrukturen Nebenkühlwasser)
- Geringer Abstand der Reaktoren
- Redundanz an Ausrüstungen und Personal
- Potenzial für das Auftreten abhängiger Fehler  
(z. B. Auslegungsfehler, Wiederholung von Instandhaltungsfehlern).

Die PSA wurde zuerst für Block 1 durchgeführt, und dann wurden diese Informationen genutzt, um ein Standortrisiko (integrated risk) abzuleiten, um Aussagen zum Risiko für den Zeitraum treffen zu können, an dem beide Kraftwerksblöcke parallel in Betrieb sind.

Es wurde eine Klassifikation der auslösenden Ereignisse vorgenommen (siehe Tab. A.1).

**Tab. A.1** Klassifikation der auslösenden Ereignisse

Kategorie	Auslösendes Ereignis
Ereignisse, die beide Blöcke beeinflussen	Notstromfall (loss of offsite power) Erdbeben Tornado und Wind Externe Überflutung Transportunfall in der Freiluftschaltanlage
Ereignisse, die unter gewissen Bedingungen beide Blöcke beeinflussen	Loss of condenser vacuum Ausfall Nebenkühlwasser Turbine missile

Kategorie	Auslösendes Ereignis
Ereignisse, die die Blöcke unabhängig voneinander beeinflussen	Kühlmittelverlust Allgemeine Transienten Verlust der Komponentenkühlung Ausfall einer Gleichstromschiene (DC bus) Interner Brand Interne Überflutung Flugzeugabsturz

Es wurde ein Anlagenmodell konstruiert, das Ereignisabläufe für die auslösenden Ereignisse beschreibt, durch die beide Blöcke beeinflusst werden. Ein wichtiger Aspekt dieses Modells ist die Behandlung von Fehlern aus gemeinsamer Ursache für redundante Komponenten in beiden Blöcken. Bei seismischen Einwirkungen wird z. B. sehr konservativ angenommen, dass der seismische Ausfall einer Komponente den Fehler aus gemeinsamer Ursache repräsentiert für alle Komponenten in beiden Blöcken, für die dieselbe Fragility-Kurve angenommen wird.

Die Ergebnisse der PSA der Stufe 1 sind in Tab. A.2 aufgeführt.

**Tab. A.2** Ergebnisse der PSA Stufe 1 für das Kernkraftwerk Seabrook

Risikomaß	Erwartungswert
Kernschadenshäufigkeit für einen einzelnen Block	2,3 E-04/Reaktorjahr
Kernschadenshäufigkeit für den Standort	
Kernschadenshäufigkeit bezogen auf einen Block	4,0 E-04/Standortjahr
Kernschadenshäufigkeit für beide Blöcke	3,2 E-05/Standortjahr
gesamt	4,3 E-04/Standortjahr

Der Begriff Kernschadenshäufigkeit muss für das Standortrisiko definiert werden. Im Fall von Seabrook bedeutet der Wert von 4,3 E-04/Standortjahr, dass ein Kernschaden an einem oder an beiden Reaktoren eingetreten ist.

In Tab. A.3 sind die Hauptbeiträge zur KSH an beiden Blöcken aufgeführt.

**Tab. A.3** Hauptbeiträge zur Kernschadenshäufigkeit für beide Blöcke des Kernkraftwerks Seabrook

Auslösendes Ereignis	Bedingte Kernschadenshäufigkeit für beide Blöcke
Erdbeben	2,8 E-05/Standortjahr
Notstromfall	2,8 E-06/Standortjahr
Transportunfall in der Freiluftschaltanlage (Zerstörung von Leitungen)	1,0 E-07/Standortjahr
Externe Überflutung	1,6 E-06/Standortjahr
gesamt	3,2 E-05/Standortjahr

In der Zusammenfassung der historischen Bewertung der Seabrook-Ergebnisse wird insbesondere hervorgehoben, dass die allgemein anerkannten Risikomaße der probabilistischen Analysen für einzelne Kernkraftwerke für die Nutzung bei Standortanalysen von Standorten mit mehr als einem Reaktor umdefiniert werden müssen.

**IAEA Safety Guide NS-G-2.13: Evaluation of Seismic Safety for Existing Nuclear Installations /IAE 09/**

*“This Safety Guide provides recommendations in relation to the seismic safety evaluation of existing nuclear installations. Such an evaluation may be prompted by a seismic hazard perceived to be greater than that originally established in the design basis, by new regulatory requirements, by new findings on the seismic vulnerability of SSCs, or by the need to demonstrate performance for beyond design basis earthquake conditions, in line and consistent with internationally recognized good practices.*

*The objective of guideline is to understand the true state of the SSCs in terms of their required safety function and their seismic capacity and, as a result, to assess the seismic safety margin of the installation.”*

**IAEA Specific Safety Guide SSG-3: Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants /IAE 10/**

*“Concerning the scope of Level 1 PSA this Safety Guide includes all operational conditions of the plant (i.e. full power, low power and shutdown) and all potential initiating events and potential hazards, including external hazards, both natural (e.g. earthquake,*

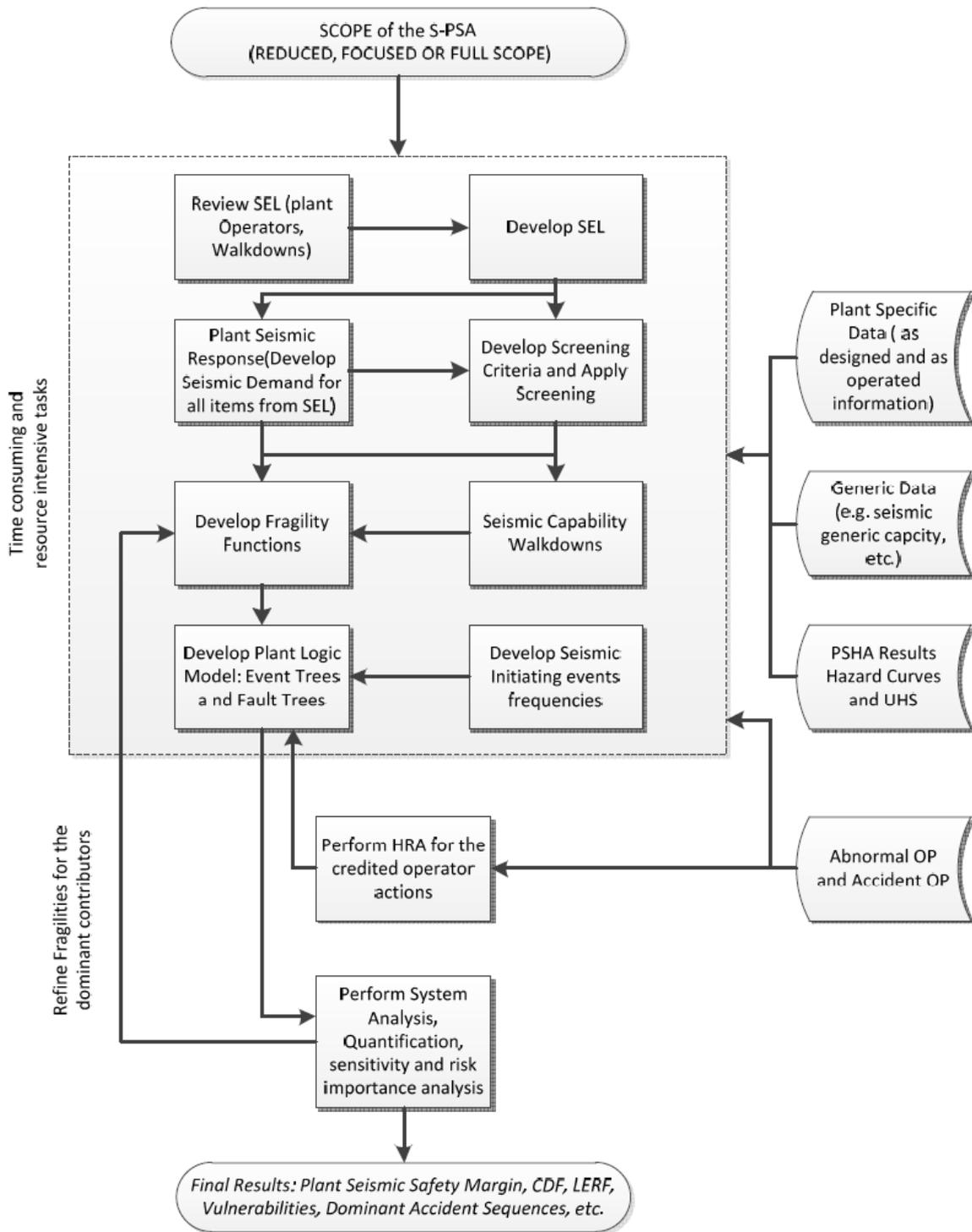
*high winds, external floods) and of human-induced (e.g. airplane crash, accidents at nearby industrial facilities).*

*Section 8 of the Guide provides specific recommendations for selected external hazards (seismic hazards, high winds, external floods, human-induced hazards) that cannot be screened out in many cases. This section in general considers impact of external hazards on SSCs and provides some aspects of bounding analysis, parametrization, detail analysis of external hazards, fragility analysis for SSCs and integration of external hazards in the Level 1 PSA model.”*

**International Atomic Energy Agency (IAEA): A Methodology to Assess the Safety Vulnerabilities of Nuclear Power Plants against Site Specific Extreme Natural Hazards /IAE 11/**

Das Dokument enthält Anforderungen und Methoden zur Bewertung der übergreifenden Einwirkungen Erdbeben und Hochwasser. Dabei geht es um die Charakterisierung und Identifikation von BSK, die zum Erhalt der Sicherheitsfunktionen bei verschiedenen Störfallszenarien benötigt werden sowie um den Prozess der Abschätzung vorhandener Sicherheitstoleranzen mit deterministischen und probabilistischen Methoden.

In Abb. A.1 ist ein Flussdiagramm zur Durchführung einer SPSA gegeben.



**Abb. A.1** Flussdiagramm zur Durchführung einer SPSA

In IAE 11/, Anhang II ist die Auswahlprozedur zur Aufstellung der sogenannten Safe-Shutdown-Ausrüstungsliste beschrieben. Diese Liste ist Ausgangspunkt für eine Safety Margin Analysis. Die meisten der genannten Auswahlkriterien und Hinweise zur Auf-

stellung sind auch für die Erstellung von S-EL für probabilistische Analysen beachtenswert (vgl. dazu insbesondere die Ausführungen in Kapitel 2.3.2).

Zu den seismischen Abhängigkeiten und deren Modellierung ist unter den Punkten III-70/71 folgendes angemerkt:

- Eine BSK fällt auf Grund einer seismischen Einwirkung aus, wenn die Belastung durch die seismische Einwirkung die Belastbarkeit übersteigt. In einer SPSA wird normalerweise vollständige Ausfallkorrelation für ähnliche, sich nah beieinander befindliche BSK angenommen, wenn sie derselben Beschleunigungsbelastung (Anordnung in derselben Etage). Werden verschiedene BSK-Typen betrachtet, wird – wenn überhaupt – nur eine geringe Ausfallkorrelation angenommen, auch wenn diese BSK nah beieinander stehen.
- Aus einer hohen Korrelation im Hinblick auf die Belastung ergibt sich nicht zwingend eine hohe Korrelation in Hinblick auf die Belastbarkeit. Eine hohe Belastbarkeits-Korrelation liegt z. B. vor, wenn die BSK vom gleichen Hersteller sind und in einem Produktionsprozess gefertigt wurden.
- Es wird empfohlen, das Problem mit einer Sensitivitätsanalyse anzugehen. Es wird in einer ersten Rechnung vollständige Abhängigkeit angenommen und in einem zweiten Rechenlauf vollständige Unabhängigkeit. In Abhängigkeit von der Differenz der beiden Ergebnisse ist das weitere Vorgehen festzulegen.

In Punkt III-67 befasst man sich mit Datenbanken für SPSA (siehe dazu die Ausführungen in Kapitel 4.2).

**Klügel, J.-U.: On the treatment of dependency of seismically induced component failures in Seismic PSA /KLU 09/**

Das Ausfallverhalten von Komponenten des gleichen Typs, die zu unterschiedlichen Redundanzen gehören und sich auf der gleichen Ebene (floor) befinden, ist vollständig abhängig. Es wird angenommen, dass alle Komponenten, die durch dieselbe Fragilityfunktion charakterisiert sind und sich auf der gleichen Ebene (floor) eines Gebäudes befinden, gemeinsam ausfallen, sobald die Beanspruchungskapazität einer einzelnen Komponente überschritten wird.

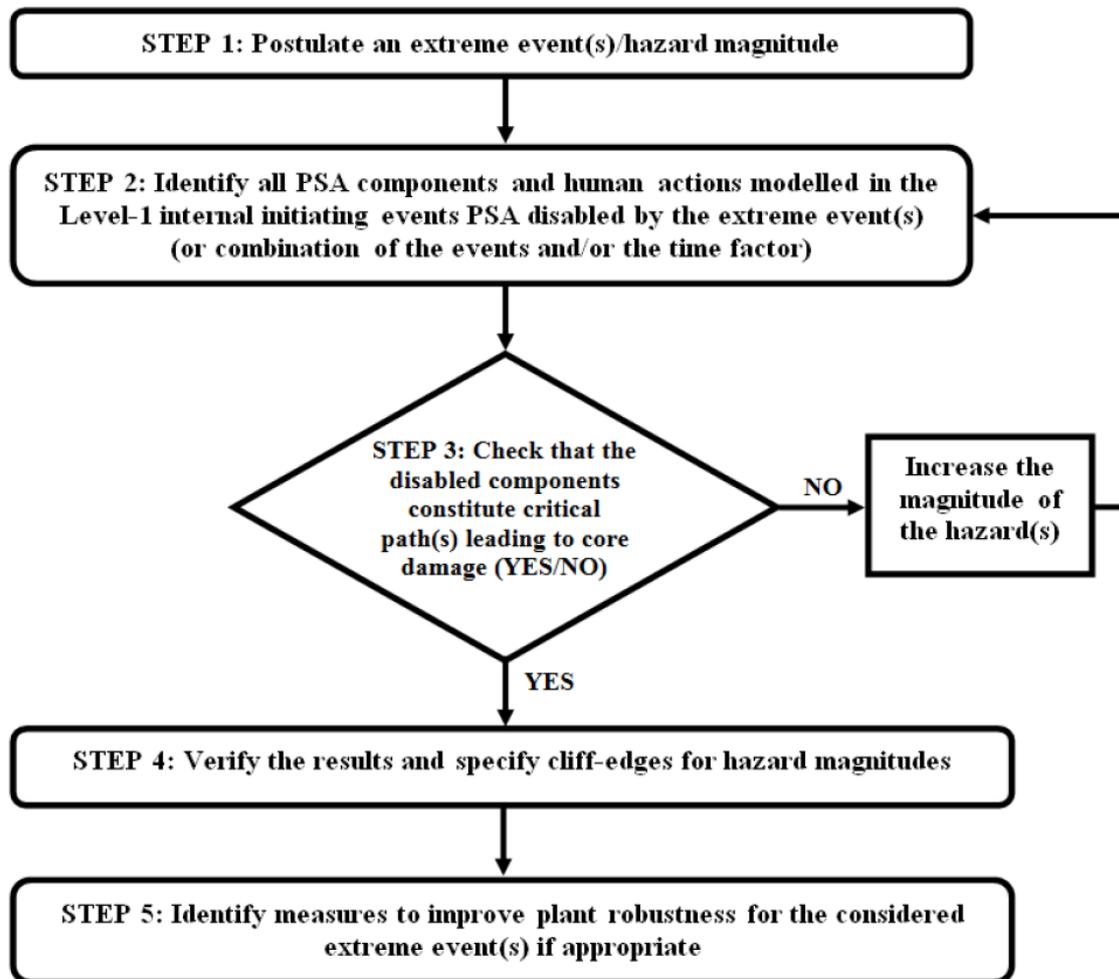
Tritt ein Gebäudeausfall ein, dann werden alle Systemfunktionen als nicht verfügbar betrachtet, die mit Komponenten in diesem Gebäude verbunden sind.

## **Sörman, J., et al.: Method for Analysing Extreme Events /SOE 14/**

Ein PSA-Modell der Stufe 1 enthält umfassende und detaillierte qualitative und quantitative Informationen zur Anlagensicherheit. Es wird gezeigt, wie das PSA-Modell einschließlich dieser Informationen genutzt werden kann, um übergreifende Einwirkungen (extreme events) in Hinblick auf das Risiko am Standort einzuschätzen.

In Abb. A.2 ist der iterative Prozess der Analysemethode (Extreme Event Analysis – EEA) grob dargestellt. Nachfolgend sind die wichtigsten Arbeitsschritte zur Identifikation sensitiver Szenarios bei übergreifenden Einwirkungen aufgeführt:

- Festlegung der übergreifenden Einwirkungen, die in die Analyse einzubeziehen sind,
- Bestimmung der BSK, die anfällig in Bezug auf die übergreifenden Einwirkungen sein können,
- Bestimmung der AE, die durch übergreifende Einwirkungen hervorgerufen werden,
- Bestimme die Intensität der übergreifenden Einwirkung, die zum Ausfall von BSK führt und zur Entstehung von AE,
- Bestimme die minimalen Schnittmengen bei Auftreten einer übergreifenden Einwirkung oder einer Kombination von übergreifenden Einwirkungen.



**Abb. A.2** Method for Analysing Extreme Events (Ablaufschema, aus /SOE 14/)

Der Extreme Event Analyzer ist eine Programmerweiterung von RiskSpectrum®.

Zur Anwendung sind folgende Informationen zusammenzustellen:

- Aufstellort aller BSK (Raumbezug, Aufstellhöhe),
- Bedingungen des sicheren Betriebs der BSK,
- Klassifikation der BSK in Hinblick auf verschiedene Einwirkungslevel übergreifender Einwirkungen (z. B. nach Intensität bei Erdbeben, nach Fluthöhen bei Hochwasser).

Auf dieser Grundlage werden (rein strukturell) minimale Schnittmengen erzeugt, d. h. fallen die Komponenten einer Schnittmenge aus, ist ein Kernschaden anzunehmen. Die Komponenten sind bezüglich ihrer Verletzlichkeiten gegenüber einer oder mehreren übergreifenden Einwirkungen markiert. Wird z. B. ein Erdbeben mit einer maxima-

len Freifeldbeschleunigung von 0,3 g betrachtet, werden alle Komponenten als ausgefallen angesetzt, die einen Verletzlichkeitswert von kleiner 0,3 g haben.

Das Verfahren ist ein Screening-Verfahren. Die eigentliche Arbeit (und sicher auch das Problem) besteht in der Klassifikation der einzelnen BSK in Bezug auf die zu betrachtenden übergreifenden Einwirkungen.

**Pellisetti, M., U. Klapp: Erfassung von abhängigen erdbebenbedingten Ausfällen in Fehlerbaummodellen der seismischen PSA /PEL 11/**

In diesem Beitrag wurde das Korrelationsmodell nach NUREG-1150 /BOH 90/ betrachtet. Dort werden die Korrelationen mit dem Response (Beanspruchung) / Strength (Beanspruchbarkeit) - Ansatz bewertet. Für Response Parameter wird Folgendes angenommen, siehe Tab. A.4:

**Tab. A.4** Regeln für die Zuordnung von Antwortkorrelationen (übernommen aus /BOH 90/)

1.	Components on the same floor slab, and sensitive to the same spectral frequency range (i.e. ZPA, 5–10 Hz, or 10–15 Hz) will be assigned response correlation = 1.0
2.	Components on the same floor slab, and sensitive to different ranges of spectral acceleration will be assigned response correlation = 0.5
3.	Components on different slabs (but the same building) and sensitive to the same spectral frequency ranges (ZPA 5–10 or 10–15 Hz) will be assigned response correlation=0.75
4.	Components on the ground surface (outside tanks, etc.) shall be treated as if they were on the grade floor of an adjacent building
5.	“Ganged” valve configurations (either parallel or series) will have response correlation = 1.0
6.	All other configurations will have response correlation equal to zero

In NUREG-1150 /BOH 90/ wurden die Größen, die die Beanspruchbarkeit beschreiben, als unabhängig modelliert.

**Schroer, S., M. Modarres: An event classification schema for evaluating site risk in a multi-unit nuclear power plant probabilistic risk assessment /SCH 13/**

Bei der Betrachtung des Risikoprofils eines Kernkraftwerk-Standortes wird zwischen zwei Arten von Einflüssen (umfasst die Menge der auslösenden Ereignisse und die internen und externen Hazards) unterschieden. Die Einflüsse vom Typ 1 wirken auf einen einzelnen Kraftwerksblock des Standorts ohne Auswirkungen auf andere Kraft-

werksblöcke, z. B. gehört ein Kühlmittelverlust-Störfall zu dieser Klasse. Die Einflüsse vom Typ 2 wirken auf mehr als einen Kraftwerksblock. Die Einflüsse von Typ 2 werden klassifiziert. Es gibt folgende Abhängigkeitsklassen: Abhängigkeiten durch auslösende Ereignisse, Abhängigkeiten auf Grund gemeinsamer Verbindungen, Abhängigkeiten auf Grund identischer Komponenten, Abhängigkeiten durch Anordnung, personelle Abhängigkeiten und schließlich organisatorische Abhängigkeiten.

Nachfolgend werden nur die Abhängigkeitsklassen der Einflüsse vom Typ 2 näher charakterisiert.

– Abhängigkeiten durch Hazards und auslösende Ereignisse

Diese Abhängigkeitsklasse umfasst alle einzelnen Hazards und auslösenden Ereignisse mit der Möglichkeit mehr als einen Kraftwerksblock am Standort zu gefährden. Die Ereignisse dieser Abhängigkeitsklasse können wiederum unterschieden werden in solche mit unbedingter Wirkung (wie z. B. Erdbeben, extreme Temperaturen, Verlust Nebenkühlwasser) und mit bedingter Wirkung. Ereignisse mit bedingter Wirkung sind z. B. Flugzeugabsturz, Verlust Speisewasser oder externe Explosionen (mehr in /SCH 13/, Table 1). Bei Ereignissen mit bedingter Wirkung müssen noch zusätzliche Umstände eintreten, damit mehrere Kraftwerksblöcke des Standorts betroffen werden.

Beispiel aus einem LER: Durch einen schweren Sturm kam es zum Verlust der externen Stromversorgung mit dem Resultat einer automatischen RESA bei drei Kraftwerksblöcken.

– Abhängigkeiten auf Grund gemeinsamer Verbindungen

Zwei oder mehrere Kernkraftwerksblöcke am Standort teilen sich ein oder mehrere BSK. Dabei können drei Klassen unterschieden werden: mehrere Kraftwerksblöcke nutzen ein und dasselbe System (z. B. Schornstein, Kontrollraum, Dieselgenerator-Gebäude), BSK stehen mehreren Blöcken zur Verfügung, werden zeitgestaffelt genutzt (z. B. externe Stromversorgung) und schließlich BSK, die als Reserve zur Nutzung für mehrere Blöcke bereit stehen. Mehr Beispiele gibt es in /SCH 13/, Table 2.

– Abhängigkeiten auf Grund identischer Komponenten

Diese Klasse entspricht den GVA-Gruppen wie sie bei PSA der Stufe 1 für einen Kraftwerksblock betrachtet werden.

– Abhängigkeiten durch Anordnung

Bei dieser Abhängigkeit geht es vor allem um die Frage wie die BSK angeordnet

sind oder wie der Abstand zwischen ihnen ist. Zu dieser Klasse gehören auch Ausfälle von ähnlichen Komponenten in mehreren Kraftwerksblöcken auf Grund externer Einwirkungen wie z. B. Erdbeben.

Beispiel aus einem LER: Es wurde herausgefunden, dass ein Brand in einem Kabelraum zur Verhinderung des sicheren Abschaltens in zwei Kraftwerksblöcken führen kann.

- Personelle Abhängigkeiten  
Personelle Abhängigkeiten entstehen, wenn Personalhandlungen in Bezug auf BSK mehrere Kraftwerksblöcke beeinflusst. Personalhandlungen werden unterteilt in solche vor dem auslösenden Ereignis und solche danach.
- Organisatorische Abhängigkeiten  
Personalhandlungen erzeugen Abhängigkeiten, die ihre Ursache in der Interaktion zwischen Personal und Maschine haben. Organisatorische Abhängigkeiten ergeben sich aus Personalentscheidungen und -handlungen, die mit der Organisationskultur am Standort zu tun haben (Beispiele siehe /SCH 13/, Table 3). So erzeugt zum Beispiel eine fehlerhafte Prozedur, die bei allen Kraftwerksblöcken am Standort in das Notfallhandbuch aufgenommen wurde, für Abhängigkeiten.

Entsprechend der angegebenen Klassifikation wurden alle Licensee Event Reports (LERs), die der NRC zwischen 2000 und 2011 zugegangen sind, ausgewertet. Es zeigte sich, dass 391 der insgesamt 4207 LERs in irgendeiner Art und Weise mehr als einen Kraftwerksblock an einem Standort beeinflussten. Die organisatorischen Abhängigkeiten betrafen 41% der 391 LERs. Die vollständige Klassifikation bezüglich der Abhängigkeiten ist in /SCH 13/, table 5 enthalten.

Zusammengefasst kann man sagen, dass die Auswertung der LER eines Zeitraums von 11 Jahren ergab, dass fast 10 % der gemeldeten Ereignisse mehr als einen Kraftwerksblock am Standort betroffen hat.

## **A.2 Stand von Wissenschaft und Technik**

Auf Grund der Erkenntnisse der sicherheitstechnischen Auswertungen zu den Reaktorunfällen von Fukushima Dai-ichi wurde weltweit die Auslegung von Kernkraftwerken gegen übergreifende Einwirkungen überprüft. Ein international anerkannter Rahmen zur Durchführung von PSA der Stufe 1 unter Einbeziehung von übergreifenden Einwir-

kungen ist im IAEA Safety Standard /IAE 10/ gegeben. In einem internationalem Projekt /ASA 13/ wurde ein Überblick dazu erarbeitet, inwieweit in den einzelnen Ländern schon umfassende standortbezogene PSA durchgeführt werden. Insgesamt ergibt sich ein sehr diffuses Bild, und durch den erarbeiteten Überblick wird die Notwendigkeit unterstrichen, sowohl am Gesamtkonzept einer HPSA zu arbeiten als auch für die einzelnen übergreifenden Einwirkungen methodische Hinweise aufzubereiten.

Für alle deutschen Kernkraftwerke wurden PSA der Stufe 1 für alle Anlagenbetriebszustände des Leistungs- und Nichtleistungsbetriebs durchgeführt. Entsprechende quantifizierbare PSA-Modelle liegen für alle anlageninternen auslösenden Ereignisse vor. Für Zustände des Leistungsbetriebs gibt es weiterhin Analysen für übergreifende Einwirkungen von innen und außen entsprechend den Vorgaben im Methodenband des Leitfadens zur Durchführung von PSA /FAK 05/.

Zur Quantifizierung von PSA der Stufe 1 für einen gegebenen Anlagenbetriebszustand werden in den meisten deutschen Kernkraftwerken mehrere PSA-Modelle genutzt:

- PSA-Modell für alle anlageninternen auslösenden Ereignisse,
- PSA-Modelle für anlageninterne übergreifende Einwirkungen (Brand, Überflutung),
- PSA-Modelle für externe übergreifende Einwirkungen, die am Standort des Kernkraftwerks im Detail zu analysieren sind (standortspezifische Auswahl entsprechend dem im Methodenband /FAK 05/ zum PSA-Leitfaden beschriebenen Vorgehen).

In Bezug auf die probabilistische Modellierung von übergreifenden Einwirkungen wurde eine Reihe von internationalen Aktivitäten zur Aufarbeitung der Ereignisse in Fukushima initiiert. Dazu wurden bei der GRS mehrere methodische Beiträge erarbeitet und im internationalen Rahmen vorgestellt /SPE 13/, /TUE 13/, /TUE 14/.

Im vorliegenden Bericht ist ein Konzept zur Durchführung einer standortspezifischen PSA zu den Auswirkungen übergreifender Einwirkungen beschrieben. Das Konzept orientiert sich insbesondere an dem in IAEA SSG-3 /IAE 10/ empfohlenen Vorgehen, berücksichtigt den Fachband zu PSA-Methoden /FAK 05/ zum deutschen PSA-Leitfaden sowie den entsprechenden Ergänzungsband /FAK 15/ und stützt sich auf Ergebnisse aus methodischen Untersuchungen der GRS zur Durchführung von Brand-PSA und Erdbeben-PSA /TUE 10/, /FRE 10/, /BAB 11/.

Es ist eine systematische Vorgehensweise entwickelt worden, wie das Anlagenmodell einer PSA Stufe 1 für interne auslösende Ereignisse um bedingte Ausfälle durch eine gegebene übergreifende Einwirkung ergänzt werden kann. Dazu wird jedes Basisereignis (ein Basisereignis beschreibt den Ausfall einer Ausrüstung mit Ausfallmode und Ausfallwahrscheinlichkeit) im Anlagenmodell daraufhin überprüft, ob die entsprechende Ausrüstung auch auf Grund der betrachteten übergreifenden Einwirkung ausfallen kann. Die dabei entstehende Liste wird Ausrüstungsliste für die betrachtete übergreifende Einwirkung genannt. Eine entsprechende Liste kann auch für durch das übergreifende Ereignis generierte Ausfallabhängigkeiten von Ausrüstungen erzeugt werden. Nach Durchführung von Auswahlverfahren qualitativer und quantitativer Art können die entsprechend reduzierten Listen zur systematischen Ergänzung des PSA-Anlagenmodells der Stufe 1 herangezogen werden.

Auch international werden gegenwärtig in der Folge der Ereignisse von Fukushima Anstrengungen unternommen, den Umfang von PSA vor allem in Bezug auf übergreifende Ereignisse auszuweiten. Die GRS nimmt am internationalem Projekt ASAMPSA\_E zu fortgeschrittenen Methoden probabilistischer Sicherheitsbewertung teil /ASA 13/. Dabei geht es um die Durchführung von sogenannten „Erweiterten PSA“ (Extended PSA). Eine Erweiterte PSA wird für einen Standort mit einem oder mehreren Kernkraftwerken unter Einbeziehung der Umgebungsgegebenheiten durchgeführt. Dabei wird das bedingte Risiko der Hauptquellen von Radioaktivität (Reaktorkern und Brennelementlagerung) am Standort bewertet unter Einbeziehung aller Anlagenbetriebszustände und aller am Standort möglichen Inwirkungen. Eine Erweiterte PSA umfasst eine Erweiterte PSA der Stufe 1 und eine Erweiterte PSA der Stufe 2.

Nachfolgend einige Anmerkungen zum internationalen Stand für ausgewählte Teilgebiete der Durchführung von HPSA. Einige der aufgeführten Problemstellungen sind den Diskussionen zu den Zielstellungen von ASAMPSA\_E entnommen. Ausgewählte Teilprobleme werden im vorliegenden Bericht behandelt.

- Es gibt aktuell kein erprobtes Gesamtkonzept zur Durchführung von HPSA (siehe dazu auch Kap.1) .
- Es gibt einige wenige methodische Anleitungen zur Durchführung von PSA für konkrete übergreifende Einwirkungen, allerdings immer konzentriert auf die Einzelbetrachtung, nicht im Kontext einer allgemeinen HPSA-Methodik. Mehrfach wird z. B. in der Literatur das Problem angesprochen, wie bei der Einschätzung des Gesamtrisikos mit Ergebnissen zu einzelnen übergreifenden Einwirkungen umge-

gangen werden muss, die offensichtlich aus verschiedenen Gründen mit unterschiedlicher Konservativität erhalten wurden.

- Welche übergreifenden Einwirkungen müssen in welcher Tiefe analysiert werden? Wie ist ein entsprechendes Auswahlverfahren zu organisieren? (siehe dazu Kapitel 2.2 im vorliegenden Bericht)
- Brand-PSA sind in den meisten Fällen – und oft notgedrungen - deutlich konservativer angelegt als PSA für interne auslösende Ereignisse. Deshalb sollte bei der gemeinsamen Auswertung von Brand-PSA und den Ergebnissen von PSA für interne auslösende Ereignisse sehr vorsichtig vorgegangen werden /TUE 15c/. In /SAU 14/ werden, um den Einfluss von wesentlichen Annahmen auf die abgeleitete brandbedingte Kernschadenshäufigkeit und die dominanten Risikobeiträge bewerten zu können, Themenfelder einer Brand-PSA identifiziert, die einen großen unsicheren Anteil am Brand-Risiko haben.
- Seit dem Unfall von Fukushima befasst man sich weltweit insbesondere auch mit Ereignissen, die ihre Ursache in der Kombination von übergreifenden Einwirkungen haben. Es wird die Frage diskutiert, welche Kombinationen am konkreten Standort auftreten können und mit welchem Aufwand und Umfang sie bearbeitet werden müssen (siehe dazu auch Kapitel 2.2.2 im vorliegenden Bericht).
- In /ASA 13/ werden nach aktuellem Bearbeitungsstand folgende Berichte zur Methodik der Durchführung von PSA für einzelne übergreifende Einwirkungen von außen erstellt (Fertigstellung: voraussichtlich 2016):
  - Leitfaden 1 zu Erdbeben,
  - Leitfaden 2 zu Überflutungen,
  - Leitfaden 3 zu extremen Wettereinflüssen,
  - Leitfaden 4 zu biologischen Einwirkungen,
  - Leitfaden 5 zu Blitzeinschlägen,
  - Leitfaden 6 zu übergreifenden Einwirkungen durch den Menschen und Flugzeugabsturz.

Inwieweit es gelingen wird, diese Berichte konsistent in ein Gesamtkonzept zur Durchführung von HPSA (bzw. noch umfassender – in ein Konzept einer erweiterten PSA) einzufügen, bleibt abzuwarten.

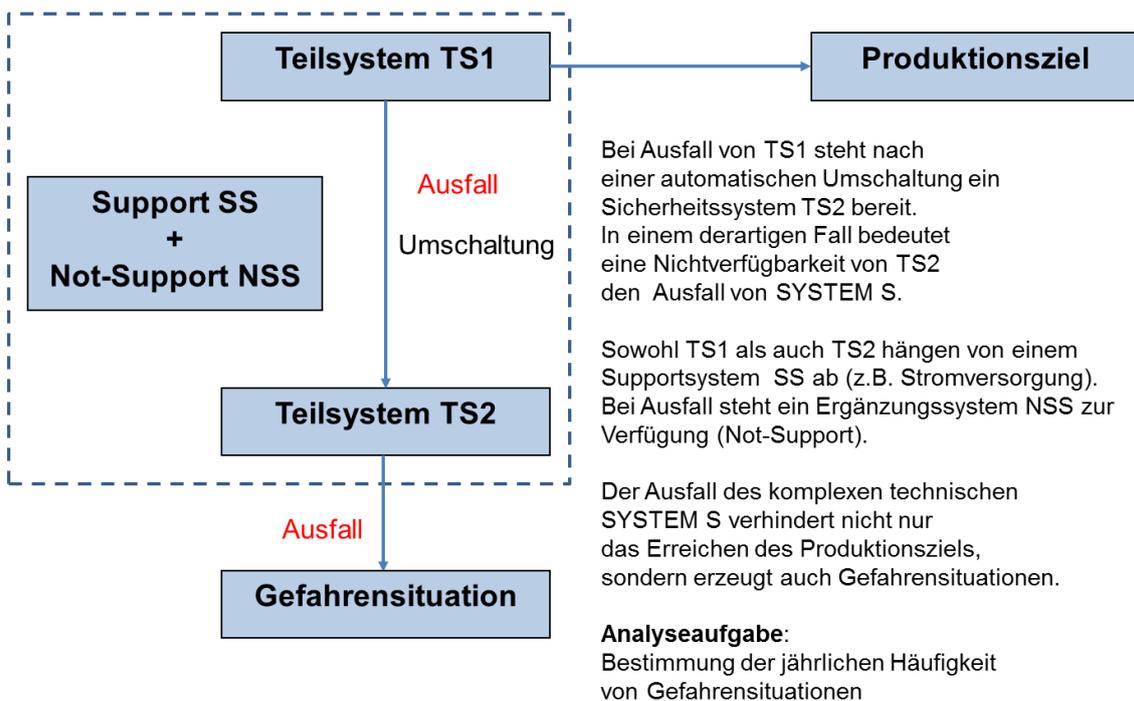
- Es sind weitere Arbeiten zur Bestimmung von Überschreitenshäufigkeiten seltener Einwirkungen notwendig. Dazu gehört die Entwicklung von Extrapolationsverfahren auf Intensitäten, die noch nicht beobachtet wurden.
- Zur Modellierung von Abhängigkeiten bezüglich des seismischen Ausfalls von BSK gibt es international keine einheitliche Praxis. Es existiert ein Grundverständnis darüber, dass seismische Abhängigkeiten auf BSK-Ebene zu berücksichtigen sind, aber mit welchem Modellierungsansatz, in welcher Tiefe und in welchem Umfang die Abhängigkeitsbetrachtungen durchzuführen sind, besteht kein Konsens. Ist ein möglicherweise geeignetes Modell für einen konkreten Standort gefunden, stellt sich oft auch die Frage wie die Modellparameter sinnvoll bestimmt werden können. (Einige Anmerkungen dazu sind in Kapitel 3 enthalten)
- Welches Risikomaß ist angemessen, um das Standortrisiko zu beschreiben? Es gibt keinen Leitfaden zur Zusammenfassung und Bewertung einzelner Risiken (risk aggregation guideline).

## B Beispiele

Nachfolgend sind zum besseren Verständnis der im vorliegenden Bericht beschriebenen methodischen Herangehensweisen Beispiele angegeben. Dazu wird zum einen ein einfaches Beispiel konstruiert (Anhang 0) und zum anderen auf Modellierungen in konkreten PSA (Anhang 0) zurückgegriffen. Auf die Beispiele wird im Hauptteil des Berichts zur Unterstützung der allgemeinen Erläuterungen entsprechend verwiesen.

### B.1 Einfaches Beispiel

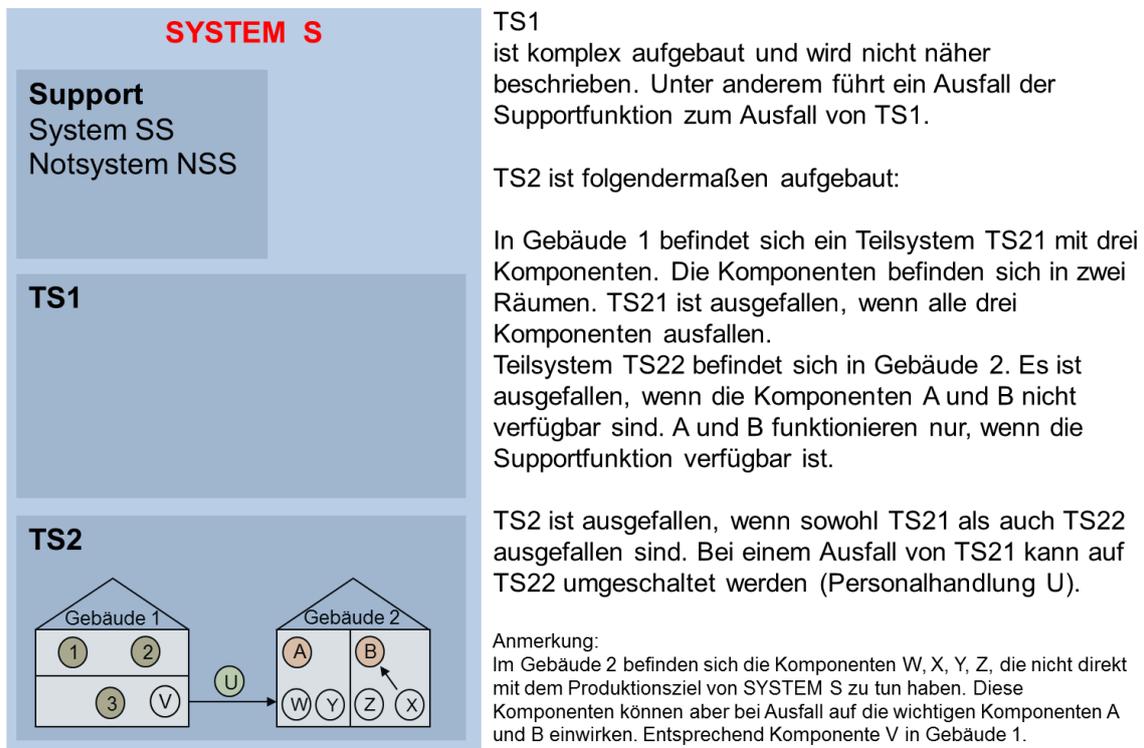
Es ist ein komplexes technisches System S in Hinblick auf mögliche, vom System ausgehende Gefahrensituationen zu analysieren (siehe Abb. B.1).



**Abb. B.1** Aufbau eines technischen Systems S

Das System besteht aus den Teilsystemen TS1 und TS2, deren Funktion von einem Hilfssystem SS abhängt. Bei Ausfall des Hilfssystems SS steht das System NSS redundant zur Verfügung. Das Teilsystem TS1 ist ein aktives System. Bei Ausfall von TS1 wird automatisch auf Teilsystem TS2 umgeschaltet. Dadurch wird das Erreichen des Produktionsziels gewährleistet. Gelingt nach Ausfall von TS1 die Umschaltung auf TS2 nicht oder ist aus irgendeinem Grund TS2 nicht verfügbar, entsteht eine Gefahrensituation.

tion. Es besteht die Aufgabe, die jährliche Häufigkeit von Gefahrensituationen zu bewerten.



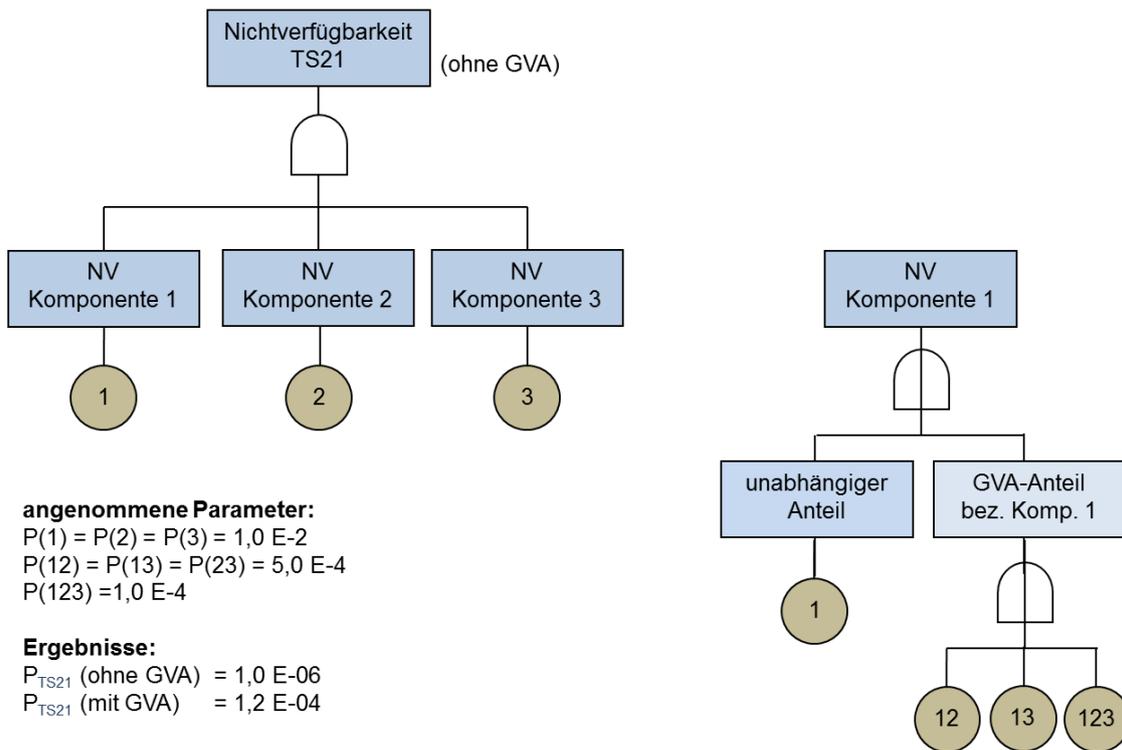
**Abb. B.2** Aufbau der Teilsysteme TS1 und TS2

Sowohl der Aufbau von TS1 als auch der Aufbau der Hilfssysteme SS und NSS wird hier nicht näher beschrieben. Das Teilsystem TS2 ist in zwei Gebäuden untergebracht. TS2 besteht wiederum aus zwei Teilsystemen TS21 und TS22. TS21 ist ein Parallelsystem aus drei Komponenten, TS22 ein Parallelsystem aus zwei Komponenten. TS22 funktioniert nur, wenn die Funktion der Hilfssysteme gewährleistet wird. Bei Ausfall von T21 kann die Funktion von TS2 durch eine Umschaltung auf TS22 gewährleistet werden. Diese Umschaltung erfolgt nicht automatisch, sondern per Hand durch das Personal.

Nachfolgend wird beispielhaft beschrieben wie die Unverfügbarkeit eines Systems mit der Fehlerbaumethode bestimmt werden kann und welche Ausfallabhängigkeiten dabei im Fall übergreifender Einwirkungen berücksichtigt werden müssen. Als Beispiel wird das Teilsystem TS21 in Gebäude 1 betrachtet.

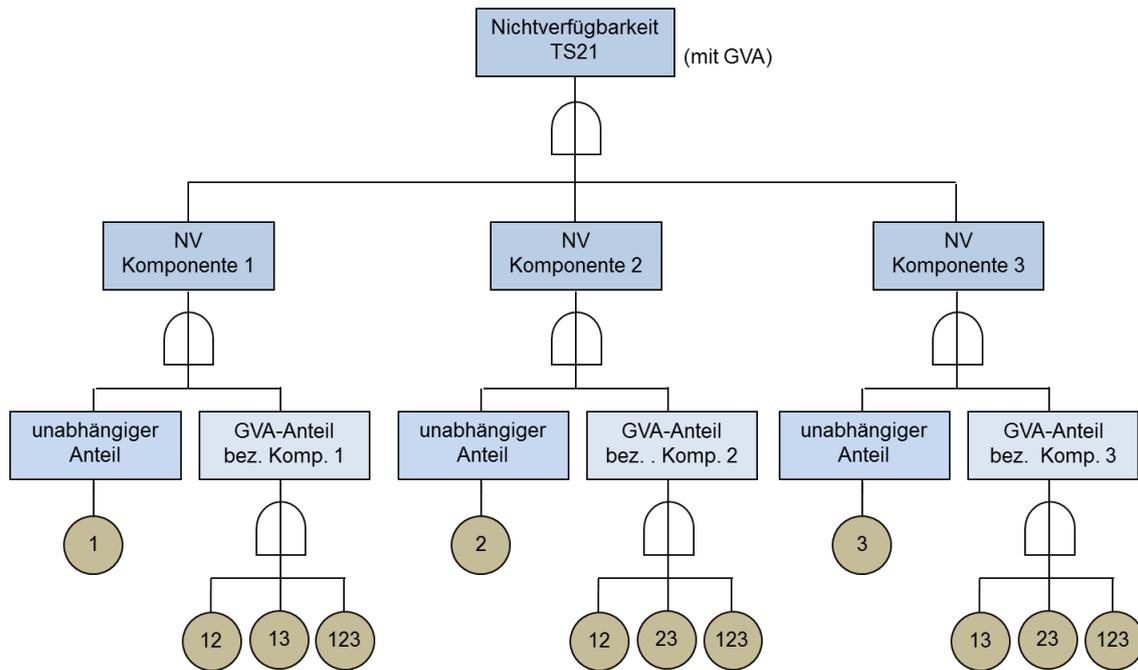
In Abb. B.3 ist die Bestimmung der Nichtverfügbarkeit eines Parallelsystems mit drei Komponenten mit der Fehlerbaumethode graphisch dargestellt. Im linken Fehler-

baum wurde angenommen, dass die Komponenten nur unabhängig voneinander ausfallen können. Gehören die Komponenten 1, 2 und 3 zu einer GVA-Gruppe, d. h. es kann nicht angenommen werden, dass sie unabhängig voneinander ausfallen, erweitert sich der Fehlerbaum wesentlich. Im rechten Fehlerbaum von Abb. B.3 ist das beispielhaft für Komponente 1 gezeigt.



**Abb. B.3** Nichtverfügbarkeit eines Parallelsystems (TS21)

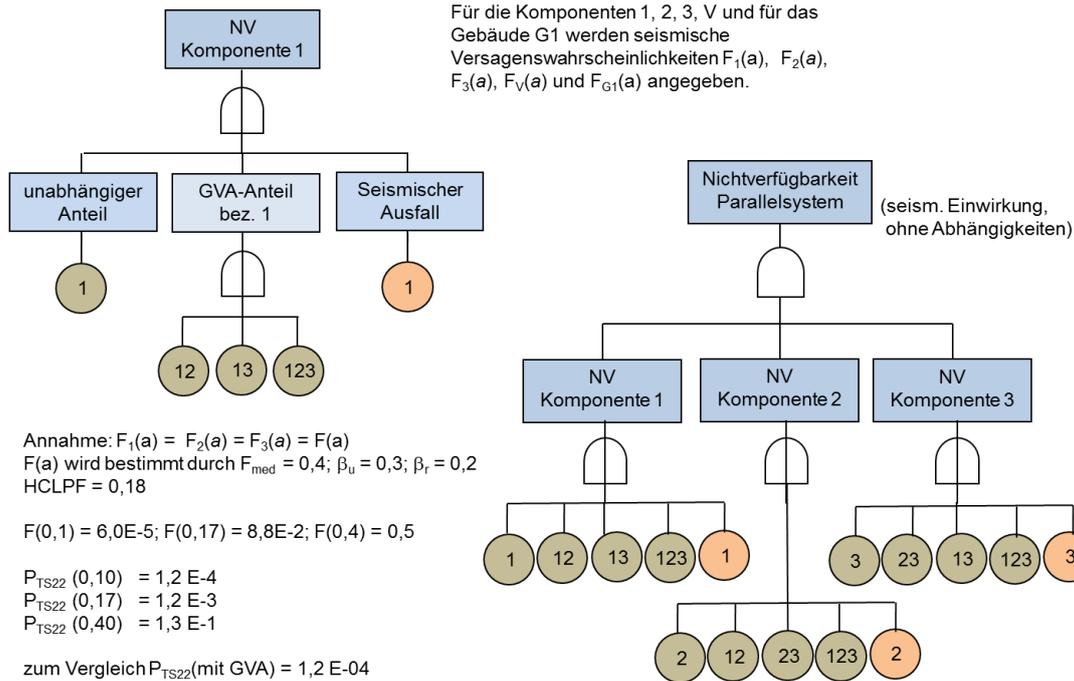
Auf die Bestimmung der Ausfallwahrscheinlichkeiten wird hier nicht eingegangen. In Abb. B.3 sind einige Werte angegeben.  $P(1)$  steht für die Ausfallwahrscheinlichkeit der Komponente 1,  $P(12)$  für die Wahrscheinlichkeit eines gemeinsamen Ausfalls der Komponenten 1 und 2 und  $P_{\text{TS22}}$  für die Ausfallwahrscheinlichkeit des Teilsystems TS22.



**Abb. B.4** Nichtverfügbarkeit eines Parallelsystems (TS21) mit GVA

Was ist bei der Berechnung der Nichtverfügbarkeit von TS21 zu beachten, wenn übergreifende Einwirkungen zu berücksichtigen sind?

In Abb. B.5 ist am Beispiel seismischer Einwirkungen dargestellt, wie der Systemfehlerbaum zu erweitern ist, wenn auch Ausfälle auf Grund seismischer Einwirkungen berücksichtigt werden müssen. In einem ersten Schritt werden nur unabhängige seismische Ausfälle berücksichtigt.



**Abb. B.5** Nichtverfügbarkeit von TS21 bei seismischer Einwirkung (ohne Berücksichtigung seismisch bedingter Abhängigkeiten)

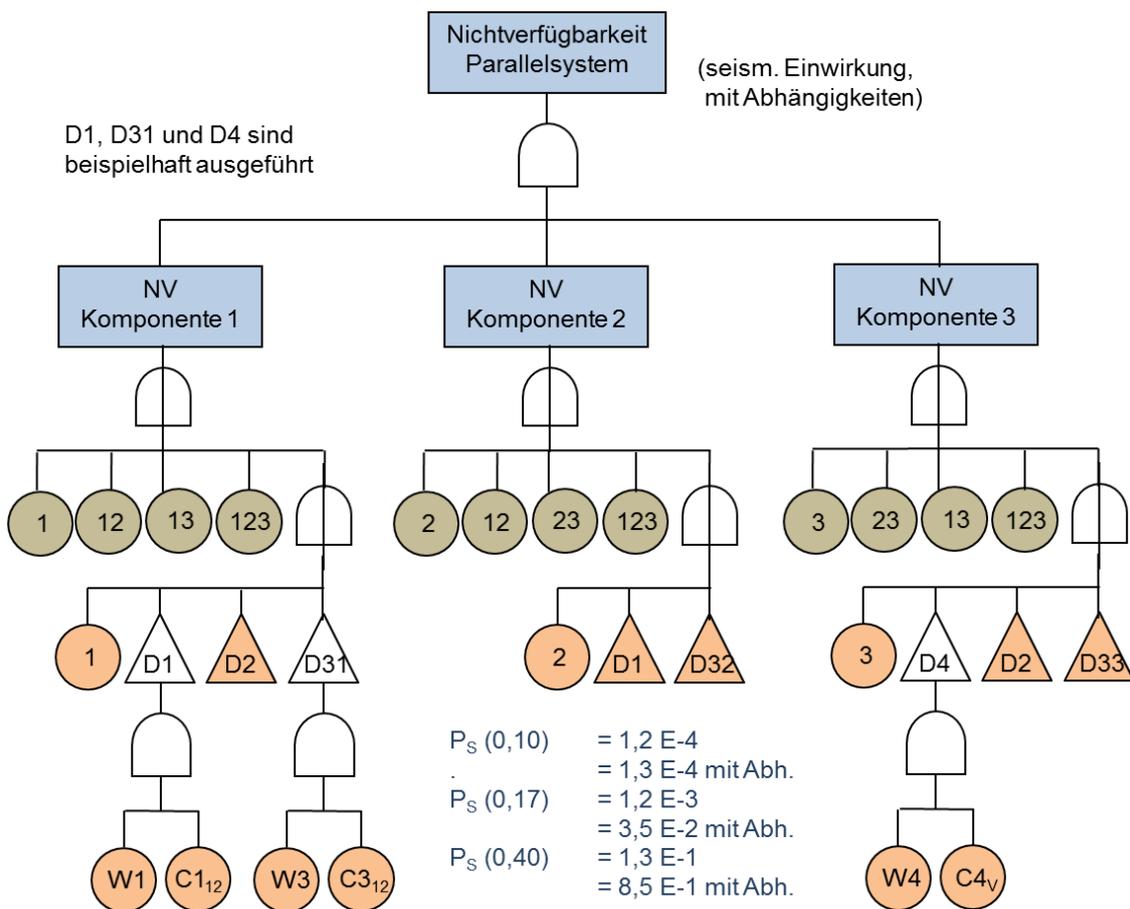
Dazu werden in Abhängigkeit von der Intensität des Erdbebens die Ausfallwahrscheinlichkeiten der Komponenten benötigt. Im Beispiel wird angenommen, dass der seismische Ausfall für alle drei Komponenten derselben Fragilityfunktion genügt. Der HCLPF-Wert beträgt 0,18 g (max. Freifeldbeschleunigung). Ein Erdbeben mit maximaler Freifeldbeschleunigung von 0,1 g macht sich noch nicht in der Nichtverfügbarkeit des Systems bemerkbar,  $P_{TS22}(0,1) = 1,2 E-04$ .

Eine seismische Einwirkung ist nicht realistisch beschrieben, wenn entsprechende Ausfälle nur unabhängig voneinander beschrieben werden. Im vorliegenden Beispiel werden die Abhängigkeiten D1 bis D4 aus Tab. B.1 einbezogen (siehe Abb. B.6). Das Beispiel zeigt, wie ein Fehlerbaum durch die korrekte Einbeziehung von Ausfällen, die durch übergreifende Ereignisse hervorgerufen werden, nicht trivial erweitert werden muss.

**Tab. B.1** Ausfallabhängigkeiten in Gebäude 1

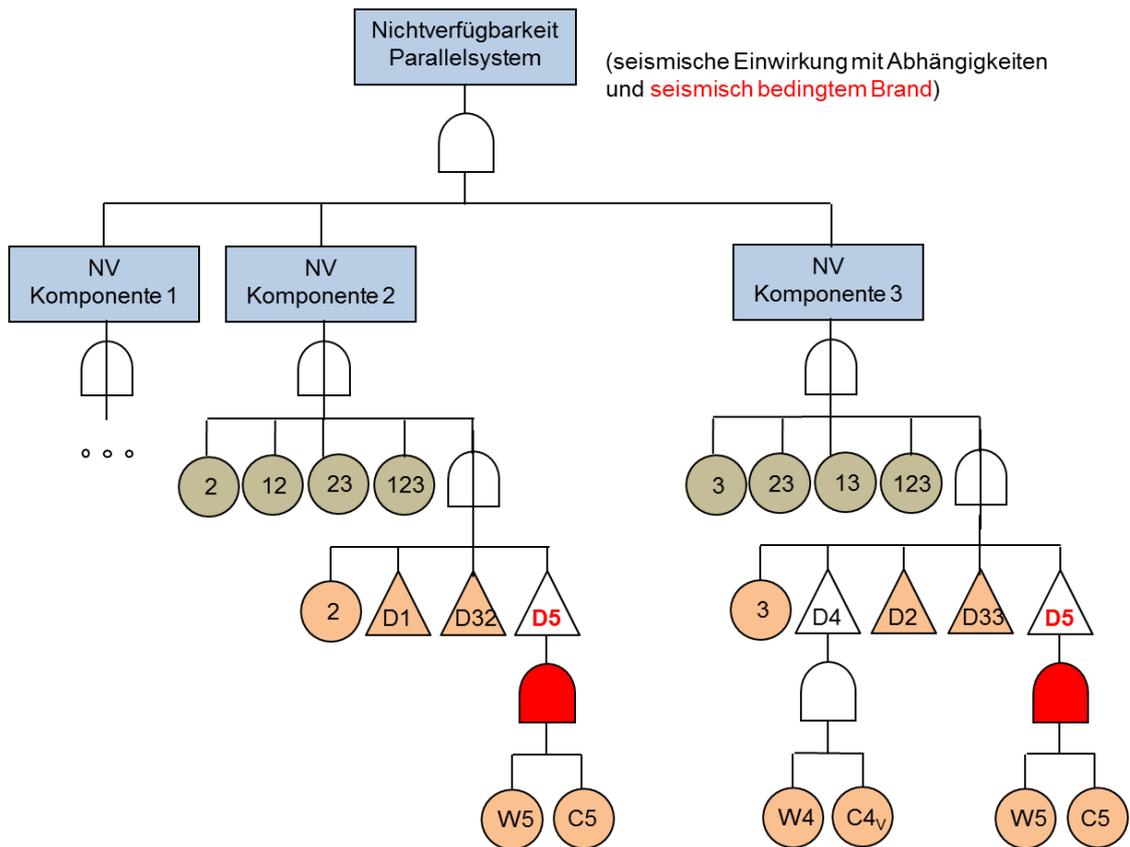
Bezeichnung	Beschreibung
D1	<p>Abhängigkeitsmodell {M1, A1, C1}</p> <p>A1 – Die Abhängigkeit ergibt sich daraus, dass die Komponenten im gleichen Gebäude 1 auf derselben Ebene angeordnet sind. Daraus ergibt sich eine Belastungsabhängigkeit. Die Wirksamkeitsfunktion dieser Abhängigkeit sei <math>W1(a)</math>, hier: <math>W1(a) = F(a)</math>.</p> <p><math>M1 = \{1, 2\}</math></p> <p>Die Wahrscheinlichkeit des gleichzeitigen Ausfalls aller Elemente von M1 beträgt 1.</p> <p><math>C1_{12} = 1</math></p>
D2	<p>Abhängigkeitsmodell {M2, A2, C2}</p> <p>A2 – Die Abhängigkeit ergibt sich daraus, dass die Komponenten typgleich sind. Daraus ergibt sich eine Belastbarkeitsabhängigkeit. Die Wirksamkeitsfunktion dieser Abhängigkeit sei <math>W2(a)</math>, hier: <math>W2(a) = F(a)</math>.</p> <p><math>M2 = \{1, 3\}</math></p> <p>Die Wahrscheinlichkeit des gleichzeitigen Ausfalls aller Elemente von M2 beträgt 1.</p> <p><math>C2_{13} = 1</math></p>
D3	<p>Abhängigkeitsmodell {M3, A3, C3}</p> <p>A3 – Die Abhängigkeit ergibt sich daraus, dass die Komponenten im gleichen Gebäude 1 angeordnet sind. Daraus ergibt sich eine Ausfallabhängigkeit bei Gebäudeschaden. Die Wirksamkeitsfunktion dieser Abhängigkeit sei <math>W3(a)</math>.</p> <p><math>F_G(a)</math> wird bestimmt durch <math>F_{med} = 0,5</math>; <math>b_u = 0,3</math>; <math>b_r = 0,2</math></p> <p>HCLPF = 0,22</p> <p><math>F_G(0,1) = 4,2E-6</math>; <math>F_G(0,17) = 1,4E-3</math>; <math>F_G(0,4) = 0,27</math></p> <p><math>M3 = \{1, 2, 3\}</math></p> <p><math>C3_3 = 0,8</math> Wahrscheinlichkeit, dass A3 zum Ausfall von Komponente 3 führt.</p> <p><math>C3_{12} = 1,0</math> Wahrscheinlichkeit, dass A3 zum Ausfall von Komponente 1 und 2 führt.</p>
D4	<p>Abhängigkeitsmodell {M4, A4, C4}</p> <p>A4 – Die Abhängigkeit ergibt sich aus einem seismischen Schaden von Komponente V.</p> <p>Die Wirksamkeitsfunktion dieser Abhängigkeit sei <math>W4(a) = F_V(a)</math>.</p> <p><math>F_V(a)</math> wird bestimmt durch <math>F_{med} = 0,2</math>; <math>b_u = 0,3</math>; <math>b_r = 0,2</math></p> <p>HCLPF = 0,088</p> <p><math>F(0,1) = 2,7E-2</math>; <math>F(0,17) = 3,3E-1</math>; <math>F(0,4) = 0,97</math></p> <p><math>M4 = \{V\}</math></p> <p><math>C4_v = 0,5</math> Wahrscheinlichkeit, dass A4 zum Ausfall von Komponente 3 führt.</p>

Bezeichnung	Beschreibung
D5	<p>Abhängigkeitsmodell {M5, A5, C5}</p> <p>A5 – Die Abhängigkeit ergibt sich aus einem seismisch bedingten Brand im unteren Raum von Gebäude 1.</p> <p>Die Wirksamkeitsfunktion dieser Abhängigkeit sei <math>W5(a)</math>. Das ist die bedingte Wahrscheinlichkeit eines Brandes im unteren Raum von Gebäude 1 auf Grund eines Erdbebens der Stärke <math>a</math>.</p> <p><math>M5 = \{2, 3\}</math></p> <p><math>C5(a) =</math> Wahrscheinlichkeit, dass Löschkaktionen versagen.</p> <p>Es gilt <math>F_{\text{BRAND}}(a) = W5(a) \times C5</math></p>



**Abb. B.6** Nichtverfügbarkeit von TS22 bei seismischer Einwirkung (mit Berücksichtigung der seismisch bedingten Abhängigkeiten D1 bis D4)

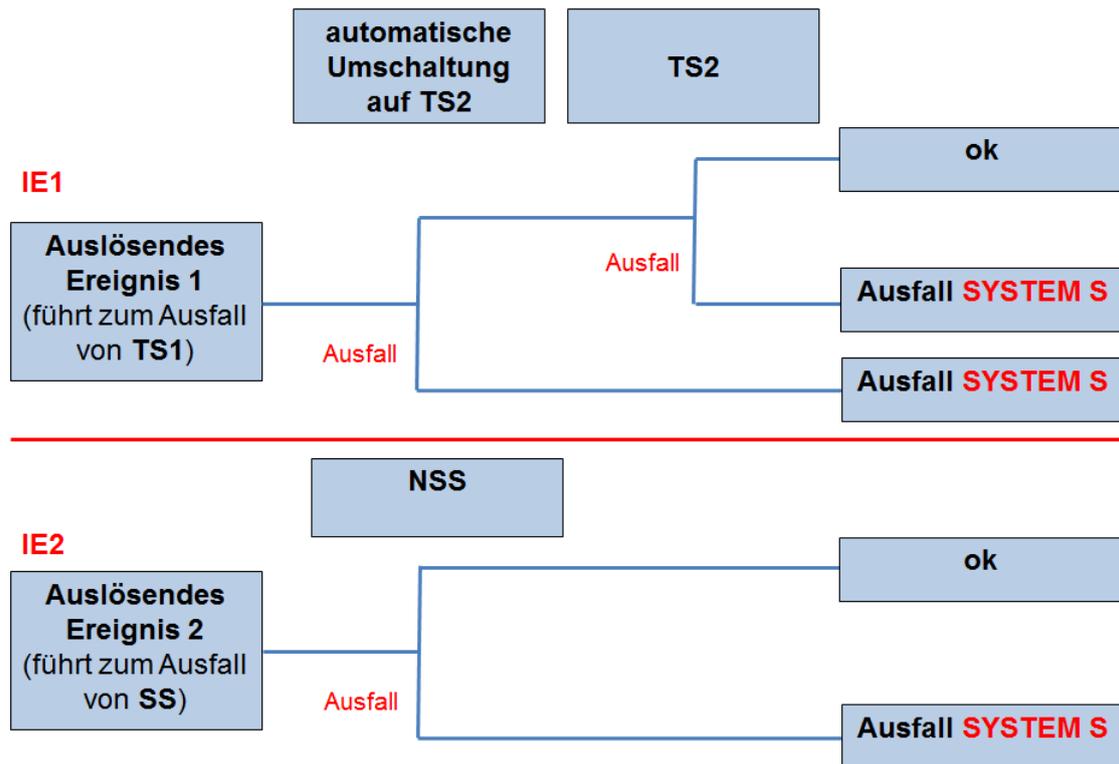
In Abb. B.7 wird eine weitere Ergänzung vorgenommen, indem seismisch bedingte Brände berücksichtigt werden.



**Abb. B.7** Nichtverfügbarkeit von TS22 bei seismischer Einwirkung und der Berücksichtigung eines Folgebrandes

Es wurde bei einer Begehung festgestellt, dass im unteren Raum von Gebäude 1 ein seismisch bedingter Brand auftreten kann. Ein nicht gelöschter Brand führt zum Ausfall von Komponente 3 (der vom Brand betroffene Raum enthält Komponente 3) und zum Ausfall von Komponente 2 (der vom Brand betroffene Raum enthält Kabel von Komponente 2).

Kehren wir zur Analyseaufgabe zurück. Es ist ein komplexes technisches System S in Hinblick auf mögliche, vom System ausgehende Gefahrensituationen zu analysieren (siehe Abb. B.1). Es sind zwei auslösende Ereignisse bekannt, die unter gewissen Bedingungen zum Ausfall des Systems S und damit zu einem Gefährdungszustand führen können (siehe Abb. B.8).



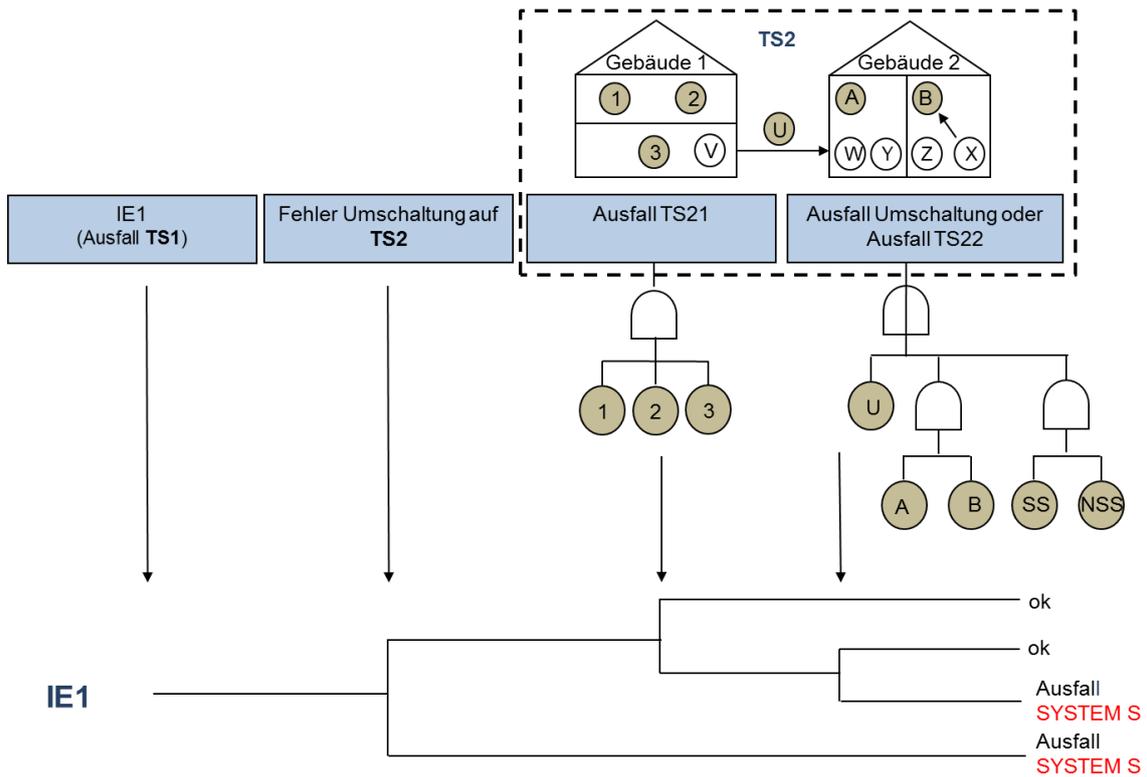
**Abb. B.8** Auslösende Ereignisse

Ein auslösendes Ereignis IE1 führt zum Ausfall von TS1. Ein Systemausfall und damit ein Gefährdungszustand kann nur verhindert werden, wenn die automatische Umschaltung auf das Teilsystem 2 funktioniert und TS2 verfügbar ist (siehe Abb. B.1).

Ein zweites auslösendes Ereignis IE2 führt zum Ausfall des Supportsystems SS. Kann das redundante Notsupportsystem NSS die Funktion von SS übernehmen, kommt es zu keinem Ausfall des Systems S (siehe Abb. B.1).

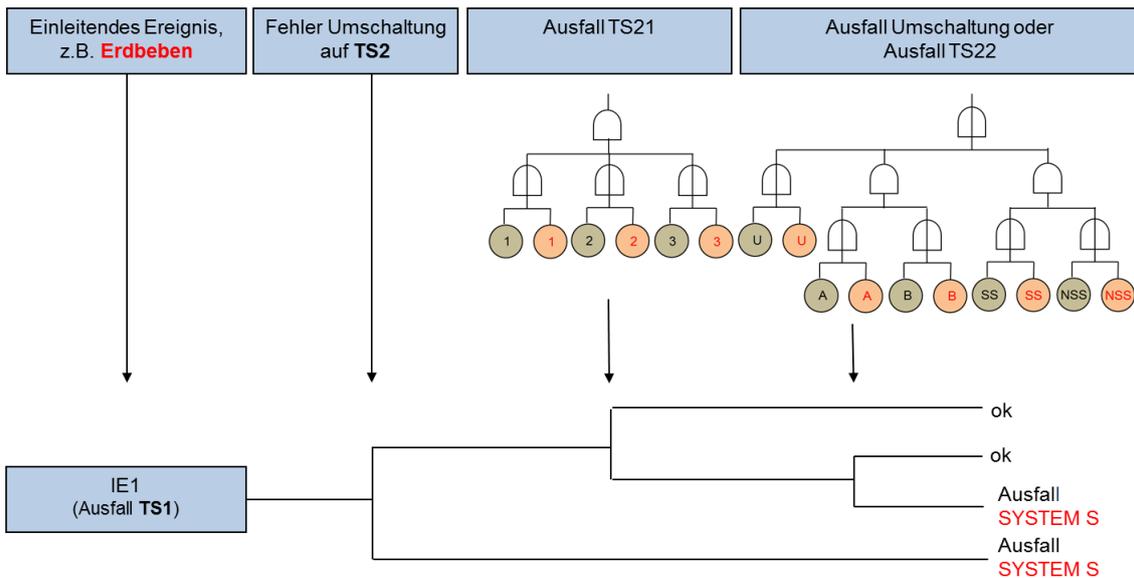
In Abb. B.9 ist das Zusammenspiel von Ereignisablaufanalyse und Fehlerbaumbetrachtung dargestellt. Bei den zwei dargestellten Fehlerbäumen ist vereinfacht angenommen, dass keine Abhängigkeiten im Ausfallverhalten der einzelnen Komponenten zu berücksichtigen sind. Der Fehlerbaum zum Ausfall des Teilsystems TS22 besagt, dass ein Ausfall vorliegt, wenn

- die Umschaltung von TS21 auf TS22 nicht gelingt (Personalhandlung),
- die Komponenten A und B ausfallen oder
- sowohl das Supportsystem SS als auch das Notsupportsystem NSS nicht zur Verfügung steht.



**Abb. B.9** Ereignisablaufanalyse für ein auslösendes Ereignis IE1 (vgl. Abb. B.8)

Übergreifende Einwirkungen sind einleitende Ereignisse. In Abhängigkeit von der Stärke (z. B. Erdbeben) oder vom Ort (z. B. Brand) der Einwirkung kann das einleitende Ereignis in ein oder mehrere auslösende Ereignisse übergehen. In Abb. B.10 ist gezeigt, wie das Ereignisablaufmodell zur Berechnung der Häufigkeit des Ausfalls von Systems S bzw. der jährlichen Häufigkeit von Gefahrensituationen, die von S ausgehen, geändert werden muss, wenn das auslösende Ereignis nicht zufällig, sondern als Folge eines einleitenden übergreifenden Ereignisses eintritt. Wie in Abb. B.5 werden bei der Erweiterung der Fehlerbäume vereinfachend keine seismischen Ausfallabhängigkeiten einbezogen. Die rot gekennzeichneten Basisereignisse stehen für den seismisch bedingten Ausfall der entsprechenden Komponente.



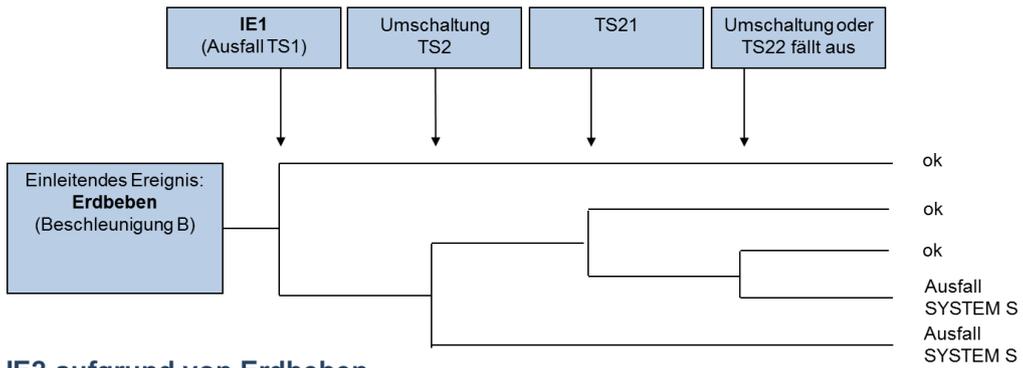
**Abb. B.10** Ereignisablaufanalyse für seismisch bedingtes auslösendes Ereignis IE1

In PSA der Stufe 1 treten auslösende Ereignisse unabhängig voneinander ein. Das Gesamtrisiko für ein Kernkraftwerk ergibt sich bei einer Analyse der unabhängigen auslösenden Ereignisse aus der Summe der Risiken für jedes auslösende Ereignis. Bei übergreifenden Einwirkungen sind folgende Möglichkeiten zu betrachten (hier für zwei störfallauslösende Ereignisse):

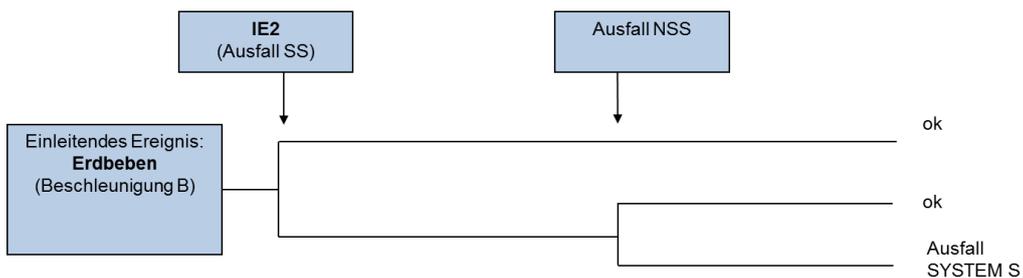
- Durch das einleitende übergreifende Ereignis wird kein auslösendes Ereignis hervorgerufen.
- Es wird ein auslösendes Ereignis IE1 (IE2) hervorgerufen.
- Es werden die auslösenden Ereignisse IE1 und IE2 hervorgerufen, dabei ist zu unterscheiden (und getrennt zu bewerten):
  - unabhängiges (nahezu gleichzeitiges) Auftreten,
  - gleichzeitiges Auftreten auf Grund eines gemeinsamen einleitenden Ereignisses und
  - IE1 (IE2) ist Folgeereignis (mit gewisser Wahrscheinlichkeit) von IE2 (IE1).

In Abb. B.11 sind die Ereignisabläufe für IE1 und IE2 unabhängig voneinander beschrieben.

### IE1 aufgrund von Erdbeben



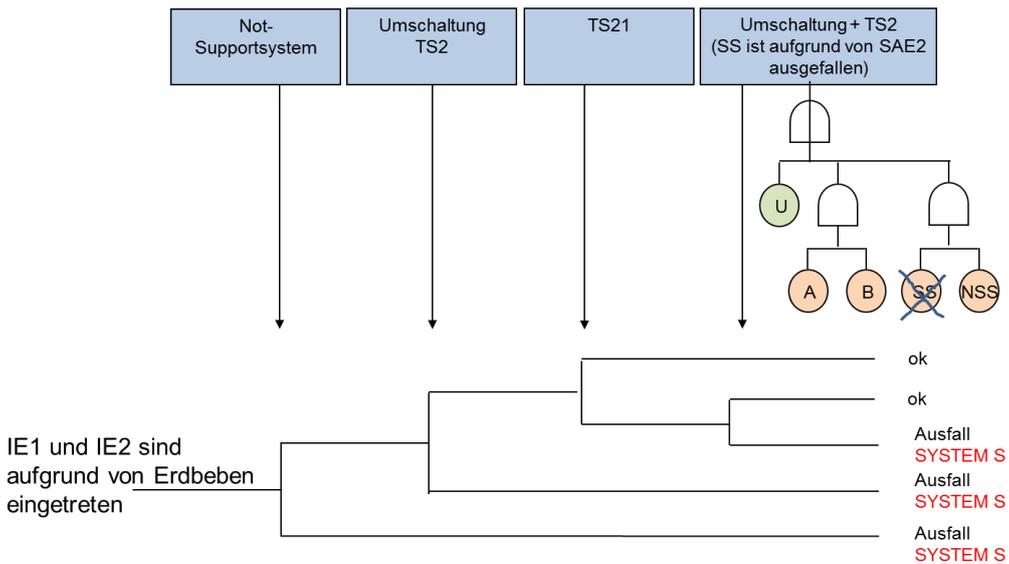
### IE2 aufgrund von Erdbeben



**Abb. B.11** IE1 und IE2 treten unabhängig auf Grund eines seismischen Ereignisses (Intensität B) ein

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, das gemeinsame Auftreten von IE1 und IE2 zu modellieren.

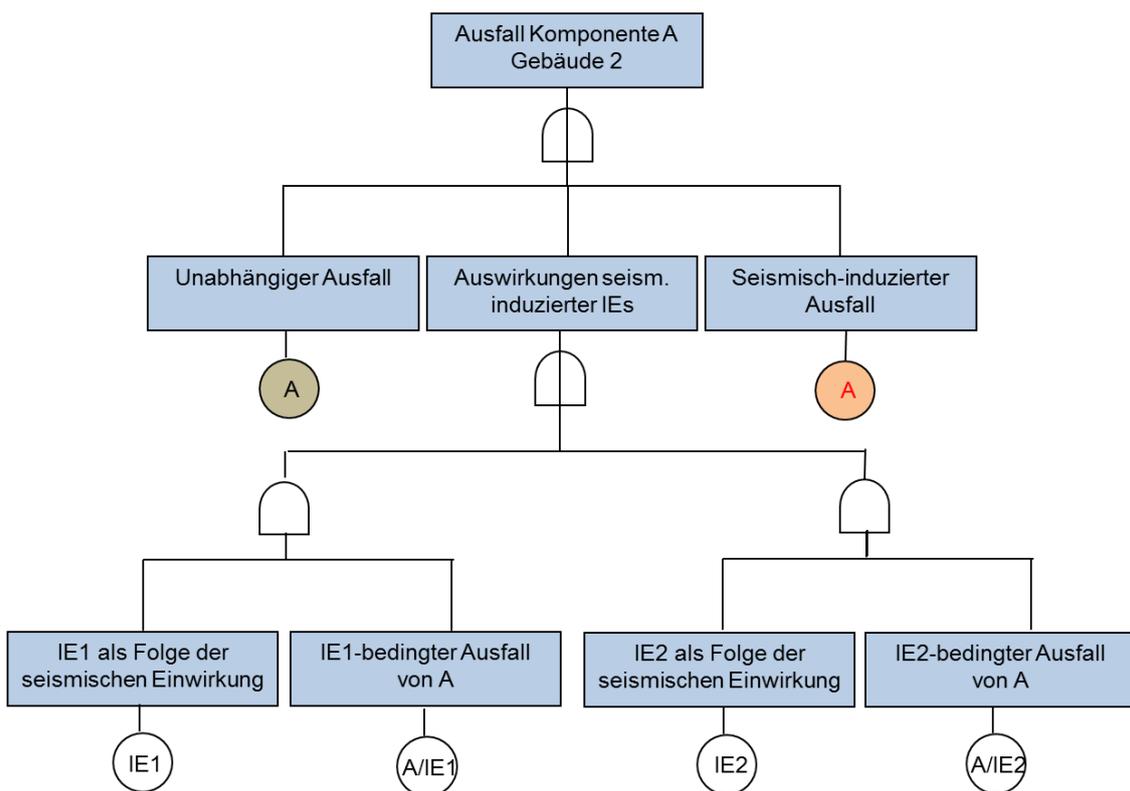
**Abb. B.12** zeigt einen entsprechenden Ereignisbaum.



**Abb. B.12** Ereignisbaummodellierung: IE1 und IE2 treten auf Grund eines seismischen Ereignisses gleichzeitig auf

Es muss darauf hingewiesen werden, dass das Aufstellen solcher Ereignisbäume für reale Fälle kompliziert ist, insbesondere bei mehr als zwei parallel auftretenden Ereignissen. Im vorliegenden Fall ist darauf zu achten, dass das Supportsystem SS durch IE2 ausgefallen ist und somit auch nicht zur Beherrschung von IE1 zur Verfügung steht.

Neben der Methode des Verkettens von Ereignisbäumen gibt es noch die Möglichkeit, die Abhängigkeiten zwischen mehreren auslösenden Ereignissen auf der Fehlerbaumebene zu beschreiben (vgl. /KLU 15/ und Abb. B.13), siehe dazu auch die Erläuterungen zum Abhängigkeitsmodell in Kapitel 3. Dazu werden die Fehlerbäume für jeden Ausfall einer BSK erweitert. Es wird zum einen gefragt, ob ein auslösendes Ereignis aufgetreten ist und zum anderen, ob die entsprechende BSK mit welcher Wahrscheinlichkeit ausgefallen ist. Für die Komponente A in Gebäude 2 würde sich das dann wie in Abb. B.13 darstellen, wenn zwei störfallauslösende Ereignisse IE1 und IE2 zu betrachten sind.



**Abb. B.13** Fehlerbaummodellierung: IE1 und IE2 treten auf Grund eines seismischen Ereignisses gleichzeitig auf (nur Komponente A)

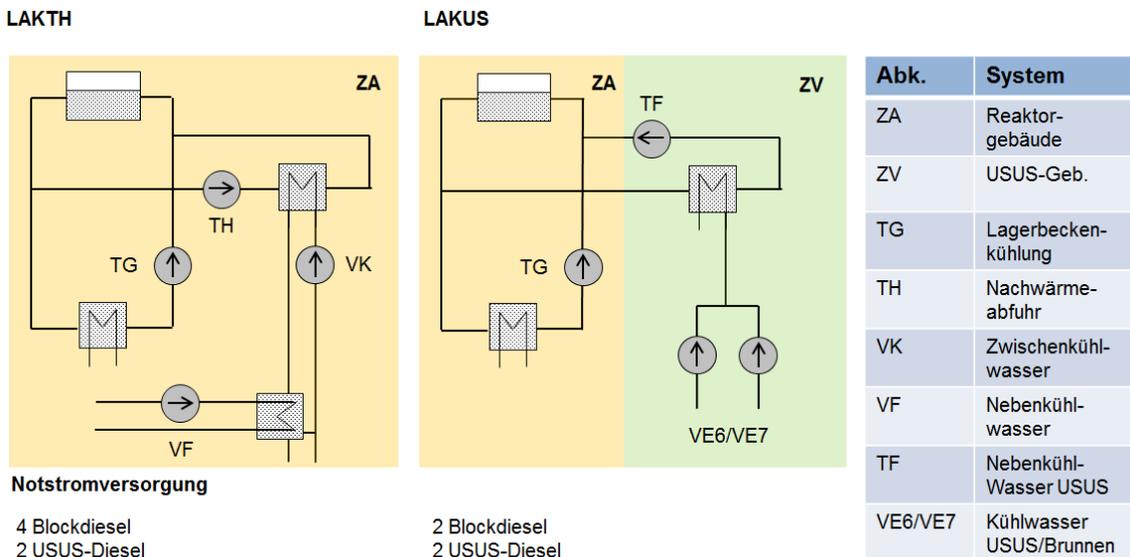
## B.2 Beispiele aus PSA für übergreifende Einwirkungen

### B.2.1 Durchführung einer Brand-PSA

Nachfolgend wird die Vorgehensweise bei der Durchführung einer vergleichenden Brandanalyse zusammengefasst dargestellt, siehe auch /BAB 13/. Dabei konnte erstmalig das systematische Vorgehen zur Fehlerbaumergänzung unter Einbeziehung von Ausrüstungs- und Abhängigkeitslisten angewendet werden.

Ergänzend zu einer vergleichenden probabilistischen Analyse zur Gefährdung der Brennelemente(BE)-Lagerbeckenkühlung durch interne störfallauslösende Ereignisse (SAE) in der Nachbetriebsphase waren entsprechende Untersuchungen zu möglichen Brandgefährdungen durchzuführen. Dabei handelte es sich nicht um eine vollständige Brand-PSA, sondern ausschließlich um den Vergleich der folgenden zwei Varianten der Brennelemente-Lagerbeckenkühlung (siehe auch Abb. B.14):

- (1) Die Lagerbeckenkühlung erfolgt wie bisher (LAKTH).
- (2) Es wurde ein USUS-Umschluss vorgenommen (LAKUS).



**Abb. B.14** Varianten der Lagerbeckenkühlung

Für den USUS-Umschluss werden die Saugleitungen des Lagerbeckenkühlsystems TG31/TG41 mit den Saugleitungen der USUS-Nachkühlstränge TF11/TF21 verbunden. Auf der Druckseite der USUS-Nachkühlstränge TF12/TF22 wird eine Verbindung auf

die Druckseite der TH-Nachkühlstränge TH35/TH45 geschaffen, die eine Verbindung zum Lagerbeckenkühlsystem TG31/TG41 haben.

Es war die Änderung des brandbedingten Risikos der Brennelemente-Lagerbeckenkühlung durch den USUS-Umschluss zu bewerten. Als Vergleichsgröße wurde die jährliche Häufigkeit der Brennstabschadenszustände herangezogen.

Es wurde die in den vorherigen Kapiteln dargestellte Methode der Fehlerbaumerweiterung angewendet. Brandausbreitungen wurden nicht modelliert.

Aus der Brandanalyse für den Leistungsbetrieb der entsprechenden Referenzanlage waren die Nachbarschaftsbeziehungen der Räume bekannt und alle Brandübergangswahrscheinlichkeiten bestimmt. Eine Brand-Abhängigkeitsliste *F-DL* konnte aufgestellt werden, allerdings hat sich bei der Brand-PSA im Leistungsbetrieb /BAB 05/ gezeigt, dass kein relevanter Beitrag zu den Kernschadenshäufigkeiten durch Brandausbreitung festzustellen ist.

Es wurden prinzipiell für alle in /der PSA für die Nachbetriebsphase modellierten Komponentenausfälle zusätzlich brandbedingte Ausfälle berücksichtigt. Die Erweiterung der Fehlerbäume erfolgte durch ein in der GRS entwickeltes Programm.

Für die zu verwendenden Zuverlässigkeitsmodelle brandbedingter Ausfälle wurde zwischen den Anlagenbetriebszuständen mit und ohne Freischaltungen unterschieden:

- Für Anlagenbetriebszustände mit Freischaltungen wurden die brandbedingten Ausfälle während der Zeitdauer des jeweiligen Zustandes berücksichtigt.
- Für Anlagenbetriebszustände ohne Freischaltungen („störungsfreie Nachbetriebsphase“) wurden die brandbedingten Ausfälle als selbstmeldende Ausfälle mit einer Ausfallrate und einer Reparaturzeit modelliert. Das bedeutet, dass die Komponenten im Raum mit der postulierten Brandeintrittshäufigkeit ausfallen und im Mittel für die angenommene Reparaturzeit unverfügbar bleiben.

Im ersten Fall wurde unterstellt, dass eine geplante Freischaltung nur erfolgt, wenn zu Beginn der Freischaltung kein Brand vorliegt. Dem zweiten Fall liegt die Annahme zugrunde, dass nach Eintritt eines Brandes bzw. eines Brandschadens Komponenten repariert werden können bzw. ein Systemzustand hergestellt werden kann, der bezüglich der Zuverlässigkeit der Beckenkühlung dem ursprünglichen Systemzustand (LAKUS bzw. LAKTH) entspricht.

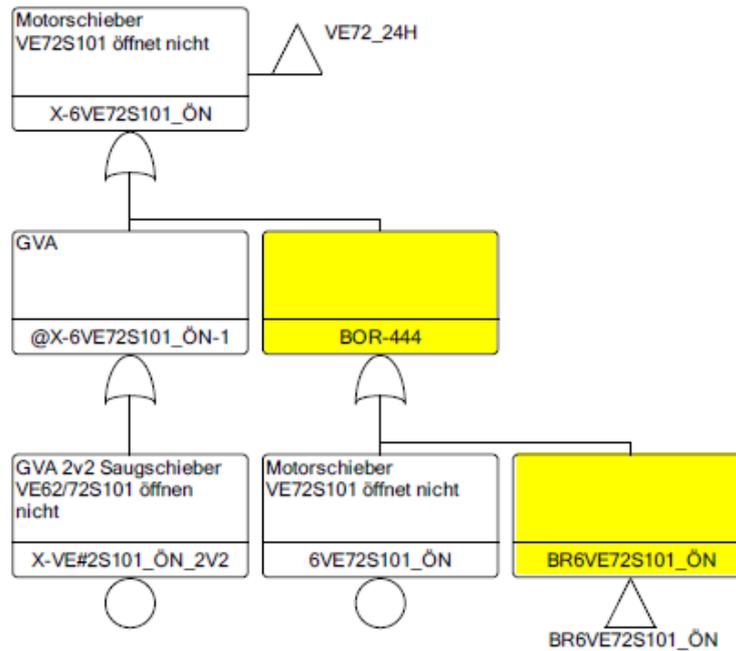
Für die Rechnungen wurde auf die räumlichen Brandeintrittshäufigkeiten pro Jahr aus /BAB 05/ zurückgegriffen. Es gibt eine Reihe von Räumen, die in /BAB 05/ nicht berücksichtigt wurden, weil diese, auf den Leistungsbetrieb bezogen, keine PSA-Komponenten enthielten oder die Brandbelastung weniger als 90 MJ/m<sup>2</sup> betrug.

Für die vorliegende Vergleichsanalyse wurden folgende Annahmen getroffen: In Räumen mit PSA-Komponenten und einer Brandbelastung von weniger als 90 MJ/m<sup>2</sup> kann kein Brand entstehen. Ist die Brandbelastung größer als 90 MJ/m<sup>2</sup> wird als Brandeintrittshäufigkeit der entsprechende Gebäudewert genutzt. Die räumlichen Brandeintrittshäufigkeiten werden /BAB 05/ bzw. /BAB 11/ entnommen. Das Vorgehen ist detailliert in /BAB 13/ erläutert.

Das elektronische PSA-Anlagenmodell wurde um Fehlerbaumverknüpfungen für brandbedingte Komponenten- und Kabelausfälle erweitert, die zugehörigen Zuverlässigkeitsdaten wurden ergänzt. Die vorgelegten Rechenspezifikationen wurden nicht verändert, so dass diese Rechnungen (ohne Berücksichtigung von Brand) auch im erweiterten Projekt zu denselben Ergebnissen führten wie im ursprünglichen Projekt.

Die für die Brandanalysen zusätzlichen Verknüpfungen wurden im Prinzip für alle im vorliegenden Projekt modellierten Komponentenausfälle vorgenommen. Im ursprünglichen Projekt wurden für jedes der modellierten Basisereignisse (Komponentenausfälle, Ausfälle von Handmaßnahmen) alle Gatter gesucht, in die diese Basisereignisse eingehen. Die Eingänge dieser Gatter wurden folgendermaßen geändert:

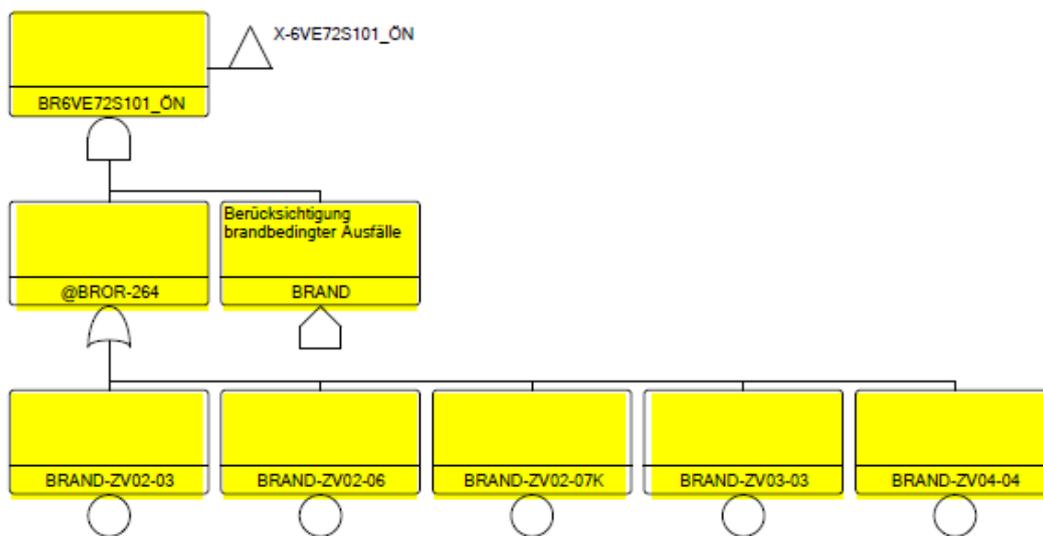
Anstelle des ursprünglich modellierten Basisereignisses für den Komponentenausfall wurde ein neues ODER-Gatter gesetzt, das den Namen *BOR-* (wie *Brand OR-Gatter*) gefolgt von einer automatisch vergebenen Nummer erhielt. In dieses ODER-Gatter geht neben dem ursprünglichen Basisereignis ein Transfer-UND-Gatter mit allen für diese Komponente relevanten Brand-Basisereignissen ein (vgl. Abb. B.15 und Abb. B.16). Jedes einzelne Brand-Basisereignis repräsentiert dabei die Brandhäufigkeit in einem der Räume, in dem sich die Komponente selbst oder ein zugehöriges Kabel befinden.



**Abb. B.15** Geänderter Fehlerbaum  $X-6VE72S101\_ÖN$  mit neuem Gatter  $BOR-444$  und neuem Transfer  $B6VE72S101\_ÖN$

Für jedes Basisereignis der ursprünglichen Fehlerbäume, das einen zufallsbedingten Komponentenausfall repräsentiert, wurde das Transfer-Gatter für die brandbedingten Ausfälle in einem eigenen Fehlerbaum gebildet.

Die Erweiterung des Fehlerbaums zur Modellierung der brandbedingten Ausfälle erfolgte automatisch. Hierzu wurde das in der Programmiersprache RUBY erstellte Programm  $\langle RSBRAND \rangle$  genutzt (vgl. /HER 12/).



**Abb. B.16** Neuer Fehlerbaum *B6VE72S101\_ÖN* mit Verknüpfung für brandbedingte Ausfälle der Komponente *6VE72S101*

Als Eingabe für das Programm *<RSBRAND>* sind erforderlich:

- Elektronisches Anlagenmodell (RiskSpectrum®-Projekt),
- Brand Ausrüstungsliste *F-EL* (siehe Kapitel 2.3.2.5) mit zwei Spalten:
  - Basisereignisse mit Ausfällen, die brandbedingt auftreten können und
  - zugehörige Räume, in denen sich die Komponenten selbst oder deren Kabel befinden.

Die für die „Brand-Basisereignisse“ verwendenden Zuverlässigkeitsmodelle, Parameternamen und Zuverlässigkeitswerte wurden mit Hilfe der MS EXCEL®-Import-/Export-Funktionen im RiskSpectrum®-Projekt ergänzt.

Ergänzend zu einer vergleichenden probabilistischen Analyse zur Gefährdung der Brennelemente-Lagerbeckenkühlung durch interne störfallauslösende Ereignisse (SAE) in der Nachbetriebsphase waren entsprechende Untersuchungen zu möglichen Brandgefährdungen durchzuführen. Dabei waren die technischen Varianten LAKTH und LAKUS der Brennelement-Lagerbeckenkühlung zu untersuchen. Zielgröße des Vergleichs ist die jährliche Brennstabschadenshäufigkeit.

Die vergleichenden Untersuchungen setzten die Modelle, Analysen und Ergebnisse der probabilistischen Analyse zur Gefährdung der Brennelemente-Lagerbeckenkühlung durch interne SAE in der Nachbetriebsphase voraus.

Weiterhin wurde auf die Daten und Informationen aus der Brand-PSA für den Leistungsbetrieb /BAB 05/ und /FRE 07/ zurückgegriffen. Dies betraf insbesondere die räumliche Strukturierung der Anlagengebäude und Informationen zum Inventar (Kabel und Komponenten) der Räume.

Der Projektumfang gestattete nicht, brandspezifische Untersuchungen speziell zu den Anlagenbetriebszuständen der Nachbetriebsphase durchzuführen, das betraf insbesondere die Fragen zur raumbezogenen Eintrittshäufigkeit von Bränden, zur Brandausbreitung und zu den veränderten Möglichkeiten der Brandbekämpfung. Bei den quantitativen Berechnungen zur Häufigkeit von brandbedingten Schadenszuständen handelte es sich um Abschätzungen, denen insbesondere bei der Ermittlung der brandschutztechnischen Parameter und Kenngrößen die Randbedingungen des ungestörten Leistungsbetriebs zugrunde gelegt wurden.

Es war weiterhin im Projektrahmen nicht möglich, sogenannte Auslöserfehlerbäume aufzustellen. Dabei handelt es sich um Fehlerbäume, mit denen der Eintritt von auslösenden Ereignissen (hier: Notstromfall und Ausfall der Wärmeabfuhr) auf brandbedingte Komponentenausfälle zurückgeführt werden können.

Die Berechnungen und die Ergebnisse sind also nur zum Vergleich der Varianten LAKUS und LAKTH heranzuziehen.

Eine Nutzung des abgeleiteten Anlagenmodells für eine Brand-PSA der Nachbetriebsphase ist möglich, wenn die brandschutztechnischen Parameter den ABZ der Nachbetriebsphase angepasst werden und Auslöserfehlerbäume in das Anlagenmodell eingepasst werden.

Neben einer Grobanalyse der in den Varianten LAKUS und LAKTH relevanten Räumen und ihres Brandpotenzials wurde eine Analyse mit dem PSA-Programm RiskSpectrum® durchgeführt. Hierzu bildete das RiskSpectrum®-Anlagenmodell für die PSA der Stufe 1 für die Nachbetriebsphase die Grundlage für die Modellierung entsprechender brandspezifischer Erweiterungen. Zusätzlich zu den modellierten Zufallsausfällen der für LAKUS bzw. LAKTH relevanten Komponentenfunktionen wurden brand-

bedingte Ausfälle der Komponenten berücksichtigt. Hierzu wurden die Möglichkeiten von Brandausfällen recherchiert. Eine solche Suche verläuft auf Basis der räumlichen Strukturierung der relevanten Anlagengebäude. Eine Komponente fällt durch Brand aus, wenn es in einem Raum zum Brand kommt, in dem sich die Komponente selbst oder Kabel der Komponente befinden. Nach entsprechender Anpassung der Nomenklaturen von Komponentenbezeichnungen in Basisereignissen und Inventarverzeichnissen konnte mit Hilfe eines Programms eine automatische Erweiterung der Fehlerbäume im ursprünglichen RiskSpectrum®-Anlagenmodell vorgenommen werden. Brandbedingte Ausfälle wurden somit bei den zur Beherrschung auslösender Ereignisse modellierten Systemfunktionen berücksichtigt. Entsprechend dem elektronischen PSA-Anlagenmodell fanden diese eingeschränkt auch bei den brandbedingten auslösenden Ereignissen Berücksichtigung.

Nach Bestimmung der entsprechenden Modellparameter, insbesondere der Häufigkeiten für brandbedingte Raumausfälle, konnte das erweiterte Anlagenmodell zur Berechnung der brandbedingten Brennstabschadenshäufigkeit genutzt werden.

Bei den Analysen wurde neben neu durchgeführten Abschätzungen zu den Brandhäufigkeiten auf die Ergebnisse der von der GRS durchgeführten Brand-PSA für dieses Kernkraftwerk im Leistungsbetrieb zurückgegriffen.

Als Ergebnisse der Konsequenz-Analysen für Schadenszustände erhielt man für die Systemvarianten LAKUS und LAKTH unter Berücksichtigung brandbedingter Ausfälle die folgenden Gesamtwerte der Häufigkeit für einen Brennstabschaden (Punktwerte):

- LAKUS: 2,4 E-07/a,
- LAKTH: 1,5 E-05/a .

Die vergleichende probabilistische Brandanalyse für die Nachbetriebsphase hat ergeben, dass auch unter Berücksichtigung des einleitenden Ereignisses Brand die Variante LAKUS einen wesentlich niedrigeren Häufigkeitswert für Brennstabschadenszustände als LAKTH aufweist. Es zeigte sich somit, dass die Systemvariante LAKUS bei den Brennstabschadenszuständen eine deutliche Verbesserung gegenüber LAKTH darstellt. Bei den genannten Schadenshäufigkeiten handelt es sich im Sinne der Aufgabenstellung des vorliegenden Vorhabens um Vergleichswerte, die nicht als Absolutwerte angesehen werden dürfen.

## **B.2.2 Modellierung seismischer Abhängigkeiten in deutschen SPSA**

Die systematische Durchführung einer HPSA umfasst drei Modellierungsebenen, die im Wesentlichen durch die verschiedene Behandlung von Abhängigkeiten voneinander abgegrenzt werden können: Ebene der übergreifenden Einwirkungen, Ebene der auslösenden Ereignisse und Ebene der BSK (siehe Kapitel 2.1.3). In den folgenden Unterkapiteln wurden SPSA deutscher Kernkraftwerke daraufhin angesehen, ob und wie die einzelnen Abhängigkeiten in die SPSA einbezogen wurden.

### **Beispiel KKW1**

Nachfolgende Ausführungen sind im Wesentlichen der SPSA für einen deutschen DWR (KKW1) entnommen, Zitate sind nicht gekennzeichnet. Man bezieht sich in dieser SPSA auf die Vorgaben in Teil 5 des US-amerikanischen Standards ASME/ANSRA-SA-2009 /ASM 09/ zu den Anforderungen an eine SPSA bei Leistungsbetrieb.

Die dortigen Randbedingungen und Anforderungen zur Behandlung von Abhängigkeiten auf BSK-Ebene (in /ASM 09/, Forderung SPR-B4 und zugehörige Bemerkung (3)) können wie folgt zusammengefasst werden:

Es ist eine Analyse von erdbebenbedingten Abhängigkeiten und Wechselbeziehungen (Korrelationen) so durchzuführen, dass jegliche Klassifizierung von Einrichtungen näherungsweise diesen Abhängigkeiten und Korrelationen Rechnung trägt. Es sind Koppungs- oder generische Korrelationsgrößen zu verwenden und es ist dafür eine geeignete Grundlage bereitzustellen. In der Bemerkung (3) Forderung SPR-B4 heißt es dazu weiter, dass es wesentlich ist, dass die Analyse die wichtigen Korrelationen zwischen erdbebenbedingten Ausfällen erfasst. Natürlich gilt dies für alle PSA, aber da das Erdbeben gleichzeitig alle Bauwerke, Systeme oder Komponenten oder Kombinationen davon mit der gleichen einlaufenden Bewegung beeinflusst, muss darauf bei der Durchführung einer Erdbeben-PSA besonderer Wert gelegt werden. Ein sinnvoller Ansatz dafür ist, zunächst einmal eine 100 %-Korrelation anzunehmen. Wenn der Einfluss dieser Korrelation eine andere Betrachtung hinsichtlich der Gesamtergebnisse und -erkenntnisse nahelegt, kann eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden, um die eigentliche Bedeutung der Korrelation festzustellen. Zeigt sich dabei ein wesentlicher Unterschied, ist dann zu versuchen, die realistischste Annahme für die Behandlung der Korrelation zu bestimmen.

Der Schritt der Aussortierung (Verneinung von vorhandenen Abhängigkeiten zwischen BSK von BSK-Ähnlichkeitsgruppen) hat konservativ zu erfolgen, denn sobald einmal aussortiert, steht die Kenntnis zu einer BSK für den Rest der Analyse nicht mehr zur Verfügung. Bevor Einrichtungen auf Grund einer anderweitig wohl definierter Grundlagen aussortiert werden, ist es wichtig zu überprüfen, ob mögliche Korrelationen den Schritt der Aussortierung verhindern können.

Es sei hier darauf hingewiesen, dass das mit dem in Kapitel 2.3.2.4 beschriebenen Auswahlverfahren zur Festlegung der Listen S-EL und S-DL die hier beschriebenen Randbedingungen von /ASM 09/ eingehalten werden. Wird eine Datenbank zur Durchführung des Auswahlverfahrens verwendet (wie in /TUE 10/ angeregt und teilweise erprobt), stehen die BSK auch nach Aussortierungen weiterhin für die Analyse zur Verfügung. In den entsprechenden Kommentarfeldern ist die Argumentation vermerkt, warum eine BSK bei der aktuellen Analyse nicht einbezogen wird. Sollten sich die Informationsgrundlagen zu dieser BSK ändern, kann sie wieder in die S-EL bzw. auch S-DL aufgenommen und somit als Eingabegröße im Anlagenmodell verwendet werden.

Die Frage ist nun, welche Korrelationsfaktoren geeignet sind, die seismischen Ausfallabhängigkeiten von BSK zu beschreiben. In /ASM 09/ wird gesagt, dass die Nutzung generische Korrelationsfaktoren zulässig sind. Die Verwendung einer 100 %-Korrelation ist ein geeignetes Vorgehen.

Dieser Ansatz wird auch für die SPSA des hier behandelten deutschen DWR genutzt. Nun ist zu prüfen, welche Gruppen von ausfall-korrelierten BSK aufgestellt werden müssen. Dazu wird auf folgende Vorgehensweise verwiesen /EPR 03/:

Wenn redundante Einrichtungen weitestgehend identisch sind und aneinander angrenzen, ist es schwierig etwas anderes anzunehmen, als dass sie vollkommen korreliert sind. Sind sie auf verschiedenen Ebenen angeordnet und verschiedenartig befestigt, könnten sie als unabhängig behandelt werden. Sind sie nur auf verschiedenen Ebenen angeordnet, können ihre Versagenswahrscheinlichkeiten (bezogen auf die Bodenbewegung) korreliert sein. Jedoch kann diese Korrelation unterschiedlich sein, da die Komponente auf der unteren Ebene eine kleinere bedingte Ausfallwahrscheinlichkeit haben wird. In diesem Fall könnten die redundanten Komponenten (mit unterschiedlichen Parametern für die Versagenswahrscheinlichkeiten) getrennt modelliert, aber korreliert im Quantifizierungsprogramm behandelt werden. Wenn die Komponenten weit voneinander entfernt auf derselben Ebene angeordnet sind, könnten sie als nicht

vollständig abhängig angesehen werden. Aber wie stark sie korreliert sind, ist schwierig abzuschätzen.

Zur Korrelation zwischen Komponentenausfällen kommt es, weil Komponenten: ähnlich auf ein Erdbeben ansprechen (z. B. wenn das Ansprechverhalten von Komponente I hoch ist und auch das von Komponente II hoch ist in Bezug auf die zu erwartenden), gleiche Werkstoffe haben und gleich hergestellt sind (z. B. Ankerbolzen) oder deren Versagenswahrscheinlichkeiten mit denselben Annahmen für Versagensarten und Modelle berechnet sind. Treffen mehrere dieser Ursachen zu, ist von der vollständigen Abhängigkeit anzugehen, da zusätzliche Daten und Algorithmen fehlen.

Als allgemeine Regel sollte für identische, redundante Einrichtungen eine Korrelation von Eins angenommen werden; für alle anderen Einrichtungen eine Korrelation von Null. Sensitivitätsfälle sollten definiert werden, um die Fälle zu untersuchen, für die eine partielle Korrelation angemessener sein dürfte. Stellt sich dies als Wesentlich heraus, sind diesen Bedingungen der partiellen Korrelation bei der Quantifizierung des Erdbeben-Modells Rechnung zu tragen.

Die in /EPR 03/ und in /ASM 09/ beschriebene Vorgehensweise wurde in der hier behandelten Referenzanlage entsprechend umgesetzt.

Beispiele:

- Verteiler A – Verteiler D (10 kV-Notstromverteilung, Notstromnetz 1, Scheibe 1 - 4)  
Diese vier Verteiler haben alle die gleiche Auslegung, die gleiche Installation und sind alle auf einer Ebene im Schaltanlagegebäude aufgestellt. Deshalb werden sie als korreliert mit der bedingten Wahrscheinlichkeit 1,0 berücksichtigt. Eine Versagenswahrscheinlichkeitskurve stellt den Ausfall von allen vier Verteilern zusammen dar.
- Verteilerschrank A – Verteilerschrank D  
(220 V Gleichstromverteilung, Notstromnetz 1, Scheibe 1 - 4)  
Verteilerschrank N – Verteilerschrank R  
(48 V-Gleichstromverteilung, Notstromnetz 1, Scheibe 1 - 4) und  
Verteilerschrank E – Verteilerschrank H  
(48 V-Gleichstromverteilung, Notstromnetz 2, Scheibe 5 - 8)

Die Verteiler-Schränke BVA - BVD haben alle die gleiche Auslegung, gleiche Installation und sind alle auf einer Ebene im Schaltanlagegebäude aufgestellt. Deshalb werden sie als korreliert mit der bedingten Wahrscheinlichkeit 1,0 berücksichtigt. Eine Versagenswahrscheinlichkeitskurve stellt den Ausfall von allen vier Schränken zusammen dar.

Die Verteilerschränke N - R haben alle die gleiche Auslegung, sind gleich installiert und sind alle einer Ebene im Schaltanlagegebäude aufgestellt. Deshalb werden sie als korreliert mit der bedingten Wahrscheinlichkeit 1,0 berücksichtigt. Installation und Aufstellung dieser Schränke sind gleich den Schränken A - D. Weiterhin wird für sie ermittelt, dass sie von gleicher Auslegung wie die Schränke A - D sind, obwohl sie für unterschiedliche Spannungen verwendet werden. Deshalb werden diese Schränke mit der bedingten Wahrscheinlichkeit 1,0 als korreliert mit den 220V Schränken berücksichtigt. Damit stellt eine Versagenswahrscheinlichkeitskurve den Ausfall von acht Schränken zusammen dar.

Die Verteiler-Schränke E - H haben alle die gleiche Auslegung, gleiche Installation und sind alle auf einer Ebene im Notspeisegebäude aufgestellt. Deshalb werden sie als korreliert mit der bedingten Wahrscheinlichkeit 1,0 berücksichtigt. Auslegung und Installation dieser Schränke sind gleich den Schränken A – D und N - R. Jedoch sind sie zu den BV-Schränken (die sich im Schaltanlagegebäude befinden) unterschiedlich aufgestellt. Eine Versagenswahrscheinlichkeitskurve stellt den Ausfall von allen vier Schränken zusammen dar, aber diese ist unabhängig von der Kurve für die Schränke A - D und N - R.

Zur Berücksichtigung der Abhängigkeiten auf der Ebene der auslösenden Ereignisse wurde folgendermaßen vorgegangen:

In der Dokumentation der SPSA heißt es sinngemäß, dass die Überprüfung der S-EL gezeigt hat, dass die folgenden erdbebenbedingten auslösenden Ereignisse zu analysieren sind. Einige der auslösenden Ereignisse stellen einen Verbund einzelner Auslöser dar, bedingt durch die übergreifende Wirkung eines Erdbebens:

- Abschaltung der Anlage,
- Verlust der externen Stromversorgung,
- Verlust der Hauptspeisewasserversorgung,
- Verlust der Hauptspeisewasserversorgung und der externen Stromversorgung,

- Frischdampfleitungsbruch infolge Maschinenhaus-Versagen mit Verlust der externen Stromversorgung  
(Der Verlust der bezüglich Erdbeben wesentlich schwächer beanspruchbaren externen Stromversorgung ist mit dem Maschinenhaus-Versagen verbunden),
- Frischdampfleitungsbruch infolge Maschinenhaus-Versagen mit Verlust der externen Stromversorgung bei Schaltanlagegebäude-Versagen  
(Der Verlust des bezüglich Erdbeben wesentlich schwächer beanspruchbaren Maschinenhauses ist mit dem Schaltanlagegebäude-Versagen verbunden),
- Kernschaden durch Versagen von Reaktorgebäude-Ringraum und Frischdampf und Speisewasserarmaturenkammer,
- Kernschaden durch Versagen von Reaktorgebäude-Innenraum.

Die Ereignisbäume der PSA für interne Ereignisse bilden die Basis für die Modellierung der oben aufgeführten, durch Erdbeben verursachten auslösenden Ereignisse. Für die ersten drei erdbebenbedingten Ereignisse, d. h. für die Anlagenabschaltung, den Verlust der externen Stromversorgung und den Verlust der Hauptspeisewasserversorgung, werden die identischen Ereignisbäume der PSA für interne Ereignisse verwendet.

Für den erdbebenbedingten gleichzeitigen Verlust der Hauptspeisewasser- und externen Stromversorgung kommt der Ereignisbaum für den Verlust der Hauptspeisewasserversorgung der PSA für interne Ereignisse zur Anwendung.

Für den gleichzeitigen erdbebenbedingten Frischdampfleitungsbruch und externen Stromversorgungs-Verlust im Zusammenhang mit dem Maschinenhaus-Versagen sowie im Zusammenhang mit dem Schaltanlagegebäude-Versagen wird der Ereignisbaum für den Frischdampfleitungsbruch der PSA für interne Ereignisse benutzt.

Da das erdbebenbedingte Versagen von Reaktorgebäude-Ringraum und Frischdampf- und Speisewasserarmaturenkammer sowie das von Reaktorgebäude-Innenraum direkt zu Kernschaden führt, sind keine Ereignisbäume für ihre Modellierung erforderlich.

Zur Berücksichtigung der Abhängigkeiten auf der Ebene der übergreifenden Einwirkungen wurde bei Anlagenbegehungen auf notwendige Erweiterungen der Untersu-

chungen auf die entsprechenden Einflüsse, wie einwirkungsbedingte Brände und Überflutungen, geachtet.

NUREG 1407 /NRC 91/ fordert für die Erdbeben-Sicherheitsanalyse als Teil des sogenannten IPEEE (*Individual Plant Examination of External Events*)-Programms eine Erweiterung der Untersuchungen auf durch Erdbeben

- bedingten Brand,
- bedingte Überflutung,
- fehlausgelöste Feuerlöschsysteme,
- bedingtes Sicherheitsbehälter-Verhalten.

Einrichtungen, deren Versagen einen Brand auslösen (z. B. Schmiermittelbehälter) bzw. eine Überflutung verursachen (z. B. Wärmetauscher, Vorratsbehälter) und Einrichtungen der S-EL beschädigen können, werden bei der Anlagenbegehung überprüft. Zur Berücksichtigung von Fehlauslösungen von Feuerlöschsystemen werden bei der Begehung die Möglichkeiten für eine unbeabsichtigte Ingangsetzung von Feuerlöschsystemen durch Sprinkler-Sprühkopf- oder Rohrleitungs-Versagen und Relaisklappern untersucht. Der Sicherheitsbehälter und Einrichtungen zur Unterstützung seiner Funktionen sowie Systeme zur Aufrechterhaltung der Funktionen des Sicherheitsbehälters, z. B. Ventilator Kühler und Absperrventile, werden in die Begehung einbezogen.

Die S-EL enthält die Einrichtungen, die die IPEEE-Erweiterungen betreffen. Weiterhin halten die Begehungs-Teams nach Möglichkeiten für erdbebenbedingten Brand und Überflutung mit eventueller Beeinträchtigung von Einrichtungen der S-EL Ausschau. Dazu bei der Begehung gemachte Beobachtungen werden in den Arbeitsblättern aufgezeichnet.

## Beispiel KKW2

Zur Modellierung von Abhängigkeiten bezüglich des seismischen Ausfalls von Komponenten gibt es international keine einheitliche Praxis. Es existiert ein Grundverständnis darüber, dass seismische Abhängigkeiten auf BSK-Ebene zu berücksichtigen sind, aber mit welchem Modellierungsansatz, in welcher Tiefe und in welchem Umfang die Abhängigkeitsbetrachtungen durchzuführen sind, besteht kein Konsens. Ist ein möglicherweise geeignetes Modell für einen konkreten Standort gefunden, stellt sich oft auch die Frage wie die Modellparameter sinnvoll bestimmt werden können.

In der Erdbeben-PSA für einen weiteren deutschen DWR (KKW2) ist ein sehr konservativer Modellierungsansatz gewählt worden - Zusammenstellung typgleicher Komponenten und Annahme vollständiger Ausfallkorrelation. Die Behandlung von Abhängigkeiten auf der Ebene der BSK ist ausführlich beschrieben und begründet. Es wurden etwas mehr als 100 Ersatzereignisse eingeführt, wovon die größte Gruppe abhängiger Komponenten mehr als 40 Armaturen im Reaktorgebäude umfasst, d. h. dass bei einem seismischen Ereignis 40 Armaturen mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit (Fragility einer einzelnen Komponente) gleichzeitig ausfallen.

Zur Bestimmung der Versagenswahrscheinlichkeiten relevanter Komponenten und Strukturen wird das Sicherheitsreservefaktorverfahren unter Einbeziehung der Ergebnisse von Anlagenbegehungen, Erfahrungen aus anderen Erdbeben-PSA und generischen Erfahrungswerten aus der Analyse realer Erdbeben angewendet.

Typgleiche Komponenten werden in ihrem Ausfallverhalten als vollständig abhängig modelliert. Dazu werden Fragility-Ersatzereignisse zur Nutzung in den Fehlerbäumen eingeführt. In /ZHA 01/ wird gezeigt, dass die Annahme vollständiger Korrelation des seismischen Ausfallverhaltens bei typgleichen redundanten Komponenten ein sehr konservativer Ansatz ist.

Komponenten werden typgleich genannt, wenn die folgenden drei Bedingungen zutreffen:

- Komponenten stehen im selben Gebäude,
- Komponenten gehören derselben Komponentenart an,
- Komponenten haben dieselben Fragility-Kennwerte.

Der seismische Ausfall von Komponenten mit mehreren Ausfallarten (z. B. „startet nicht“ und „Betriebsversagen“) wird nicht getrennt modelliert. Es wird der Komponente nur eine Fragility für alle Ausfallarten zugeordnet.

Komponenten in nicht gegen Erdbeben ausgelegten Gebäuden wird keine seismische Kapazität unterstellt.

### **Beispiel KKW3**

Zur Berücksichtigung von Abhängigkeiten auf der Ebene der übergreifenden Einwirkungen wurde in der SPSA für KKW3 nur die erdbebenbedingte anlageninterne Überflutung behandelt. Im Erdbebenfall wird vom Versagen aller Systeme ausgegangen, die nicht gegen Erdbeben ausgelegt sind, wobei von der Freisetzung der in den Systemen enthaltenen Wasservorräten ausgegangen werden muss. Gleichzeitig muss während des konservativ vorausgesetzten Notstromfalls der Weiterbetrieb (die weitere Einspeisung) der notstromversorgten Systeme angenommen werden.

Zu erdbebenbedingten anlageninternen Bränden und Zusammenhängen zu weiteren übergreifenden Einwirkungen (z. B. externe Überflutungen und Brände) wird nichts ausgesagt. Allerdings wird die Standsicherheit von Schränken der Brandmeldeanlage bewertet. Wegen der hohen Standsicherheit braucht keine Versagenswahrscheinlichkeit bestimmt werden.

Zur Berücksichtigung von Abhängigkeiten auf der Ebene der auslösenden Ereignisse wurde in der SPSA für KKW3 die grundsätzliche Annahme getroffen, dass bei einem Erdbeben von einem Notstromfall und dem Versagen des Maschinenhauses (und dem damit verbundenen Versagen aller dortigen Systeme) ausgegangen werden muss.

Es wurden in der SPSA für KKW3 mit Ausnahme einer Bemerkung zu den Dampferzeugern keine Aussagen zu den Abhängigkeiten auf der Ebene der BSK getroffen. Das Ausfallverhalten der Dampferzeuger wird als stark korreliert angenommen, da sie im gleichen Gebäude und auf der gleichen Höhenquote installiert und gleich aufgebaut sind. Generell wird in dieser SPSA ermittelt, dass insbesondere Bauwerksversagen das erdbebenbedingte Risiko bestimmt. Erdbebenbedingtes Versagen von Komponenten spielt lediglich eine untergeordnete Rolle; in der Analyse wird allerdings konservativ angenommen, dass bei einem Versagen von Bauwerksstrukturen die gesamte sich darin befindliche Systemtechnik ausfällt.

## **C      Abbildungsverzeichnis (Anhänge)**

Abb. A.1	Flussdiagramm zur Durchführung einer <i>SPSA</i>	192
Abb. A.2	Method for Analysing Extreme Events (Ablaufschema, aus /SOE 14/)	195
Abb. B.1	Aufbau eines technischen Systems S	203
Abb. B.2	Aufbau der Teilsysteme TS1 und TS2	204
Abb. B.3	Nichtverfügbarkeit eines Parallelsystems (TS21)	205
Abb. B.4	Nichtverfügbarkeit eines Parallelsystems (TS21) mit GVA	206
Abb. B.5	Nichtverfügbarkeit von TS21 bei seismischer Einwirkung (ohne Berücksichtigung seismisch bedingter Abhängigkeiten)	207
Abb. B.6	Nichtverfügbarkeit von TS22 bei seismischer Einwirkung (mit Berücksichtigung der seismisch bedingten Abhängigkeiten D1 bis D4)	209
Abb. B.7	Nichtverfügbarkeit von TS22 bei seismischer Einwirkung und der Berücksichtigung eines Folgebrandes	210
Abb. B.8	Auslösende Ereignisse	211
Abb. B.9	Ereignisablaufanalyse für ein auslösendes Ereignis IE1 (vgl. Abb. B.8)	212
Abb. B.10	Ereignisablaufanalyse für seismisch bedingtes auslösendes Ereignis IE1	213
Abb. B.11	IE1 und IE2 treten unabhängig auf Grund eines seismischen Ereignisses (Intensität B) ein	214
Abb. B.12	Ereignisbaummodellierung: IE1 und IE2 treten auf Grund eines seismischen Ereignisses gleichzeitig auf	214
Abb. B.13	Fehlerbaummodellierung: IE1 und IE2 treten auf Grund eines seismischen Ereignisses gleichzeitig auf (nur Komponente A)	215
Abb. B.14	Varianten der Lagerbeckenkühlung	216

- Abb. B.15 Geänderter Fehlerbaum *X-6VE72S101\_ÖN* mit neuem Gatter *BOR-444* und neuem Transfer *B6VE72S101\_ÖN* 219
- Abb. B.16 Neuer Fehlerbaum *B6VE72S101\_ÖN* mit Verknüpfung für brandbedingte Ausfälle der Komponente *6VE72S101* 220

## **D Tabellenverzeichnis (Anhänge)**

Tab. A.1	Klassifikation der auslösenden Ereignisse	188
Tab. A.2	Ergebnisse der PSA Stufe 1 für das Kernkraftwerk Seabrook	189
Tab. A.3	Hauptbeiträge zur Kernschadenshäufigkeit für beide Blöcke des Kernkraftwerks Seabrook	190
Tab. A.4	Regeln für die Zuordnung von Antwortkorrelationen (übernommen aus /BOH 90/)	196
Tab. B.1	Ausfallabhängigkeiten in Gebäude 1	208



# | Verantwortung für Mensch und Umwelt |

**Kontakt:**

Bundesamt für Strahlenschutz

Postfach 10 01 49

38201 Salzgitter

Telefon: + 49 30 18333 - 0

Telefax: + 49 30 18333 - 1885

Internet: [www.bfs.de](http://www.bfs.de)

E-Mail: [ePost@bfs.de](mailto:ePost@bfs.de)

Gedruckt auf Recyclingpapier aus 100 % Altpapier.



Bundesamt für Strahlenschutz