

**Modellierung  
und Quantifizierung  
erdbebenbedingter  
Ereignisabläufe**

3607R02614



## Modellierung und Quantifizierung erdbebenbedingter Ereignisabläufe

Autoren / Authors:

Walter Frey

Gerhard Mayer

Gernot Thuma

Michael Türschmann

Juni 2010

### **Anmerkung:**

Dieser Bericht ist von der GRS im Auftrag des BMU im Rahmen des Vorhabens 3607R02614 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.

**GRS - A - 3549**



## **Kurzfassung**

Seit dem Jahr 2005 ist gemäß dem PSA-Leitfaden /BMU 05/ im Rahmen der periodischen Sicherheitsüberprüfung von Kernkraftwerken eine seismische probabilistische Sicherheitsanalyse (SPSA) durchzuführen. Hinweise zur anzuwendenden Methodik bei einer SPSA finden sich im Fachband zu PSA-Methoden /FAK 05/. Da die PSA für Einwirkungen von außen eine Neuerung im deutschen kerntechnischen Regelwerk darstellt, sind die diesbezüglichen Ausführungen im Fachband zu PSA-Methoden noch nicht so ausgereift wie jene für anlageninterne Ereignisse.

Insbesondere im Hinblick auf die Auswahl derjenigen baulichen Anlagen, Systeme und Komponenten (BSK), für die im Verlauf einer SPSA erdbebenbedingte anlagenspezifische Versagenswahrscheinlichkeiten zu bestimmen sind, die Erstellung des seismischen Anlagenmodells, die Behandlung seismischer Abhängigkeiten und die quantitative Auswertung des Anlagenmodells sind detailliertere Vorgaben erforderlich, um eine angemessene Qualität der SPSA sicherzustellen sowie die Nachvollziehbarkeit und Vergleichbarkeit zu verbessern.

Der vorliegende Bericht befasst sich mit der Erstellung des seismischen Anlagenmodells, den Möglichkeiten der Modellierung seismischer Abhängigkeiten und schließlich der quantitativen Auswertung des qualitativ aufgestellten Anlagenmodells. Es wurde insbesondere ein allgemeines Abhängigkeitsmodell entwickelt, mit dem man in der Lage ist, die unterschiedlichsten Abhängigkeitsformen und -varianten zu beschreiben. Die Entwicklungen eines systematischen methodischen Ansatzes zur Durchführung des Auswahlverfahrens erfolgt in einem gesonderten Forschungs- und Entwicklungsvorhaben /TUE 10/.

Zur Erprobung der Modellierungen und Quantifizierungsvorschriften konnte auf die Daten und Informationen eines Referenzkernkraftwerks zurückgegriffen werden.

## **Abstract**

In the frame of (periodic) safety reviews of nuclear power plants the corresponding German guideline /BMU 05/ requires a probabilistic safety assessment (PSA). This also includes a seismic PSA (SPSA). For this SPSA the German technical reference document on PSA methods /FAK 05/ recommends a methodological approach based on safety margin factors. The recommended procedure consists of three major parts: seismic hazard analysis, determination of failure probabilities of structures, systems and components (SSC), and development of seismically induced event trees with subsequent calculation of core damage frequencies. Each of these parts is subdivided into various individual steps. Up to now, the technical reference document has not yet reached the same maturity for these steps as for the methods applied to the analysis of plant internal events. This is the reason for carrying out additional research and development activities to ensure an adequate quality of the SPSA model and to enhance traceability and reproducibility of the SPSA.

The report addresses the seismic plant modelling, the modelling possibilities for dependencies of seismic failures and the quantitative analysis of the by the qualitatively generated plant model. In particular, a general model of seismic failure dependencies has been developed which encloses different types and variants of dependencies. A SSC screening process has been developed in another research and development project /TUE 10/.

The data and information of a German reference nuclear power plant have been used for model validation for providing rules for quantification.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Aufarbeitung des Standes von Wissenschaft und Technik.....</b>	<b>6</b>
2.1	Literaturauswertungen zur Ableitung und Quantifizierung von seismisch induzierten Ereignisabläufen .....	6
2.2	Stand von Wissenschaft und Technik .....	29
<b>3</b>	<b>Das seismische PSA-Anlagenmodell .....</b>	<b>34</b>
3.1	Struktur des seismischen Anlagenmodells.....	34
3.1.1	Modellierungsvarianten.....	34
3.1.2	Erstellung erdbebeninduzierter Ereignisabläufe .....	39
3.2	Berücksichtigung seismischer Abhängigkeiten .....	44
3.2.1	Komponentenausfälle aufgrund von seismischen Einwirkungen .....	46
3.2.2	Modellierung von Abhängigkeiten im Ausfallverhalten von BSK.....	50
3.2.3	Zusammenfassung .....	55
3.3	Quantifizierung .....	60
3.3.1	Die seismische Widerstandsfähigkeit technischer Einrichtungen .....	60
3.3.2	Korrelation zwischen Freifeldbeschleunigung und Intensität .....	66
3.3.3	Eintrittshäufigkeiten von Erdbeben .....	69
3.3.4	Häufigkeit eines erdbebenbedingten Kernschadens .....	72
3.3.5	Berechnungsvorschrift .....	75
<b>4</b>	<b>Anwendungen .....</b>	<b>79</b>
4.1	Modellierung und Quantifizierung an einem einfachen Beispiel (Beispiel 1).....	79
4.2	Seismisch bedingter Notstromfall in der Referenzanlage (Beispiel 2) .....	90
4.2.1	Annahmen bei der Modellierung von Fehlerbäumen für das Ereignis Erdbeben.....	90
4.2.2	Ereignisbaum für den durch Erdbeben initiierten Notstromfall.....	92
4.2.3	Fehlerbaum für die Einleitung eines Notstromfalls .....	94

4.2.4	Fehlerbäume zur Berechnung der Nichtverfügbarkeiten der Systemfunktionen zur Beherrschung des Notstromfalls bei einem Erdbeben.....	102
4.2.5	Bereitstellung von Daten zur Quantifizierung des seismischen Anlagenmodells .....	103
4.2.6	Einlesen der Fragilities mit Hilfe von MS ACCESS <sup>®</sup> in das RiskSpectrum <sup>®</sup> -Projekt .....	110
4.2.7	Quantifizierung der Kernschadenshäufigkeit mit RiskSpectrum <sup>®</sup> .....	116
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>121</b>
5.1	Ergebnisse.....	122
5.1.1	Aufstellung des seismischen Anlagenmodells.....	122
5.1.2	Modellierung von Abhängigkeiten bei seismischen BSK-Ausfällen .....	123
5.1.3	Berechnungsvorschrift .....	123
5.2	Ausblick .....	125
5.2.1	Internationale Zusammenarbeit .....	125
5.2.2	Spezifikation einer SPSA-Datenbasis .....	126
5.2.3	Anwendung der SPSA-Datenbasis bei Erstellung, Auswertung, Nutzung und Begutachtung einer SPSA .....	126
5.2.4	Aufbau einer SPSA-Datenbasis für eine Referenzanlage .....	127
5.2.5	Datenbank generischer Versagenswahrscheinlichkeiten .....	127
<b>6</b>	<b>Grundbegriffe, Bezeichnungen und Definitionen.....</b>	<b>129</b>
<b>7</b>	<b>Literatur, Dateien und Rechenmodell.....</b>	<b>132</b>
7.1	Referenzen.....	132
7.2	Dateien, Datenbanken und Rechenmodelle.....	137
<b>8</b>	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>138</b>
<b>9</b>	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>140</b>

## 1 Einleitung

Mögliche Einwirkungen von Erdbeben werden bei der Auslegung von Kernkraftwerken seit der Frühzeit der Kerntechnik berücksichtigt. Wie in allen wissenschaftlich-technischen Bereichen gibt es auch in der Seismik und den zugehörigen Ingenieurdisziplinen eine ständige Weiterentwicklung des Kenntnisstandes. Das betrifft insbesondere auch die probabilistischen Methoden.

Im deutschen kerntechnischen Regelwerk zur Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen wurde die Anwendung probabilistischer Methoden bis vor einigen Jahren nicht explizit gefordert. Gegenwärtig finden Arbeiten zur Aktualisierung der entsprechenden KTA-Regeln statt /KTA 90/. Bei diesen Regeländerungen werden die grundlegenden Methoden der seismischen Auslegung und Auslegungsüberprüfung um probabilistische Herangehensweisen ergänzt. Weiterhin sind im überarbeiteten Fachband zu PSA-Methoden /FAK 05/ des geltenden PSA-Leitfadens /BMU 05/ Vorgaben zur Durchführung einer seismischen PSA (SPSA) ergänzt worden.

Bis vor kurzem erfolgte die seismische Überprüfung bestehender Anlagen ausschließlich deterministisch analog zur Auslegungsmethodik /JON 05/. In einzelnen Fällen kamen auch vereinfachte probabilistische Methoden zur Anwendung, aber nicht im Sinne einer vollständigen SPSA. Anzumerken ist, dass unter einer seismischen Gefährdungsanalyse in der Regel nur die Ermittlung der Eintrittshäufigkeit von Erdbeben unterschiedlicher Stärke an einem Kernkraftwerksstandort verstanden wird. Dabei bezieht sich die Stärke eines Erdbebens auf die dynamischen Wirkungen, mit denen ein Kraftwerksgebäude bei einem Erdbeben beaufschlagt wird. Im Unterschied zu diesen Analysen beinhaltet eine SPSA auch eine probabilistische Bewertung des sicherheitstechnischen Verhaltens einer Anlage mit ihren Einrichtungen bei unterschiedlichen Erdbebenstärken.

Eine seismische PSA, die den Anforderungen des Leitfadens /FAK 05/ genügt, ist unserer Kenntnis nach für deutsche Kernkraftwerke noch nicht durchgeführt worden. Erste anlagenspezifische Verifizierungen der Methode wurden erfolgreich durchgeführt /OBE 08/. Es bleibt trotzdem zu erwarten, dass eine erste umfassende Umsetzung der

Vorgaben des Leitfadens methodische Defizite erkennen lässt, die eine Weiterentwicklung von /FAK 05/ erforderlich machen.

Der vorliegende Bericht befasst sich mit der Modellierung und Quantifizierung eines seismischen probabilistischen Anlagenmodells.

Aus probabilistischen Untersuchungen der Stufe 1 für interne auslösende Ereignisse während Anlagenzuständen des Leistungsbetriebs sind die wesentlichen störfallauslösenden Ereignisse (SAE) bekannt. Das Auftreten eines Erdbebens mit der maximal am Standort zu unterstellenden Stärke ist ein Auslegungsstörfall, d.h. auch, dass alle zur Störfallbeherrschung benötigten Anlagenteile und Ausrüstungen gegen die Auswirkungen seismischer Lasten ausgelegt sind. Unter einem störfallauslösenden Ereignis werden Ereignisse verstanden, die den Reaktorschutz ansprechen und Sicherheitssysteme zur Beherrschung der Situation benötigen. Die von den SAE hervorgerufenen Sequenzen werden in Form von Ereignisablaufdiagrammen beschrieben. Die Verzweigungspunkte eines Ereignisbaumes stehen für die Funktion bzw. den Ausfall einer zur Beherrschung des SAE benötigten Systemfunktion. Der Ausfall einer Systemfunktion wird mit der Fehlerbaummethode bewertet. Dazu wird das System in seine statistisch bewertbaren Funktionselemente (Teilsysteme, Aggregate, Komponenten, Betriebsmittel, Personalhandlungen usw.) zerlegt. Der Ausfall des Systems ergibt sich aus der logischen Verknüpfung von Ausfällen der Funktionselemente. Das wird in Fehlerbäumen mathematisch beschrieben, die Funktionselementausfälle werden Basisereignisse der Fehlerbäume genannt. Ein Basisereignis ist bestimmt durch das Funktionselement und die Art des Ausfalls. Die Menge aller störfallauslösenden Ereignisse und ihre Beschreibung mit Ereignis- und Fehlerbäumen wird PSA-Modell der Stufe 1 genannt.

Zur Beschreibung des Verhaltens der Anlage bei seismischen Einwirkungen mit einer seismischen PSA kann das PSA-Modell der Stufe 1 genutzt werden. Es ist allerdings wesentlich zu erweitern.

Zu jedem Basisereignis (und dem dahinter stehenden Funktionselement) ist zu fragen, auf welche zusätzliche, seismisch-induzierte Art Ausfälle möglich sind. Der seismisch-induzierte Funktionsausfall einer Komponente ist abhängig von der Intensität des Erdbebens, d.h. das PSA-Modell der Stufe 1 ist um einen makroseismischen Parameter zu ergänzen. Bei seismischen Untersuchungen wird der Begriff des Funktionselements durch die Abkürzung BSK ersetzt. BSK steht für Bauwerke und bauliche Strukturen, Systeme und Komponenten. Es wird dadurch deutlich gemacht, dass bei seismischen

PSA von einem erweiterten Begriff des Funktionselements ausgegangen werden muss, z.B. durch Einbeziehung von Gebäudeausfällen.

Eine BSK ist bei und nach Erdbebeneinwirkung nicht verfügbar, wenn sie

- erdbebenunabhängig ausgefallen ist,  
(Das ist die Nichtverfügbarkeit des Funktionselements aus der PSA der Stufe 1.)
- aufgrund der Erdbebeneinwirkung versagt  
(unabhängiges seismisches Einzelversagen),
- aufgrund von Abhängigkeiten zu BSK in einer Menge von BSK versagt,
- infolge des seismischen Ausfalls von Funktionselementen versagt, die nicht im PSA-Modell der Stufe 1 enthalten sind,
- infolge eines seismisch bedingten Brandschadens ausgefallen ist  
oder
- infolge einer seismisch bedingten Überflutung ausgefallen ist.

Ein PSA-Modell der Stufe 1 umfasst in vielen Fällen mehr als 2500 Funktionselemente. Bevor nun für jedes dieser Funktionselemente im SPSA-Modell die beschriebene Erweiterung vorgenommen wird, ist ein Auswahlverfahren durchzuführen, um solche BSK zu identifizieren, deren Ausfallverhalten aufgrund der anlagenspezifischen Gegebenheiten tatsächlich relevant sind und für welche BSK erdbebenbedingte Versagenswahrscheinlichkeiten abgeleitet werden müssen. In /TUE 10/ wurde ein systematisches Auswahlverfahren abgeleitet.

Der vorliegende Bericht befasst sich mit der Modellierung und Quantifizierung des seismischen PSA-Modells. Ausgangspunkt bilden die Fragestellungen, die der Fachband zu PSA-Methoden /FAK 05/ des aktuellen PSA-Leitfadens /BMU 05/ bezüglich der Quantifizierung nicht detailliert genug beantwortet (siehe dazu mehr in Kap. 2.2). Im Wesentlichen geht es um die Fragen der Datenbereitstellung, der Modellierung von Abhängigkeiten und der endgültigen Quantifizierung.

Datenbereitstellung:

Zur Unterstützung der Durchführung einer SPSA wurde eine MS ACCESS®-Datenbank <DB SPSA> entwickelt /TUE 10/. Diese Datenbank wurde aufgebaut, um im Verlauf der Erarbeitung einer SPSA die erforderlichen Daten aufzunehmen, aufzubereiten und

in den verschiedenen Phasen der Projektbearbeitung geeignet zur Verfügung zu stellen. Diese Datenbank enthält auch eine Tabelle *<tbl/Verswahr>* zur Aufnahme, Speicherung und Recherche von Versagenswahrscheinlichkeiten (siehe Kap. 4.2.5).

Behandlung von Abhängigkeiten:

Zur Beschreibung des seismischen Ausfallverhaltens einer Komponente im Fehlerbaummodell einer Systemfunktion wird standardmäßig von einem unabhängigen seismischen Ausfall und von der Möglichkeit abhängiger Ausfälle mit seismischen Ursachen ausgegangen.

Die abhängigen Ausfälle werden durch Mengen von BSK, von der Art der Abhängigkeit des Ausfalls der Komponente aufgrund einer Eigenschaft und einer die Stärke der Abhängigkeit beschreibenden Funktion charakterisiert.

Damit lässt sich ein Abhängigkeitsmodell formulieren, das dem Stand von Wissenschaft und Technik genügt (siehe dazu die Ergebnisse in Kap. 3.2).

Quantifizierung:

Im Kap. 3.3 werden sämtliche Fragen der Quantifizierung von SPSA angesprochen. Dabei geht es um die effektive Bereitstellung von Versagenswahrscheinlichkeiten für alle seismisch relevanten Komponenten, um die Korrelation zwischen der Intensität und dem zur Berechnung benötigten makroseismischen Parameter, um die Bestimmung von Eintrittshäufigkeiten von Erdbeben und schließlich um die Bestimmung der summarischen Häufigkeit erdbebenbedingter Kernschäden.

Die erarbeiteten Methoden wurden im Wesentlichen theoretisch auf der Grundlage der Auswertung des Stands von Wissenschaft und Technik abgeleitet, konnten aber mit Unterstützung einer Referenzanlage in-situ zumindest teilweise erprobt werden. Die Anwendung der Methoden bei einer vollständigen SPSA für ein Kernkraftwerk im Rahmen eines Genehmigungsverfahrens oder einer periodischen Sicherheitsüberprüfung steht noch aus.

Die Anlage Gemeinschaftskraftwerk Neckarwestheim, Block 2 (GKN-2) stand als Referenzkraftwerk zur Verfügung. Nur durch die aktive Unterstützung durch das Fachpersonal von GKN-2, durch die Bereitstellung von umfangreichen Informationen und Daten zur Anlage sowie durch die Ermöglichung umfangreicher Begehungen konnten die Ziele des Vorhabens erfolgreich erfüllt werden.

Der vorliegende Ergebnisbericht ist folgendermaßen strukturiert:

Die Aufarbeitung des Standes von Wissenschaft und Technik wird in Kap. 2 beschrieben. Dazu wurden ca. 40 nationale und internationale Referenzen herangezogen, von denen ungefähr die Hälfte konspektiert wurden. In Kap. 2.2 ist der Stand von Wissenschaft und Technik insbesondere in Hinblick auf die Defizite des Leitfadens /FAK 05/ zusammengefasst dargestellt.

In Kap. 3 wird die Aufstellung und Quantifizierung des seismischen Anlagenmodells beschrieben. In Kap. 4 werden die erarbeiteten Vorgehensweisen an Beispielen erläutert und erprobt. Dazu wird in Kap. 4.1 ein einfach konstruiertes Beispiel genutzt. In Kap. 4.2 wird der seismisch induzierte Notstromfall im Referenzkraftwerk als Beispiel herangezogen.

Kap. 6 enthält wichtige Grundbegriffe und Definitionen zur Durchführung von SPSA.

## **2           Aufarbeitung des Standes von Wissenschaft und Technik**

### **2.1       Literatúrauswertungen zur Ableitung und Quantifizierung von seismisch induzierten Ereignisabläufen**

Die nachfolgend aufgeführten Fachartikel wurden zur Frage der Ableitung und Quantifizierung von seismisch induzierten Ereignisabläufen ausgewertet. Die konspektierten Artikel sind im Literaturverzeichnis (Kap. 7) mit einem Stern\* gekennzeichnet. Bei nicht näher erläuterten Abkürzungen wird auf die Tab. 6-1 verwiesen.

**/BUD 91/** Budnitz, R. J.

Current state of methodologies for seismic probabilistic safety analyses

Die Modellbildung für SPSA erfolgt im Wesentlichen so wie die Modellbildung für PSA der Stufe 1 für anlageninterne auslösende Ereignisse, allerdings sind einige Besonderheiten zu beachten. In /BUD 91/ werden folgende diskutiert:

- Abhängigkeiten zwischen BSK-Ausfällen bei seismischen Einwirkungen,
- Kontaktprellen (relay chatter),
- Auslegungs- und Konstruktionsfehler,
- Operatorhandlungen nach dem Erdbeben.

Berücksichtigung der Korrelation zwischen BSK-Ausfällen (Zitat aus /BUD 91/):

It can sometimes be difficult to analyze correlations among earthquake-induced failures.

The most logical assumption, which seems at first to be universally appropriate, is that the earthquake motion coming into the site will affect all buildings and components in a fully correlated way. However, at different locations in a building, and certainly in different buildings, this correlation is diluted by several intervening factors.

Typically, the PSA analysis will assume complete correlation in the response for nearby and similar equipment that is subject to the same floor motion. However, different equipment types, even if located in close proximity, are usually assigned only minor (if any) response correlation. Furthermore, even high response correlation does not al-

ways imply high capacity correlation, which would arise most obviously when, for example, two valves come from the same manufacturer and the same assembly line, with adjacent model numbers.

The difficulty is that there is only very limited experimental information on correlations, from either testing or actual earthquakes, upon which to rely. Therefore, while the methodology for coping with correlations is well-developed, the underlying knowledge needed to perform the calculations is almost always inadequate.

To overcome the problem, the usual fallback approach is to perform a sensitivity analysis, for example assuming complete correlation and then complete independence and ascertaining what difference these two assumptions make. The difference is then understood as representing a measure of the uncertainty in the final results.

The analyst must take care about correlations not only in the central values but in the uncertainties. If neither of two parameters is known well, but what little is known comes from the same data set, the correlation in the uncertainty can be high.

Whenever the accident sequences of concern involve components for which correlation might or might not be large, and the sensitivity analysis shows that the bottom-line results are sensitive to correlations, this issue is one of the important sources of uncertainty in the overall analysis. (Conversely, if a key sequence is dominated by a single failure, or by two failures of very different kinds—an example would be a sequence in which a large yard tank fails seismically simultaneously with a battery rack—both response correlations and capacity correlations should be minor and the sensitivity of the results should also be minor.)

A summary evaluation of the correlation issue is that, while the methodology for analyzing correlations certainly exists in an adequate form, the underlying data are usually inadequate, so that uncertainties in the final PSA results can sometimes be important due to the issue of correlation.

Zusammengefasst lässt sich feststellen, dass BSK desselben Typs meist als vollständig korreliert in ihrem Ausfallverhalten angesehen werden, wenn sie auch denselben Wirkungsspektren unterliegen, d. h. wenn sie nahe genug beieinander aufgestellt sind. BSK verschiedenen Typs hingegen werden, auch wenn sie nahe beieinander aufgestellt sind, als nicht (oder sehr gering) korreliert modelliert. Das Hauptproblem bei der Modellierung von seismisch bedingten Abhängigkeiten ist die Frage nach dem Wert des korrelationsbeschreibenden Parameters. Zur Schätzung dieses Parameters kann auf nur wenige Experimente oder Auswertungen tatsächlicher Erdbeben zurück gegriffen werden. Hier hilft gegenwärtig nur eine Sensitivitätsanalyse weiter. Nach Zusam-

menstellung und Modellierung der Abhängigkeitsmengen (siehe dazu auch die Ausführungen in Kap. 3.2) ist eine Sensitivitätsanalyse bezüglich der korrelationsbeschreibenden Parameter durchzuführen.

**/CHE 91/** Chen, J. T., et al.

Procedural and Submittal Guidance for the Individual Plant Examination of External Events (IPEEE) for Severe Accident Vulnerabilities

Die Auswertung von umfassenden PSA hat gezeigt, dass der Beitrag von externen Einwirkungen auf die Häufigkeit von Kernschadenzuständen erheblich sein kann. Schon 1987 wurde von der NRC eine Steuerungsgruppe von Experten einberufen, die Umfang, Methoden und Organisation des IPEEE-Programms (*individual plant examination of external events*) koordinieren sollte. Der Leitfaden /CHE 91/ ist das Ergebnis der Arbeit der Steuerungsgruppe, die Analyse von Erdbebenereignissen spielt eine zentrale Rolle. Es werden die Methoden SPSA und SMA (seismic margin assessment) als akzeptierte Vorgehensweisen zur Durchführung von seismischen Analysen innerhalb des IPEEE-Programms beschrieben. Nachfolgend werden einige Gesichtspunkte aus /CHE 91/ zur Strukturierung der Ereignisbäume und zur Durchführung von Unsicherheitsanalysen herausgehoben.

Bezüglich der Durchführung von Unsicherheitsanalysen wird betont, dass es nicht notwendig erscheint, vollständige Unsicherheitsquantifizierungen durch Berechnung von Verteilungen der seismisch-bedingten Kernschadenshäufigkeiten durchzuführen, um Schwachstellen zu identifizieren. Punktschätzungen unter Zuhilfenahme einer einzelnen seismischen Häufigkeitskurve (statt einer Kurvenschar) und von einzelnen BSK-bezogenen seismischen Ausfallwahrscheinlichkeiten (vgl. Abb. 3-8, Kurve  $W_{best}(F)$ ) statt von Kurvenscharen sind völlig ausreichend, um potentielle seismische Schwachstellen erkennen zu können. Das gilt nur für IPEEE-Analysen, denn dort ist es das Ziel, dominante Ausfallsequenzen und BSK zu erkennen und bei Möglichkeit nach Rang zu ordnen.

In einigen SPSA tragen nicht-seismische Ausfälle von BSK und Personalhandlungen wesentlich zur Kernschadenshäufigkeit bei.

Eine SPSA wird in vier Schritten durchgeführt:

- Seismische Gefährdungsanalyse:  
Ermittlung der standortspezifischen Erdbebenhäufigkeiten,
- Seismische Versagensanalyse:  
Ermittlung der seismisch bedingten Ausfallwahrscheinlichkeit von relevanten BSK,
- Seismisches Anlagenmodell:  
Bestimmung der seismischen auslösenden Ereignisse und Modellierung des Anlagenverhaltens mit Ereignis- und Fehlerbäumen unter Berücksichtigung aller seismischen Ausfälle,
- Konsequenzanalyse und Quantifizierung:  
Die seismische KSH ergibt sich aus der nachfolgenden Gleichung, dabei ist  $F$  die Freifeldbeschleunigung,  $H(F)$  die Funktion der Überschreitenshäufigkeit und  $W(F)$  die Funktion der seismisch induzierten Kernschadenswahrscheinlichkeit:

$$KSH_{seismisch} = \int_0^{\infty} H(F) \left( \frac{dW(F)}{dF} \right) dF$$

**/FAK 05/** Facharbeitskreis (FAK) Probabilistische Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke

Methoden zur probabilistischen Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke

Zur Durchführung der Ereignisablaufanalyse sei auf Kap. 3.6.4.6.1, S.110 verwiesen.

Der erdbebenbedingte Ausfall von BSK kann direkt zu Ereignissen führen, gegen die die Anlage nicht ausgelegt ist (z.B. Abscheren aller Anschlussleitungen an die druckführende Umschließung) und zu Ereignissen, die mit den vorhandenen Sicherheitsfunktionen beherrscht werden können. Letztere sind mittels eines Ereignisbaums zu analysieren.

Es sind anlagenspezifisch die BSK zu identifizieren, die zu auslösenden Ereignissen führen können. Erdbebenbedingte Ereignisüberlagerungen sind in Betracht zu ziehen.

Die anlageninterne Überflutung ist mit zu betrachten.

Die Darstellungen zur seismischen Ereignisablaufanalyse in /FAK 05/ ist nicht ausreichend. Folgende Fragen und Probleme bleiben unbeantwortet:

- Wie können Ereignisüberlagerungen in die Analyse einbezogen werden?
- Warum ist neben der anlageninternen Überflutung nichts zum erdbebeninduzierten Brand gesagt?
- Wie sind seismische Abhängigkeiten zu berücksichtigen?
- Widersprüchliche Aussagen zur Nutzung von Ereignisbäumen. Als Fazit wird festgestellt, dass die Dokumentation von erdbebenbedingten Ereignisabläufen nicht erforderlich ist, nachdem zuvor über den Aufbau solcher Ereignisbäume diskutiert wurde.

Zur Quantifizierung wird empfohlen (entsprechend einer NRC-Empfehlung von 1991), die seismisch bedingten Kernschadenshäufigkeiten für Intensitätsbereiche zu bestimmen.

Als Beispiele für Intensitätsbereiche werden angegeben: {VI, VII}; {VII, VIII}; {VIII, IX}. Die Eintrittshäufigkeit in den Intensitätsbereichen wird als Differenz aus den Überschreitenshäufigkeiten der Bereichsgrenzen ermittelt.

**/GRS 90/** Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH  
Deutsche Risikostudie Phase B

Es wird von einem einfach strukturierten Ereignisablaufdiagramm ausgegangen. Dabei wird angenommen, dass aufgrund seismischer Einwirkungen ein transienter Vorgang ausgelöst wird (z.B. durch Netzausfall, Störungen in der Eigenbedarfsversorgung oder auch durch Komponentenausfälle im Speisewasser-Dampf-Kreislauf). Das Ereignisablaufdiagramm umfasst neben der Frage zur Integrität des Primärkreislaufs auch die Frage nach der Funktionsfähigkeit bzw. Verfügbarkeit der Systeme zur Stromversorgung, zur Reaktorschnellabschaltung, zur Notkühlung und zur Speisewasserversorgung.

Das Ereignisablaufdiagramm für eine Transiente infolge Erdbeben gegebener Intensität  $I$  enthält folgende Verzweigungspunkte:

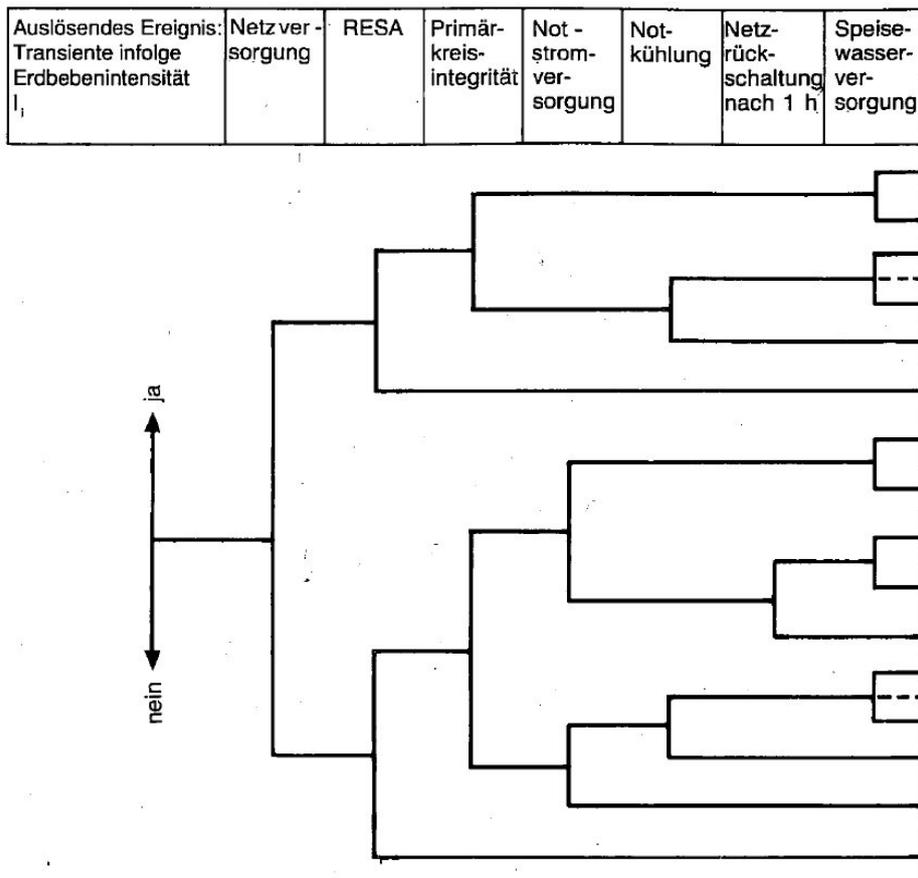
- Netzversorgung,
- RESA
- Primärkreisintegrität,
- Notstromversorgung,
- Notkühlung,
- NetZRückschaltung nach 1 h,
- Speisewasserversorgung.

(Die Risikostudie wurde für das Kernkraftwerk KWB, Block B durchgeführt. Stützungsmaßnahmen zur Energieversorgung oder zur verzögerten Speisewasserversorgung über KWB, Block A wurden nicht berücksichtigt.)

Es werden drei Intensitätsstufen  $I$  betrachtet (Überschreitenshäufigkeiten siehe Abb. 2-2). Die Struktur des Ereignisablaufdiagramms ist unabhängig von der Intensität des Erdbebens.

Die Versagenswahrscheinlichkeiten der Systeme in den Verzweigungspunkten des Ereignisablaufdiagramms werden durch erdbebenunabhängige Nichtverfügbarkeiten und durch erdbebenbedingte Versagenswahrscheinlichkeiten bestimmt. Die erdbebenunabhängigen Nichtverfügbarkeiten haben nur bei geringer Erdbebenintensität einen größeren Einfluss.

Bei gleichartigen Bauteilen und Komponenten, bei denen der erdbebenbedingte Anteil an der Versagenswahrscheinlichkeit maßgeblich und gleich ist, wird immer von einer strengen Korrelation ausgegangen.



**Abb. 2-1** Ereignisablaufdiagramm einer Transiente infolge Erdbeben

Für das auslösende Ereignis „Transiente infolge Erdbeben mit Intensität  $I$ “ wurden folgende Eintrittshäufigkeiten genutzt:

7,0 E-04/a für  $I = 6$  bis 7 ( $I_1$ )

9,5 E-05/a für  $I = 7$  bis 8 ( $I_2$ ) und

5,0 E-06/a für  $I = 8$  bis 9 ( $I_3$ ).

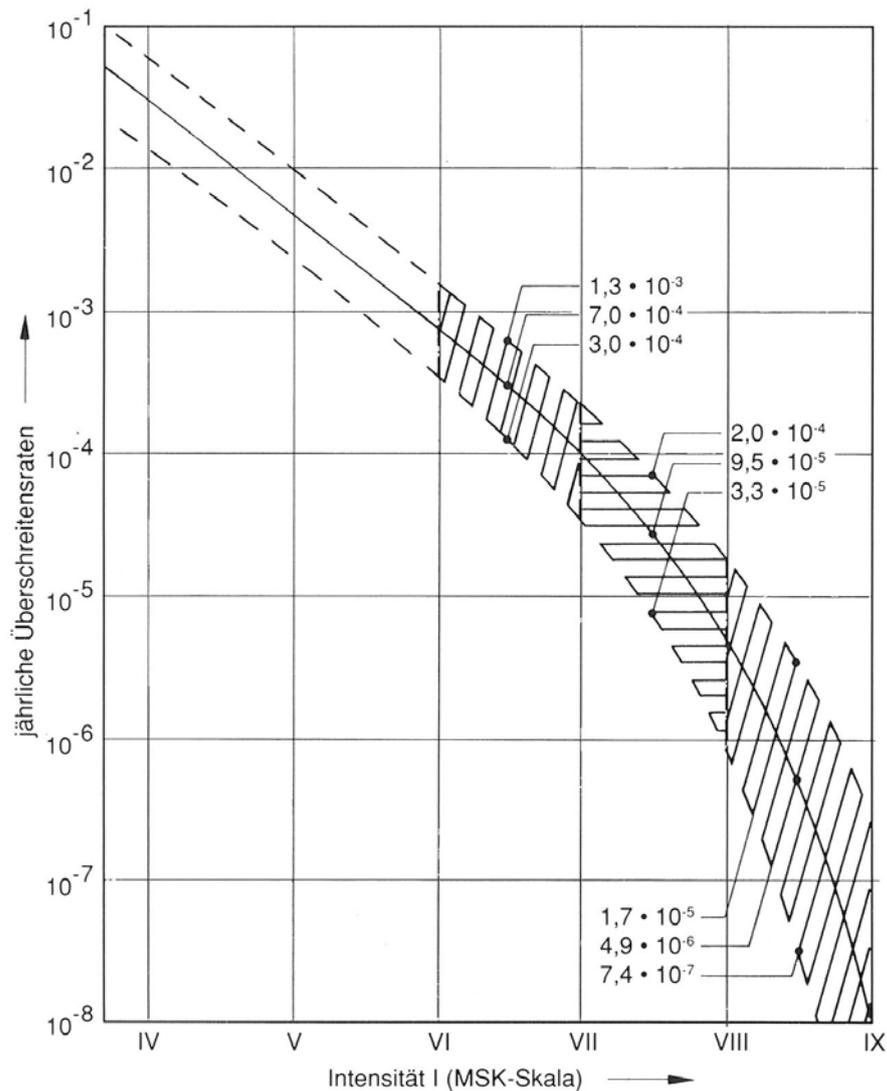
Zu den nachfolgend aufgeführten Bauwerken und Bauteilen wurden erdbebenbedingte Versagenswahrscheinlichkeiten ermittelt:

- Reaktorgebäude-Innenzylinder im unteren Bereich (4,0 E-14/a),
- Innenzylinder im Reaktorgebäude unter dem Rundlaufkran,
- Trennwand zwischen Brennelementbecken und Kerngerüstkammer,
- Armaturenkamerwand,
- Maschinenhaus-Querrahmen (9,0 E-07/a),
- Kamin im Reaktorhilfsanlagegebäude,

- Decke unter den Deionatbehältern,
- aussteifende Querwände im Schaltanlagegebäude,
- Decke unter den Notstromdieseln im Schaltanlagegebäude (1,5 E-08/a).

Zu den nachfolgend aufgeführten BSK wurden erdbebenbedingte Versagenswahrscheinlichkeiten (je nach Komponente geht es um den Verlust der Standsicherheit, der Integrität oder der Funktionsfähigkeit) für die Intensitäten  $I_1$ ,  $I_2$  und  $I_3$  ermittelt:

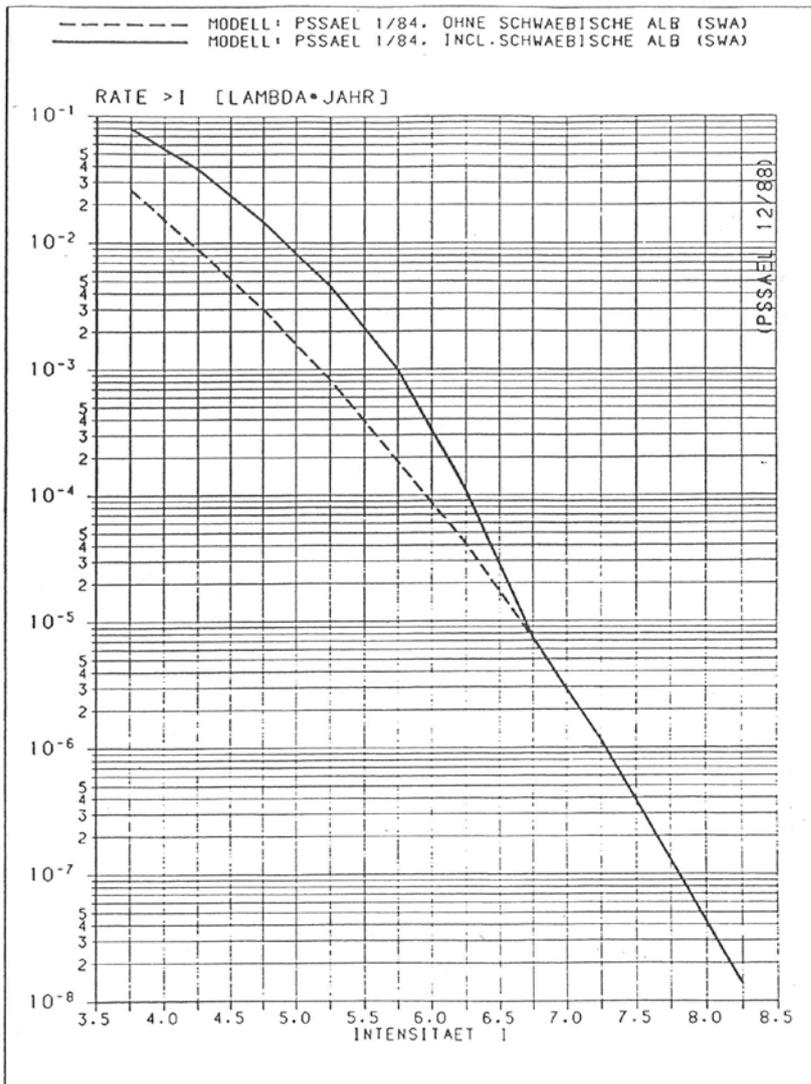
- Deionatbehälter,
- Notspeisepumpen,
- Pumpen und Rohrleitungen der Nebenkühlwasser-Versorgung,
- Not- und Nachkühlsystem innerhalb des Sicherheitsbehälters,
- Notstromdieselaggregate im Schaltanlagegebäude,
- nuklearer Zwischenkühler,
- Brennelementlager,
- Primärsystem,
- Traggestelle für elektrische oder elektronische Komponenten (kann zum Abreißen von Anschlüssen von Signalkabeln führen),
- Sicherheitsbehälter.



**Abb. 2-2** Überschreitensraten für den Standort der Risikostudie

**/GRS 93/** Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH:  
SWR Sicherheitsanalyse

Für die Referenzanlage KRB wurden die seismisch bedingten Gefährdungshäufigkeiten für die Intensitätsstufen 6, 7 und 8 ohne Ableitung eines Anlagenmodells abgeschätzt. Dazu wurden Untersuchungen zum Verhalten der Bauwerke Reaktorgebäude, Notstromdieselgebäude, nukleares Betriebsgebäude und Hilfsanlagegebäude sowie Maschinenhaus und zum Verhalten von Komponenten (Zwischenkühler, Schnellabschaltbehälter, SB (Sicherheitsbehälter)-Standzarge, Rohrleitungssysteme des Speisewasser-Dampf-Kreislaufs und Frischdampfisolationsventile) durchgeführt. Es wurden die Überschreitensraten in Abb. 2-3 verwendet.



**Abb. 2-3** Überschreitensraten für den Standort der SWR-Studie

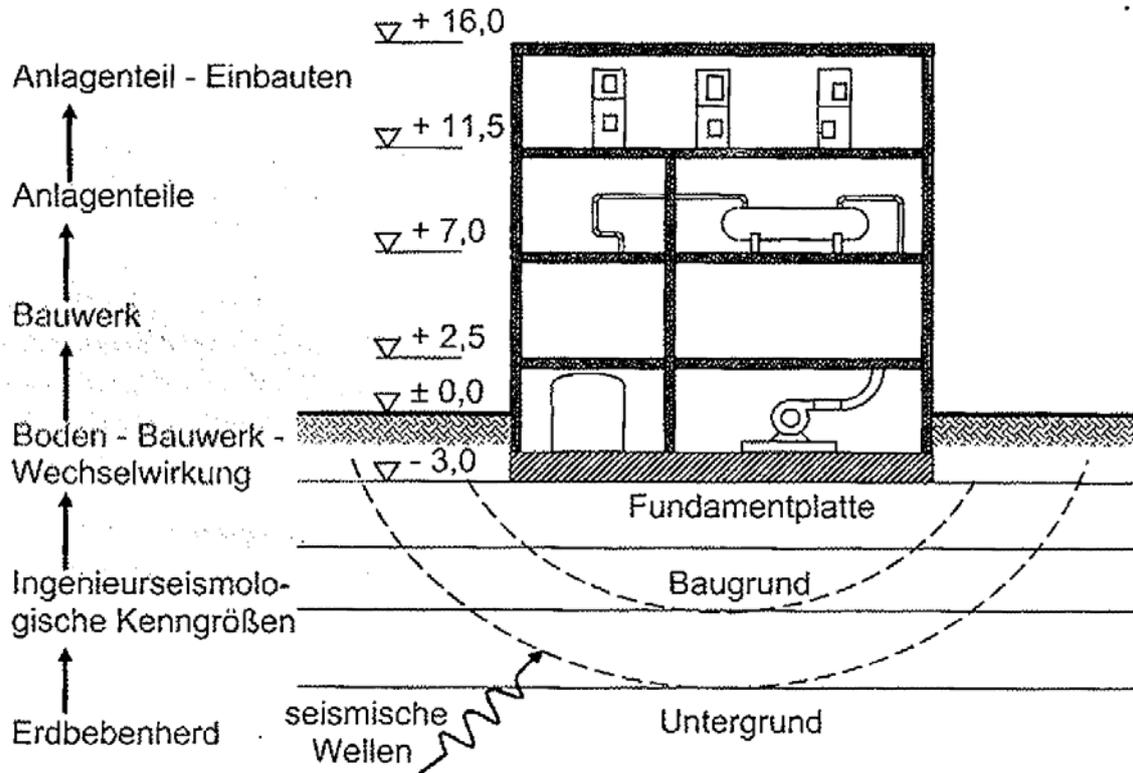
**/HEN 09/** Henkel, F.-O., M. Schalk

Auslegung der Anlagenteile von Kernkraftwerken – Stand und Tendenzen

Unter Anlagenteilen werden alle maschinen- und elektrotechnische Einrichtungen und Systeme verstanden, die zum Betrieb der Kraftwerksanlage erforderlich sind. Alle Anlagenteile sind gegen das Bemessungserdbeben auszulegen, soweit dies zur Erreichung der Schutzziele erforderlich ist.

In Abb. 2-4 ist die Nachweis- und Übertragungskette zur Auslegung der Anlagenteile anschaulich dargestellt. Die seismische Gefährdungsanalyse ergibt die standortspezifischen ingenieurseismologischen Kenngrößen (Boden-Antwortspektrum, Zeitdauer der Erregung sowie ggf. registrierte Zeitverläufe der Bodenbeschleunigung) des für die

Auslegung maßgebenden Bemessungserdbebens. Ausgehend von diesen Kenngrößen kann das Bauwerk unter Berücksichtigung der Boden-Bauwerk-Wechselwirkung berechnet und ausgelegt werden. Daran schließen sich die Untersuchungen zu den Anlagenteilen an.



**Abb. 2-4** Seismische Übertragungskette

Diese Bearbeitungsreihenfolge entspricht der Übertragungskette des Erdbebens. Die Antwort des vorangehenden (Haupt-)Systems, z.B. des Gebäudes, ist Einwirkung für das folgende (Unter-)System, z.B. das Anlagenteil. Zumeist wird dabei die Rückwirkung des Untersystems auf das Hauptsystem vernachlässigt, d. h. die Systeme werden zwangsweise entkoppelt betrachtet.

**/HOF 96/** Hoffmann, H. H.

Vorgehensvorschlag zur Durchführung einer probabilistischen Sicherheitsanalyse für das externe störfallauslösende Ereignis Erdbeben

Es wird vorgeschlagen, dass für jede sicherheitstechnisch relevante Komponente und für jedes Gebäude mit Sicherheitstechnik eine Versagenskurve zu ermitteln ist.

Erdbebenbedingte Ausfälle von Komponenten können

- zu nicht beherrschten Ereignissen führen (z.B. Abscheren der Anschlussleitungen am Reaktordruckbehälter)  
oder
- zu störfallauslösenden Ereignissen führen.

Als störfallauslösende Ereignisse sind aufgeführt:

- Notstromfall,
- Ausfall Hauptspeisewasserversorgung (Zerstörung Maschinenhaus),
- großes Leck (Lösen von HKM-Pumpen bzw. Dampferzeuger aus den Verankerungen),
- ATWS (anticipated transients without scram) nach Auftreten eines der genannten Störfälle und Nichteinfall der Steuerelemente wegen Beschädigung der RDB-Einbauten.

Für die nichtbeherrschten Ereignisse gilt: Eintrittshäufigkeit = Gefährdungshäufigkeit. Für die störfallauslösenden Ereignisse sind zuerst die Komponenten zu identifizieren, deren Ausfall das störfallauslösende Ereignis hervorruft, z.B. die Freiluftschaltanlagen, die Maschinen- und Eigenbedarfstransformatoren für den Notstromfall.

Zur Quantifizierung wird auf den vorliegenden Ereignisbaum zum Notstromfall der PSA der Stufe 1 zurückgegriffen. Es ist klar, dass bei den Systemkomponenten nicht nur die stochastischen, sondern auch die erdbebenbedingten Nichtverfügbarkeiten berücksichtigt werden.

Bei redundanten Teilsystemen wird postuliert, dass bei gleichen Ausfallbedingungen starke Korrelation vorliegt, d. h. beispielsweise, dass mit der Versagenswahrscheinlichkeit einer einzelnen Pumpe alle redundanten Pumpen gleichzeitig ausfallen.

**/IAEA 93/** International Atomic Energy Agency (IAEA)  
Probabilistic Safety Assessment for Seismic Events

In Kap. 2.4 steht, dass die Berechnung der Schnittmengenwahrscheinlichkeiten den großen Unterschied einer Seismik-PSA zu einer PSA interner Ereignisse darstellt. Die Komponentenausfälle in den Schnittmengen einer Seismik-PSA könnten voneinander

abhängig sein. Seismische Ausfälle eines Systems werden mit „seismischen Fehlerbäumen“ modelliert, die aber wesentlich einfacher sind als die von PSA der Stufe 1 für interne Auslöser. Das liegt daran, dass viele seismische Ausfälle stark korreliert sind, so dass Gruppen von Komponenten durch seismische Basisereignisse repräsentiert werden können.

**/IAEA 06/** International Atomic Energy Agency (IAEA)

Advanced nuclear plant design options to cope with external events

Das Vorgehen bei der Quantifizierung von SPSA unterscheidet sich vom Vorgehen bei einer PSA für interne Ereignisse. Die Ergebnisse umfassen das gesamte Spektrum von möglichen Erdbebenintensitäten am Standort, weiterhin sind die seismischen Abhängigkeiten beim Ausfall von BSK einzubeziehen. Zur Berechnung werden meist Simulationsverfahren (Monte-Carlo-Simulation, Latin-Hypercube-Stichprobenauswahl) oder Diskretisierungen genutzt.

**/JON 03/** Jonczyk, J.

Methoden zur Erfassung und Eingrenzung von Anlagenteilen bei erdbebenspezifischen Ausfalleffekten und zur Quantifizierung des Ausfalls von Sicherheitsfunktionen bei seismischen Abhängigkeiten

In Kap. 5 des Berichts werden die grundlegenden internationalen Ansätze bei der Behandlung seismischer Abhängigkeiten in den PSA beschrieben. Die Berücksichtigung seismischer Abhängigkeiten wird durch die Grenzfälle Unabhängigkeit aller Ausfälle und volle Abhängigkeit der Ausfälle von Gruppen von BSK beschrieben.

**/KAS 99/** Kassawara, R. P., et al.

Seismic IPEEE - Industry Insights

Es wird ein Überblick zu den Resultaten der IPEEE (individual plant examination of external events)-Anlagenuntersuchungen in den USA gegeben. Es wurden insgesamt 70 Kernkraftwerks-Standorte mit 86 Blöcken untersucht. Die ermittelten seismischen Kernschadenshäufigkeiten (tatsächlich nur für 25 Kernkraftwerke abgeleitet) liegen zwischen  $2,5 \text{ E-}07/\text{a}$  und  $2,2 \text{ 6E-}04/\text{a}$ , davon die meisten zwischen  $1,06 \text{ E-}06/\text{a}$  und  $6,0\text{E-}05/\text{a}$ . In Tab. 2-1 sind die BSK aufgeführt, deren Ausfall in den einzelnen Kernkraftwerken wesentlich zur seismischen Kernschadenshäufigkeit beigetragen hat. Her-

vorgehoben werden muss die Bedeutung von Behältern, Gebäuden und elektrischen und leittechnischen Schränken.

Als Ergebnis der SPSA wurden insbesondere folgende Nachrüstungen realisiert:

- Verbesserung der Verankerungen von elektrischen und leittechnischen Schränken,
- Maßnahmen zur Verhinderung möglicher räumlicher Interaktionen zwischen BSK; Befestigung benachbarter Schaltschränke,
- Verbesserung der Verankerung von Wärmetauschern.

Ein Überblick zu allen durchgeführten SPSA ergab folgende weitere Schlussfolgerungen:

- Anlagenbegehungen spielen eine Schlüsselrolle bei der Durchführung von SPSA. Die Bedeutung liegt in der Identifikation von tatsächlichen Einbaubedingungen und von Fehlermodes, die nur vor Ort erkannt werden können (Betonrisse, mögliche Abhängigkeiten zwischen BSK, Korrosion, ...), siehe hierzu auch /GRS 01/.
- Die Bewertung der Möglichkeit seismisch induzierter Brände und Überflutungen werden als Teil der Anlagenbegehungen durchgeführt. Bei den vorgelegten SPSA wurden nur wenige Brand- und Überflutungsquellen gefunden, die zum seismischen Risiko beitragen.
- Bei nur zwei SPSA wurden nicht-seismische Ausfälle und Personalhandlungen identifiziert, die signifikant zur seismischen KSH beitragen.

**Tab. 2-1** Seismisch relevante BSK in den SPSA der IPEEE (nach /KAS 99/)

Reference Plant Number	Number of Units	Tanks	Relays	Piping	Cable Trays	Valves	Diesel Generators	Electrical Cabinets	Pumps	Batteries/Chargers	Heat Exchangers	Transformers	Buildings	Seismic Interaction	Block Walls	Chillers/HVAC	Fans	Surrogate Element	NSSS Components
1	1														X				
2	1						X					X	X	X					
3/4	2	X						X								X		X	
5	2	X						X	X										
6	2	X										X	X						
7	2		X					X				X	X						
8	1			X						X						X	X		
9	1							X											
10	1	X											X	X					
11	1	X						X	X										
12	1																		X
13	2	X						X		X									
14	1	X					X												X
15	1	X					X												X
16	3												X	X					X
17	1	X					X						X						
18	1	X				X		X	X										
19	1	X						X	X				X	X	X				X
20	2				X			X				X							X
21	2									X				X			X		
22	2							X				X	X						X
23	1	X					X	X											
24	1	X					X				X			X					X
25	1							X											X
<b>TOTAL UNITS</b>	<b>34</b>	<b>17</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>6</b>	<b>18</b>	<b>3</b>	<b>7</b>	<b>1</b>	<b>9</b>	<b>13</b>	<b>9</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>13</b>	<b>2</b>

**/KAT 08/** Kato, M.

A seismic-induced fire at the Kashiwazaki-Kariwa NPP

**/MAT 08/** Matsuoka, T.; K. Ogura

Development of Risk Assessment Method for Fires caused by Earthquake

Am 16. Juli 2007 gab es in Japan ein Erdbeben ca. 16 km vom Kernkraftwerk Kashiwazaki-Karina entfernt. Am Standort gibt es sieben Blöcke. Der durchschnittliche maximale Wert der Bodenbeschleunigung (untere Etage Reaktorgebäude) betrug 0,66 g. Kurz nach dem Beben trat ein Brand auf. Es war der weltweit erste Fall eines seismisch-induzierten Brandereignisses in einem Kernkraftwerk. Nachfolgend wird ein kur-

zer Abriss zum Ereignis gegeben, basierend auf den Literaturstellen /KAT 08/ und /MAT 08/.

Aufgrund 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. Aufgrund des Erdbebens war ein Leck in der Löschwasserleitung. Der Einsatz einer externen Feuerwehr verzögerte sich, da sämtliche Telefonleitungen besetzt waren. Nach erfolgter Benachrichtigung brauchte die externe Feuerwehr eine Stunde bis zum Kernkraftwerk aufgrund des Erdbebenverkehrschaos 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.

In /MAT 08/ ist auf der Grundlage des dargestellten Brandereignisses ein komponentenbezogenes Modell zur Beschreibung der Eintrittshäufigkeit eines Brandes bei Erdbeben abgeleitet worden.

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

$$H_{Brand} = P_{Brandaus} \cdot \gamma \quad (\text{Formel 2-1})$$

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

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

$$\gamma = \gamma_m \cdot (1 - \exp(-\alpha \cdot H)) \quad (\text{Formel 2-2})$$

Dabei ist  $\gamma_m$  die maximal angenommene Entzündungswahrscheinlichkeit und  $\alpha$  ein empirisch zu bestimmender Parameter. In /MAT 08/ wird  $\gamma_m = 0,5$  gesetzt (Expertenschätzung) und  $\alpha = 353$  berechnet (Anpassung an Branddaten). Daraus ergibt sich folgende Formel für die Entzündungswahrscheinlichkeit:

$$\gamma = 0,5 \cdot (1 - \exp(-353 \cdot H)) \quad (\text{Formel 2-3})$$

Wertet man das oben beschriebene Brandereignis aus, erhält man, dass  $H_{Brand} = 0,025$  für einen Transformator bei einem Erdbeben der Stärke 0,66 g beträgt. Dabei ist  $P_{Brandaus} = 0,125$  (5 Ölleckagen bei 40 Transformatoren) und  $\gamma = 0,2$  (1 Entzündung bei 5 Leckagen).

Für einen Ölbehälter erhält man  $H_{Brand} = 1,48E-05/a$  bei einem Erdbeben der Stärke  $F = 2,91g$  mit  $P_{Brandaus} = 0,0204$ . Dabei wurde konservativ angenommen, dass eine Entzündung bei 49 vorhandenen Ölbehältern stattgefunden hat; in Wirklichkeit gab es keine Entzündung. Die Entzündungswahrscheinlichkeit  $\gamma = 7,2E-4$  wurde mit (Formel 2-3) geschätzt.

Es wird in /MAT 08/ für die seismische Kapazität eines Ölbehälters  $H_{0,50} = 3,4g$  mit Unsicherheit  $\beta_U + \beta_R = 0,26$  angenommen (zu den Bezeichnungen siehe auch Kap. 3.3.1.1). Nimmt man nun an, dass die Verteilung der seismischen Kapazität logarithmisch normalverteilt ist (siehe Kap. 3.3.1.1) erhält man eine Freifeldbeschleunigung von  $F = 2,91g$  für  $P_{Brandaus} = 0,0204$ .

**Tab. 2-2** Seismische Brandkapazitäten für ausgewählte BSK nach /MAT 08/

BSK	$F_{0,50}$ [g]	$H_{Brand}$ [1/Jahr]	$\gamma$	$F_{Brand, 0,50}$ [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
Kabelpraitschen	7,0	5,20 E-05	0,0091	9,67
Dieselmotor	2,2	4,00 E-03	0,33	2,79
Turbine	2,7	6,00 E-03	0,44	3,54

In Anpassung an das Konzept der seismischen Kapazität einer BSK wird das Modell einer (seismischen) Brandkapazität einer BSK eingeführt. Die Verteilung der Brandkapazität  $F_{Brand}$  wird logarithmisch normalverteilt angenommen, normiert mit einem Faktor

$\gamma_m$ . Das ist die maximale Entzündungswahrscheinlichkeit. Bei großer Freifeldbeschleunigung nähert sich die Wahrscheinlichkeit  $P_{Brandaus}$  dem Wert 1. Für die Entzündungswahrscheinlichkeit gibt es einen maximalen Wert  $\gamma_m$ .

$F_{Brand, 0,50}$  steht für den Median der Brandkapazität.

**/KLU 09/ Klügel, J.-U.**

On the Treatment of Dependency of Seismically Induced Component

Die gegenwärtige SPSA-Praxis ist charakterisiert durch die folgenden typischen Annahmen zur Abhängigkeit seismisch induzierter Fehler von Komponenten und Strukturen:

- Das seismisch bedingte Ausfallverhalten von Komponenten des gleichen Typs, die auf der gleichen Ebene eines Gebäudes aufgestellt sind, ist vollständig korreliert. Wird die Belastungskapazität einer dieser Komponenten überschritten (alle Komponenten haben die gleiche Fragility-Funktion), fallen alle Komponenten aus.
- Solange ein Gebäude nicht zusammenbricht, werden die Komponenten im Gebäude als völlig unabhängig vom Gebäudeverhalten betrachtet.
- Eine Systemfunktion fällt aus, wenn ein Gebäude ausfällt und dadurch mindestens eine Komponente dieser Systemfunktion betroffen ist.

Das sind alles sehr konservative Annahmen. Sie können nur für ältere Anlagen mit geringer Redundanzzahl und ungenügender physischer Trennung der Redundanzen toleriert werden. Bei SPSA für neuere Anlagen oder für neue Reaktorkonzepte ist eine detaillierte Einschätzung möglicher Abhängigkeiten erforderlich.

Dazu wurde für die SPSA für das Kernkraftwerk Goesgen-Daeniken eine Prozedur entwickelt, die abhängige Ausfälle multipler redundanter Komponenten durch ein  $\beta$ -Faktor GVA-Modell beschreibt.

**/KOZ 04/ Kozloduy Nuclear Power Plant**

Erdbeben-PSA Kozloduy, Block 5 und 6

Zur Bestimmung der störfallauslösenden Ereignisse (SAE) wurde wie in einer klassischen PSA der Stufe 1 für interne Ereignisse vorgegangen: Vergleich mit vorliegenden

SAE-Listen anderer PSA, ingenieurtechnische Einschätzung, Review der Betriebserfahrung und die Beachtung spezieller Analyseresultate.

Es wird für jedes seismische SAE der Verlust der externen Stromversorgung angenommen. Es werden zehn SAE für die seismische Analyse ausgewählt, darunter:

- Leck mittlerer Größe (150 – 350 mm Durchmesser) im nichtabsperrbaren Teil des Primärkreislaufs,
- Leckage im Notspeisewassersystem (150 mm) im Containment,
- Leckage im Hauptspeisewassersystem (400 mm) im Containment,
- Verlust von zwei Strängen des Nebenkühlwasser A (Behälter).

Zu jedem SAE sind Eintrittshäufigkeiten nebst Unsicherheitsangaben für sechs Klassen seismischer Einwirkung (impact level, jährliche Überschreitenswahrscheinlichkeiten  $1,0 \text{ E-}01$  bis  $1,0 \text{ E-}06$ ) angegeben (/KOZ 0/, Table T2/5-3). Dies ist ein weiterer Zugang zur Festlegung von Diskretisierungspunkten. Bei anderen SPSA wird entlang einer makroseismischen Größe diskretisiert (z.B. Intensität, maximale Freifeldbeschleunigung). Die Ergebnisse der SPSA lassen sich dadurch folgendermaßen beschreiben:

Für ein Erdbeben mit Eintrittshäufigkeit (Überschreitenshäufigkeit)  $x$  ergibt sich eine Kernschadenshäufigkeit von  $y$  (vgl. Tab. 2-3).

Insbesondere für den Vergleich von Standorten ist diese Art des Vorgehens sehr gut geeignet.

**Tab. 2-3** Ergebnisse SPSA Kozloduj, Block 5/6 /KOZ 04/, Table T2/8-1

<b>Überschreitenswahrscheinlichkeit</b>	1 E-1	1 E-2	1 E-3	1 E-4	1 E-5	1 E-6
<b>Kernschadenshäufigkeit</b>	1,5 E-8	5,3 E-6	2,4 E-5	1,2 E-5	1,0 E-5	1,0 E-6

Eine für den Standort GKN durchgeführte Erdbebengefährdungsanalyse ergab im Jahre 2001 folgende Überschreitungshäufigkeiten der Intensitäten:

**Tab. 2-4** Überschreitungshäufigkeiten Standort GKN (Gefährdungsanalyse 2001)

Intensität	Überschreitungs- häufigkeit [1/a]	Eintrittshäufigkeit (pro Intervall) [1/a]	Intervall	max. PGA [g]
4	9,0 E-01	0,9 E-01	<b>I1</b>	0,057
5	1,3 E-02			
5,5	4,4 E-03			
6	1,1 E-03			
6,5	1,5 E-04	9,5 E-04	<b>I2</b>	0,066
7	8,5 E-06	1,4 E-04	<b>I3</b>	0,089
7,5	1,5 E-07	8,4 E-06	<b>I4</b>	0,117
8	1,0 E-08	1,4 E-07	<b>I5</b>	0,157
9		1,0 E-08	<b>I6</b>	0,242

Zur Durchführung der SPSA wurde die Gefährdungskurve in sechs Intervalle aufgeteilt (Intensitätsintervalle I1 = {4; 6}, I2 = {6; 6,5}, I3 = {6,5; 7}, I4 = {7; 7,5}, I5 = {7,5; 8}, I6 = {8; 9}). Als Häufigkeiten wurden die Differenzen der Bereichsgrenzen genutzt (siehe Tab. 2-4). Die Intensitäten wurden in Beschleunigungen umgerechnet, dabei wurden die standortspezifischen Spektren berücksichtigt. Die Intervalle werden durch die angegebenen maximalen Bodenbeschleunigungen (PGA in  $\text{cm/s}^2$ ) repräsentiert.

Es werden vier Ereignisse untersucht (ein Satz repräsentativer auslösender Ereignisse): Notstromfall, Versagen des Maschinenhauses, Leck im Sicherheitsbehälter (Fehler DH-Armaturen) und einen Default-Fall (Abfahren nach Erdbeben), bei dem die Eintrittshäufigkeit gleich der Erdbebenhäufigkeit gesetzt wird.

Der Beitrag des Default-Falls zur Gefährdungshäufigkeit (Kernschadenshäufigkeit) beträgt mehr als 90 % (52 %).

Im Vortrag wurde erwähnt, dass alle Handmaßnahmen als ausgefallen angenommen werden, wenn  $\text{PGA} > 0,4 \text{ g}$  gilt.

**/MIT 06/** Mitomo, N., et al.

Development of risk assessment method for fire caused by earthquake

Selbst wenn ein Erdbeben keine direkten Funktionsausfälle hervorruft, besteht die Möglichkeit von Gefährdungszuständen durch Brände. Es wird über die Ergebnisse eines Forschungsprogramms zur Entwicklung einer Analyse- und Bewertungsmethode für erdbebenbedingte Brände berichtet. Seismisch bedingte Brände und die damit verbundenen Ausfälle werden außerhalb der SPSA betrachtet. In dieser Erdbeben-Brand-PSA werden als Auslöser nur erdbebeninduzierte Brände betrachtet. Als Besonderheit ist anzumerken, dass mehrere Brände parallel auftreten können. Das ist anders als bei Brand-PSA. Dort werden solche Fälle aufgrund geringer Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen.

Es wird festgestellt, dass Brandauslösung durch seismische Einwirkung folgendermaßen passieren kann:

- Kurzschluss (z.B. in Schaltanlagen),
- Überhitzung bei Ausrüstungen mit beweglichen Teilen, z.B. bei Dieselaggregaten oder Pumpen (Überhitzung kann dadurch entstehen, dass die Welle nicht mehr rund läuft, dass Fremdkörper in den Wellenschaft eingedrungen sind ...),
- Brennstoff- oder Kraftstoffleck.

**/OBE 08/** Obenland, R., et al.

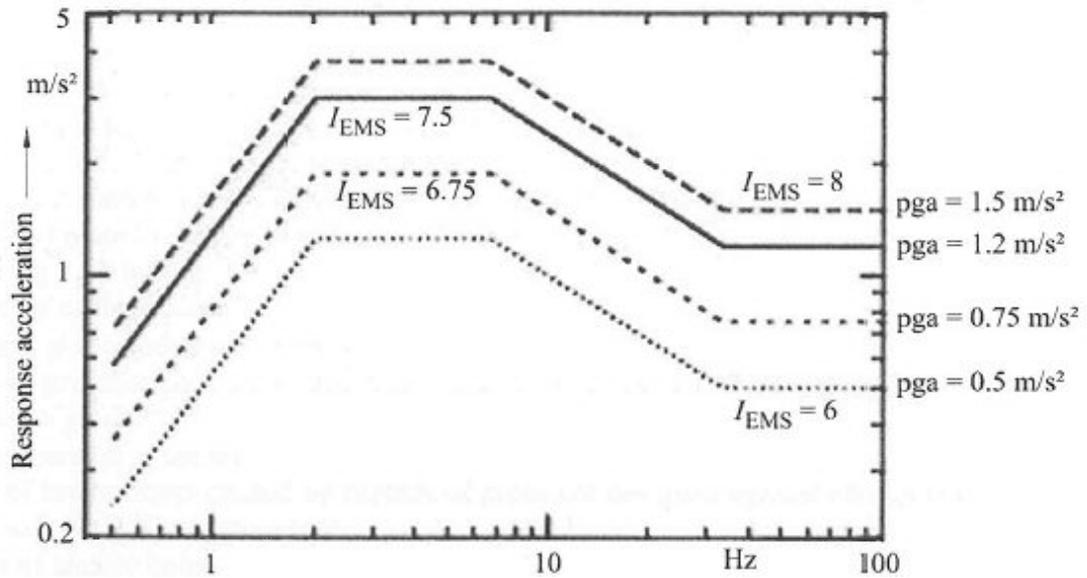
Using Safety Margins for a German Seismic PRA

**/BLO 09/** Bloem, T., R. Obenland

Experience from a Seismic Probabilistic Safety Assessment of a German PWR

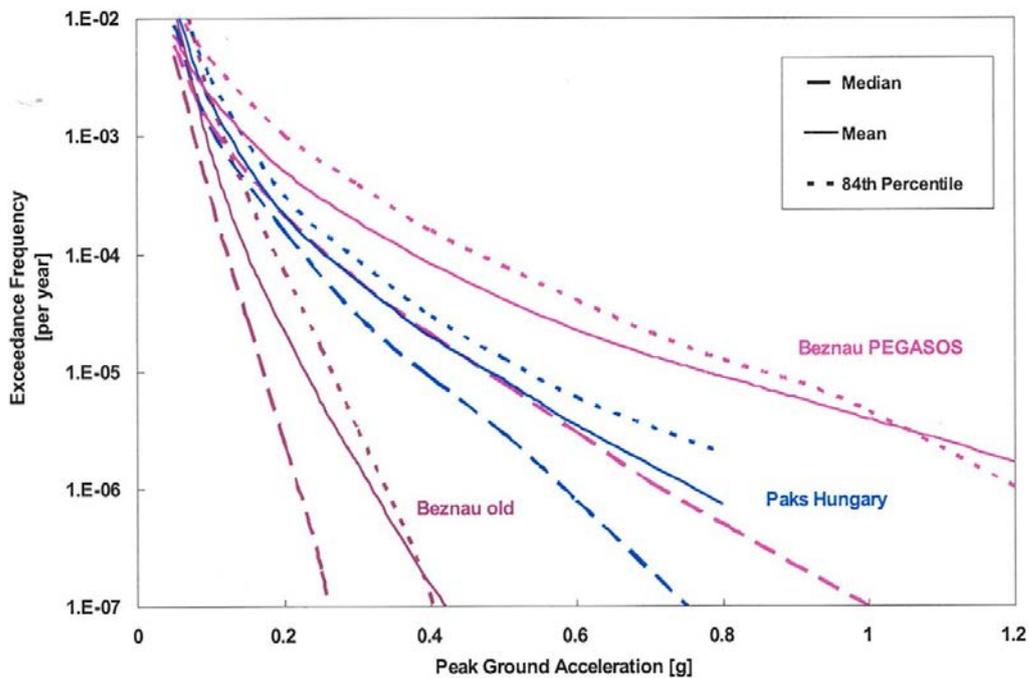
Es wurden vier Antwortspektren für die maximalen horizontalen Freifeldbeschleunigungen ermittelt ( $F = 1,5 \text{ m/s}^2$ ,  $1,2 \text{ m/s}^2$ ,  $0,75 \text{ m/s}^2$  und  $0,5 \text{ m/s}^2$ ), siehe Abb. 2-5. Daraus wurde eine standortspezifische Korrelation zwischen Intensität und maximaler Freifeldbeschleunigung bestimmt. Es ergab sich, dass am Standort der Intensität 7,5 eine maximale Freifeldbeschleunigung von  $1,2 \text{ m/s}^2$  zugeordnet werden muss.

Zum Vergleich: Bei der Auslegung wurde dem Bemessungserdbeben mit der Intensität 7,5 eine maximale Freifeldbeschleunigung von  $2,1 \text{ m/s}^2$  zugeordnet.



**Abb. 2-5** Anlagenspezifische Antwortspektren (aus /BLO 09/)

**/RIC 09/** Richner, M. et al  
 Insights gained from the Beznau Seismic PSA



**Abb. 2-6** Seismische Gefährdungskurven für die Standorte Beznau (Schweiz, alte Studie, PEGASOS) und Paks (Ungarn)

Die Schweiz ist ein Land mit geringer bis mittlerer Seismizität. Eine erste SPSA-Studie für den Standort Beznau wurde Mitte der 80er Jahre durchgeführt. Im Jahr 2004 wurden die Ergebnisse einer umfassenden neuen seismischen Gefährdungsanalyse, der sogenannten PEGASOS-Studie, veröffentlicht.

In Abb. 2-6 sind die Kurven der Überschreitenshäufigkeiten für die alte und neue Beznau-SPSA-Studien (sowie eine Vergleichskurve zum ungarischen Standort Paks) angegeben. Auffällig sind zum einen die großen Unsicherheiten und zum anderen die wesentlich größeren Überschreitenshäufigkeiten bei der PEGASOS-Studie.

Die PEGASOS-Kurve kann als repräsentativ für Gebiete mit geringer bis mittlerer Seismizität angesehen werden.

**/VAR 96/** Varpasuo, P., J. Puttonen, M. K. Ravindra

Seismic probabilistic safety analysis of unit 1 of the Loviisa NPP

Grundlage zur Auswahl der seismischen auslösenden Ereignisse sind die Fehlerbäume aus der PSA für interne Ereignisse, die das Eintreten der auslösenden Ereignisse beschreiben. Die entsprechenden minimalen Schnittmengen werden nach Komponenten mit geringer seismischer Kapazität durchsucht. Interne auslösende Ereignisse, die minimale Schnittmengen mit ausschließlich Komponenten geringer seismischer Kapazität enthalten, werden als seismische Auslöser bezeichnet.

## 2.2 Stand von Wissenschaft und Technik

Die Durchführung einer SPSA bedeutet die Bestimmung der jährlichen Häufigkeit von seismisch induzierten Gefährdungs- und Kernschadenszuständen  $KSH$  eines Kernkraftwerks. Rein formal erhält man  $KSH$  mit folgender Formel (siehe auch Kap. 7):

$$KSH = \int_0^{\infty} H(F) \left( \frac{dW(F)}{dF} \right) dF$$

Dabei ist  $F$  der makroseismische Parameter mit dem die Intensität des Erdbebens beschrieben wird (meist wird die maximale Freifeldbeschleunigung genutzt),  $H(F)$  die jährliche Überschreitenshäufigkeit von  $F$  und schließlich  $W(F)$  die bedingte Wahrscheinlichkeit für einen Kernschaden bei einem Erdbeben mit dem Parameter  $F$ . Die Funktion  $W(F)$ , formuliert in Ereignis- und Fehlerbäumen, bezeichnet man auch als Anlagenmodell. In das Anlagenmodell gehen die Wahrscheinlichkeiten der seismisch induzierten störfallauslösenden Ereignisse und die Nichtverfügbarkeiten der Systemfunktionen ein. Insbesondere sind im Anlagenmodell die Abhängigkeiten im seismischen Ausfallverhalten von technischen Einrichtungen zu beschreiben.

Anhand der ausgewerteten Literatur wäre nun aufzuzeigen, inwieweit die oben genannte Formel bei der Berechnung der seismischen  $KSH$  für ein Kernkraftwerk praktisch umgesetzt und welche Annahmen dabei getroffen wurden. In vielen Fällen muss leider konstatiert werden, dass zwar die jährliche  $KSH$  angegeben, aber nicht auf die getroffenen Annahmen eingegangen wurde. Oft kann durch den Leser nicht eingeschätzt werden, inwieweit das Ergebnis aufgrund der Vereinfachungen konservativ ist.

Nachfolgend werden kurz zusammengefasst einige wesentliche Aspekte zur Berechnung von  $KSH$  diskutiert. Dabei wird immer vom Methodenband des Leitfadens /FAK 05/ ausgegangen und dann kurz dargestellt, wie an das Problem bei der Durchführung von SPSA im internationalen Maßstab herangegangen wird. Anschließend wird dann auf das entsprechende Kap. im vorliegenden Bericht verwiesen, in dem das Problem im Detail abgehandelt wird.

In der internationalen Fachliteratur sind durchaus Ergebnisse in Form von Kernschadenshäufigkeiten *KSH* zu finden (vgl. Tab. 2-5), aber in allen Fällen ist es kaum möglich Rückschlüsse auf die dabei verwendeten Annahmen und Methoden zu ziehen.

**Tab. 2-5:** Ergebnisse von SPSA

Anlage	<i>KSH</i> [1/a]	Anmerkungen
25 Kernkraftwerke in USA /KAS 99/	2,5 E-07 bis 2,3 E-04	Die meisten Werte liegen zwischen 1 E-06 und 6 E-05. Bei einem Fünftel der Ergebnisse ist die jährliche seismische <i>KSH</i> größer als die jährliche <i>KSH</i> der PSA Stufe 1.
Kozloduy 5/6 /KOZ 04/	6,4 E-05	Es wurden 6 Intensitätsintervalle mit den jährlichen Überschreitenswahrscheinlichkeiten 1 E-01 bis 1 E-06 untersucht.
GKN-1 /KLA 08/	keine Ergebnisse angegeben	Die Intensitätsskala wurde in 6 Intervalle aufgeteilt. Jedes Intervall wird durch ein maximales <i>F</i> repräsentiert (von 0,057g bis 0,242g), Bemessungserdbeben am Standort 0,17g.
SWR-Sicherheitsanalyse /GRS 93/	Es wurde keine expliziten <i>KSH</i> ermittelt, drei Intensitäten 6, 7, 8 mit den Überschreitenshäufigkeiten 3 E-04, 3 E-06 und 4 E-08 (pro Jahr) wurden betrachtet und Häufigkeiten für das Überschreiten von Auslegungsgrenzwerten bei Gebäuden und Komponenten berechnet, z.B. Reaktorgebäude 6 E-07/a oder Maschinenhaus 6,3 E-05/a.	
/GRS 90/	3,0 E-06	<i>KSH</i> steht hier für Gefährdungshäufigkeit. Es wurden drei Intensitätsintervalle betrachtet {6,7}, {7,8} und {8,9} mit den jährlichen Eintrittshäufigkeiten 7,0 E-04; 9,5 E-05 und 5,0 E-06.

Es geht dabei insbesondere um die Fragen:

- Wie wurden die Ereignisablaufanalysen durchgeführt? Welche störfallauslösenden Ereignisse wurden einbezogen?
- Wie und welche seismische Abhängigkeiten wurden berücksichtigt?
- Wie wurde die Quantifizierung durchgeführt?

Zur Durchführung der Ereignisablaufanalysen ist im Methodenband des Leitfadens /FAK 05/ auszugsweise folgendes gesagt:

Der seismische Ausfall von BSK kann zu auslösenden Ereignissen führen. Diese Ereignisse sind mit der Ereignisbaummethode zu analysieren. Erdbebenbedingte Überlagerungen von Auslösern sind in Betracht zu ziehen. ... Für erdbebenbeding-

te Ereignisabläufe ist die Dokumentation in Form eines Ereignisbaumes nicht erforderlich. ... Die anlageninterne Überflutung ist mit zu betrachten.

Auf der Grundlage der ausgewerteten Literatur kann nicht festgestellt werden, ob es Stand von Wissenschaft und Technik ist, Überlagerungen von störfallauslösenden Ereignissen zu betrachten. Auf Grund eigener Untersuchungen wird davon ausgegangen, dass ohne Betrachtung der Abhängigkeiten beim Auftreten mehrerer störfallauslösender Ereignisse nicht gesichert werden kann, dass die Analysen konservative Ergebnisse liefern. Andererseits muss festgestellt werden, dass die Berücksichtigung der Überlagerung zu sehr komplexen seismischen Anlagenmodellen führt, die dann schwer zu quantifizieren sind (siehe dazu auch die Bemerkungen in Kap. 4.2.7 und in der Zusammenfassung Kap. 5). Es ist nicht nachvollziehbar, wieso die Dokumentation eines Ereignisbaums nicht erforderlich sein soll. Das ist in der nächsten Überarbeitung des Leitfadens zu korrigieren. Weiter ist die Aufzählung der möglichen störfallauslösenden Ereignisse zu vervollständigen. Es ist z.B. nicht klar, warum zwar anlageninterne Überflutungen genannt werden, aber keine seismisch induzierten Brände. Hier fehlt eine klare Definition. In der vorliegenden Arbeit werden sowohl der seismisch induzierte Brand als auch die seismisch induzierte Überflutung nicht als störfallauslösende Ereignisse betrachtet, sondern im Rahmen des neu entwickelten Abhängigkeitsmodells behandelt (siehe Kap. 3.2). Das ist besonders dann ein geeignetes Herangehen, wenn – wie in /KAT 08/, /MAT 08/ vorgeschlagen – für die Komponenten 'Brandfragilities' vorliegen bzw. abgeleitet werden können.

Zur methodischen Behandlung von Abhängigkeiten im Ausfallverhalten von BSK ist im Leitfaden folgendes zu finden:

Es ist anzunehmen, dass das Ausfallverhalten von gleichen Typen von BSK im gleichen Gebäude auf gleicher Höhennote stark korreliert ist, d. h. bei Erdbebenwirkung ist der gleichzeitige Ausfall aller BSK mit der Wahrscheinlichkeit eines Einzelausfalls anzunehmen.

Das ist eine recht willkürliche Festlegung; sehr konservativ für diese Fälle, aber ansonsten werden viele andere mögliche Abhängigkeiten vernachlässigt. Es konnte trotz der Vielzahl an ausgewerteter Literatur nicht festgestellt werden, was Stand von Wissenschaft und Technik bei der Modellierung von Abhängigkeiten in SPSA ist. Es konnte keine konkrete SPSA gefunden werden, bei der klare Aussagen zum Umfang der berücksichtigten Abhängigkeiten gemacht worden wären. In der vorliegenden Arbeit

wurde ein allgemeines Abhängigkeitsmodell entwickelt, mit dem man in der Lage ist, die unterschiedlichsten Abhängigkeitsformen und –varianten zu modellieren. In Folgeprojekten ist zu erproben, wie sich die Einbindung von Abhängigkeiten verschiedenen Umfangs auf die Ergebnisse von SPSA und auf die Komplexität der Berechnungen auswirkt. Des Weiteren sind gerade zu dieser Frage Recherchen in solchen Ländern geplant, in denen schon Erfahrungen mit seismischen Ereignissen und deren Modellierung vorliegen. Insbesondere geht es dann auch um die Frage, wie die physikalischen Abhängigkeiten zwischen BSK bei seismischen Einwirkungen möglichst realistisch zu modellieren sind. In der vorliegenden Arbeit wurde ein Modell geschaffen, das zwar eine Klassifizierung der Abhängigkeiten in BSK-Mengen ermöglicht und die Art der Implementierung dieser Abhängigkeiten in die Fehlerbaummodelle vorschreibt, die Beschreibung der speziellen physikalischen Kopplung der abhängigen seismischen Ausfälle ist aber weiterhin von den Seismikexperten und den Systemanalytikern abzuleiten. Dazu gibt es auch international ganz verschiedene Ansätze, angefangen von einfachen Annahmen wie der strengen Korrelation zwischen den BSK (Ausfall aller BSK einer BSK-Menge, sobald eine BSK ausfällt) bis zu komplexen Modellen, die z.B. auch bei der quantitativen Bewertung von Fehlern aus gemeinsamer Ursache eine Rolle spielen. In diesem Vorhaben wird bezüglich der Abhängigkeiten in erster Linie ein qualitativer Ansatz herausgearbeitet. Dabei sind alle BSK-Mengen zu ermitteln, die aufgrund einer (oder mehrerer) Ursachen bei seismischen Einwirkungen gemeinsam ausfallen können. Die Ursachen sind bezogen auf jede BSK-Menge zu beschreiben. Die Beschreibung aller Abhängigkeiten ist ein wesentlicher Bestandteil einer SPSA.

Zur Durchführung der Quantifizierung des seismischen Anlagenmodells sind im Leitfaden folgende Aussagen enthalten:

Die Häufigkeit der Gefährdungszustände der durch Ereignisablaufanalysen modellierten auslösenden Ereignisse wird durch Quantifizierung der Ereignis- und Fehlerbäume berechnet.

Die Berechnung erfolgt für Intensitätsbereiche.

Hier bleiben einige Fragen unbeantwortet. Es ist offensichtlich, dass die Berechnung der seismisch bedingten Kernschadenshäufigkeit mit der am Beginn des Kapitels angegebenen Formel nur näherungsweise erfolgen kann, d. h. auch, dass die Berechnung nicht stetig über den gesamten Intensitätsbereich durchgeführt wird, sondern nur für ausgewählte Intensitäten bzw. für Intensitätsbereiche. Es ist nun zu fragen, für wie viele Intensitäten bzw. Intensitätsbereiche die seismisch bedingte Kernschadenshäufigkeit

figkeit zu berechnen ist, wie geeignete Intensitäten bzw. Intensitätsbereiche ausgewählt werden können und wie aus diesen Berechnungen eine gute Näherung für die jährliche Häufigkeit von seismisch induzierten Gefährdungs- und Kernschadenszuständen *KSH* gefunden werden kann. In der internationalen Fachliteratur wurde dazu nichts gefunden. In Kap. 4.2.5 wird als Ergebnis dieses Vorhabens ein Berechnungsvorschlag gemacht.

## **3 Das seismische PSA-Anlagenmodell**

### **3.1 Struktur des seismischen Anlagenmodells**

Bei der Durchführung einer SPSA sind alle auslösenden Ereignisse zu identifizieren, die bei Erdbeben zu Gefährdungszuständen führen können. Das betrifft sowohl Auslegungsstörfälle als auch auslegungsüberschreitende Ereignisse. Für alle identifizierten auslösenden Ereignisse sind die Ereignisabläufe zu bestimmen und die Systeme bzw. ihre Funktionen zu festzulegen, die zur Beherrschung dieser auslösenden Ereignisse benötigt werden. Für den Ausfall der erforderlichen Systemfunktionen sind die Wirksamkeitsbedingungen aufgrund der minimalen Anforderungen aus den Systemanalysen in den Ereignisbäumen und Fehlerbäumen anzuwenden.

In den folgenden zwei Abschnitten werden Vor- und Nachteile von Modellierungsvarianten für ein Anlagenmodell bei seismischen Einwirkungen diskutiert und die Vorgehensweise bei der Variante näher erläutert, die im Weiteren verfolgt wird.

#### **3.1.1 Modellierungsvarianten**

Zum Aufbau eines seismischen PSA-Modells zur Beschreibung der Auswirkungen auf die Sicherheit eines Kernkraftwerks bei einem Erdbeben wird in diesem Vorhaben von drei Möglichkeiten für eine Modellierung ausgegangen:

1. Modellierung eines Ereignisbaumes bzw. Ereignisablaufdiagramms für das auslösende Ereignis Erdbeben basierend auf den Schutzziele, den Kern bedeckt zu halten, die Nachwärme abzuführen und die Integrität des Sicherheitsbehälters aufrechtzuerhalten

Den Ausgangspunkt bilden Untersuchungen zum Ablauf des Störfalls und Systemanalysen. Die Ereignisbaummodellierung ist spezifisch auf das auslösende Ereignis Erdbeben ausgerichtet. Dabei werden Fehlerbäume aus der PSA der Stufe 1 zum Leistungsbetrieb zur Beschreibung des Ausfalls von im Störfall relevanten Systemfunktionen genutzt, wobei die Fehlerbäume erdbebenspezifisch erweitert werden, d.h. dass für jede Komponente neben den Zufallsausfällen auch seismisch beding-

te Ausfälle zu berücksichtigen sind und dass erdbebenbedingte Abhängigkeiten bei den Ausfällen einbezogen werden (siehe Kap. 3.2).

2. Zurückführung des auslösenden Ereignisses Erdbeben auf bereits untersuchte auslösende Ereignisse entsprechend den Referenzlisten im Leitfaden /FAK 05/

Dazu werden generische Fehlerbäume aufgestellt, die die Einleitung dieser Störfall auslösenden Ereignisses (SAE) beschreiben. Für die Modellierung des Ausfalls der Beherrschung dieser auslösenden Ereignisse wird dann in gewohnter Weise auf die vorhandenen Ereignis- und Fehlerbäume der PSA der Stufe 1 für den Leistungsbetrieb zurückgegriffen. Da bei einem Erdbeben zu erwarten ist, dass sich mehrere auslösende Ereignisse überlagern (z.B. Offenbleiben eines Druckhalter-Abblaseventils und Notstromfall), wird diese Überlagerung in einem Ereignisbaum analysiert. Für sich überlagernde auslösende Ereignisse müssen die Ereignisbäume für den Ausfall der Beherrschung dieser auslösenden Ereignisse neu modelliert werden, da solche in der PSA für den Leistungsbetrieb nicht modelliert wurden. Die Modellierung und die numerische Bewertung von Ereignis- und Fehlerbäumen wird mit Hilfe des Programms RiskSpectrum<sup>®</sup> durchgeführt.

3. Schadensbildermittlung mit Hilfe einer Ausfalleffektanalyse (FMEA) unter Zuhilfenahme des Programms RAVE<sup>1</sup>

Mit dem Programm RAVE kann bestimmt werden, welche Komponenten aufgrund eines erdbebenbedingten Ausfalls mit einer Wahrscheinlichkeit größer Null ausgefallen sind. Anhand der ermittelten Ausfallwahrscheinlichkeiten kann die Importanz der Komponenten abgeschätzt werden, ob der alleinige Ausfall der Komponente oder zusammen mit anderen Komponentenausfällen zu einem zu berücksichtigenden Störfall auslösenden Ereignis führt. Basierend auf dem Ergebnis der FMEA werden Fehlerbäume für die Einleitung von SAE erstellt. Bei sich überlagernden auslösenden Ereignissen müssen die Fehlerbäume ggf. auch über logische Negierungen verknüpft werden. Die TOP-Ereignisse der Fehlerbäume für die SAE werden mit den TOP-Ereignissen der Fehlerbäume für den Ausfall der Systemfunktionen zu ihrer Beherrschung UND-verknüpft. Die rechnerische Ermittlung der Häufig-

---

<sup>1</sup> Separat aufrufbares Programm des Programms CRAVEX

keit eines Gefährdungs- oder Kernschadenzustandes erfolgt mit dem Programm CRAVEX<sup>2</sup>.

Die Abwägung der Vor- und Nachteile der drei Modellierungsvarianten führten schließlich zum Ergebnis, die weiteren Untersuchungen bzw. die Methodenentwicklung mit der zweiten Vorgehensweise fortzusetzen.

Die erste Modellierungsvariante erscheint relativ aufwendig, weil zunächst deterministisch die Ereignisabläufe unter Berücksichtigung der notwendigen Funktionen von Systemen bzw. dem Ausfall von Systemfunktionen analysiert werden müssen, um im Anschluss die Ergebnisse in Ereignisbäumen abzubilden.

Bei der zweiten Modellierungsvariante hingegen können die Kenntnisse, Ereignis- und Fehlerbäume der Standardereignisse (siehe /BMU 05/, wie z.B. Leckstörfälle, sonstige Lecks und Transienten aus der PSA der Stufe 1 für Leistungsbetrieb verwendet werden. Es müssen quasi 'nur noch' die Verknüpfungen zwischen dem Ereignis Erdbeben und diesen Standardereignissen mit Hilfe eines Fehlerbaumes erstellt werden, mit dem die Übergangswahrscheinlichkeiten berechnet werden können. Ein solcher Fehlerbaum wird im weiteren Verlauf als Auslöserfehlerbaum bezeichnet. Ein solcher Fehlerbaum beschreibt, welche Ausfallkombinationen infolge eines Erdbebens zu einem Standardereignis führen. Sind die Zuverlässigkeitsdaten für diese Ausfälle ermittelbar, können mit Hilfe des Fehlerbaumes auch die Übergangswahrscheinlichkeiten ermittelt werden. Diese Aufgabe erscheint nach unserer Einschätzung mit geringerem Aufwand lösbar zu sein. Zudem müssen darüber hinaus sich überlagernde auslösende Ereignisse hinsichtlich ihrer Beherrschung untersucht werden. Dabei hat die zweite Herangehensweise auch den Vorteil einer klaren Strukturierung, indem man die verschiedenen schon untersuchten auslösenden Ereignisse miteinander kombiniert. Mit der Berechnung der Wahrscheinlichkeiten des Auftretens von sich überlagernden Ereignissen, können numerisch fundierte Entscheidungen zur Berücksichtigung derartiger Kombinationen von auslösenden Ereignissen in der weiteren Analyse getroffen werden.

Die dritte Variante mit der zeitaufwendigen Anwendung der Programme RAVE und CRAVEX wurde verworfen, weil die Vorteile gegenüber einer Modellierung mit dem

---

<sup>2</sup> GRS-Programm zur probabilistischen Bewertung von Bränden und Erschütterungen

Programm Riskspectrum<sup>®</sup> beim Erdbeben nicht oder nur geringfügig vorhanden sind. Die Gründe werden nachfolgend erläutert.

Das simulative Programm CRAVEX hat für diejenigen Anwendungsfälle, für das es speziell konzipiert wurde, erhebliche Vorteile. Als mögliche Anwendungsfälle gelten bislang anlageninterne Brände sowie Flugzeugabstürze mit partieller Zerstörung von Gebäuden einschließlich Folgebrände. Der Anwendungsfall Flugzeugabsturz war der Initiator für die Entwicklung von CRAVEX.

Es ist ein wesentlicher Anwendungsvorteil von CRAVEX gegenüber einer Modellierung mit dem Programm Riskspectrum<sup>®</sup>, dass relevante Schadenszenarios aufgrund von Brand oder Flugzeugabsturz, die ein störfallauslösendes Ereignis verursachen, ohne größeren Aufwand probabilistisch bewertet werden können. Hierfür wird bei Eintritt eines solchen Ereignisses die Ausfallwahrscheinlichkeit der Räume und der darin befindlichen Komponenten berechnet (Anwendung des Programms RAVE). Anhand der Größe dieser Ausfallwahrscheinlichkeiten kann dann abgeschätzt werden, welche dieser Komponenten in eine FMEA für die Identifizierung eines störfallauslösenden Ereignisses einzubeziehen sind. Es findet dadurch eine Reduzierung von zu betrachtenden Komponentenausfällen statt, so dass die Ausfalleffektanalyse mit einem akzeptablen Zeitaufwand durchgeführt werden kann. Bei einem seismischen Ereignis hingegen entfällt dieser Vorteil, weil das Erdbeben nicht nur auf einzelne Räume bzw. Komponenten einwirkt, sondern die gesamte Kraftwerksanlage betroffen ist.

Der zweite wesentliche Pluspunkt von CRAVEX ist, dass der Ort der Schadensentstehung (z.B. der Raum der Brandentstehung) und die Wahrscheinlichkeit für Folgeausfälle von Komponenten und Räumen einfach über die Eingabe per Programmoberfläche berücksichtigt werden können. Die bedingten Übergangswahrscheinlichkeiten bzw. Folgeausfälle zwischen Räumen und Komponenten werden durch CRAVEX entsprechend logisch verarbeitet. Bei einer Modellierung mit Riskspectrum<sup>®</sup> müssten die Übergangswahrscheinlichkeiten für die Schadensausbreitung als Basisereignisse in den Fehlerbäumen modelliert werden. Dabei müssten diese Basisereignisse aufgrund der Wege der Schadensausbreitung jeweils in Abhängigkeit des Raums, in dem der Schaden ursächlich eingetreten ist, in der Fehlerbaumstruktur modelliert werden. Das führt jedoch zu einer Explosion der Fehlerbaumstruktur. Zudem müsste ein Teil der Basisereignisse in Abhängigkeit des Orts des ursächlichen Schadens durch House Events zu- bzw. abgeschaltet werden. Die Berechnung durch CRAVEX ist somit für von Räumen ausgehende Schäden von Vorteil, vor allem wenn viele Räume als Ort

der Schadensentstehung zu untersuchen sind. Bei einem Erdbeben sind jedoch Ausfälle nur von der einen Ursache Erdbeben bzw. von durch Erdbeben ausgefallene Komponenten abhängig. Das Erdbeben wirkt jeweils auf das ganze Gebäude und die darin befindlichen Räume und Komponenten. Das Schadensbild ist also nicht von Schadensübergangswahrscheinlichkeiten zwischen den Räumen geprägt. Die Modellierung der Fehlerbäume für das Erdbeben braucht daher nur einmal für die Systeme durchgeführt werden, weil die Modellierung nicht von einem sich ständig ändernden Schadensbild abhängig ist. Da auch dieser geschilderte Vorteil entfällt, ergibt sich auch daraus keine Notwendigkeit CRAVEX für die Berechnung von Schadenshäufigkeiten bei Erdbeben zu verwenden.

Zu überlegen ist noch, ob der Programmteil RAVE für die Erstellung von sogenannten Auslöserfehlerbäumen nutzbar wäre. Es könnten die Wahrscheinlichkeiten von durch Erdbeben ausgefallenen Komponenten ausgespielt werden und für eine FMEA verwendet werden. Solange keine Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Komponenten modelliert, ist der mögliche Output identisch mit der Liste aller durch Erdbeben ausgefallenen Komponenten, auf- bzw. absteigend nach den Wahrscheinlichkeiten aufgrund des Ausfalls durch Erdbeben. Für die anschließende FMEA können ggf. numerische Vernachlässigungen abgeleitet werden. Unabhängig davon ist die Erzeugung von Auslöserfehlerbäumen mit Hilfe einer vorangegangenen FMEA arbeitstechnisch sehr aufwendig, weil die Anzahl der durch Erdbeben ausgefallenen Komponenten schlichtweg zu groß ist, um dann mittels Kombinatorik von Komponentenausfällen in einem 'Brainstorming-Prozess' Auslöserfehlerbäume zu erzeugen.

Aufgrund dieser Abwägungen ist es sinnvoll, eine vollständige Modellierung mit Risk-Spectrum<sup>®</sup> durchzuführen (Modellierungsvariante 2). Das analytische Programm Risk-Spectrum<sup>®</sup> hat gegenüber dem simulativen Programm CRAVEX außerdem den Vorteil kürzerer Rechenzeiten und einer bequemen Durchführbarkeit von Unsicherheitsanalysen.

### 3.1.2 Erstellung erdbebeninduzierter Ereignisabläufe

Ein seismisches Ereignis kann je nach Schadensbild zu unterschiedlichen störfallauslösenden Ereignissen (SAE) führen. Anders als bei einer PSA der Stufe 1 für interne Ereignisse bei Leistungsbetrieb, bei der die Häufigkeit von Transienten aus der Betriebserfahrung ermittelt werden kann, liegen kaum beobachtete erdbebeninduzierte SAE vor. Weiterhin können erdbebenbedingte Ausfälle von Komponenten, die eine Transiente auslösen, und die erdbebenbedingten Ausfälle von Komponenten zur Störfallbeherrschung, voneinander abhängig sein, weil sie zum Beispiel im gleichen Gebäude aufgestellt sind. Weitere Beispiele zur Abhängigkeit von BSK im Erdbebenfall sind im Kap. 3.2 angegeben.

Es ist daher zweckmäßig, die Einleitung auslösender Ereignisse durch Fehlerbäume darzustellen und diese als Verzweigungsabfrage in einen Ereignisbaum einzubinden, dessen Pfade mit den Ereignisbäumen für die Störfallbeherrschung der erforderlichen Systemfunktionen zur Beherrschung der identifizierten auslösenden Ereignisse zu verknüpfen sind. Diesen Ereignisbaum nennen wir im Weiteren „Ereignisbaum für die Auswahl der auslösenden Ereignisse aufgrund von Erdbeben“.

Ein derartiger Fehlerbaum beinhaltet als TOP-Ereignis das Zustandekommen eines auslösenden Ereignisses. Zu einem auslösenden Ereignis führt im Allgemeinen das Verlassen von stabilen Betriebszuständen, veranlasst durch den Ausfall von Betriebssystemen oder infolge der Anregung von Reaktorabschaltungen. So ist der Ausfall der Hauptwärmesenke durch den Ausfall der Frischdampfumleitstation, des Hauptkondensators oder der rückkühlenden Systeme verursacht. Der Ausfall dieser Systeme wird deduktiv also im Top-Down-Verfahren untersucht und in einem Fehlerbaum abgebildet. Dieser generische Fehlerbaum ist an das Ereignis Erdbeben anzupassen, das heißt es werden die in Kap. 4.2 genannten Basisereignisse mit den notwendigen Fragilities und Abhängigkeitsparametern im Fehlerbaum implementiert. Des Weiteren müssen auch solche Komponentenausfälle in den Fehlerbäumen berücksichtigt werden, die in einer PSA für den Leistungsbetrieb nicht berücksichtigt werden. Als Beispiel sei hier das Fehlschließen von handbetätigten Schaltern genannt, die normalerweise nur durch Hand fehlbetätigt werden können. In einer PSA für den Leistungsbetrieb ist ein selbständiges Auslösen oder auch Schalten von handbetätigten Schaltern auszuschließen, da Schaltvorgänge nur durch einen Energieaufwand zustande kommen. Dagegen muss bei Erdbeben untersucht werden, ob die Erdbebenenergie, die auf den Schalter wirkt, ausreichend ist, um Schaltvorgänge auszulösen.

Die Berücksichtigung erdbebenbedingter Ausfälle solcher Komponenten müssen aber nicht nur in den Fehlerbäumen für die Einleitung von auslösenden Ereignissen berücksichtigt werden, sondern auch in den Fehlerbäumen, die den Ausfall der Beherrschung durch erforderliche Systemfunktionen beschreiben. Die Anpassung der Fehlerbäume und vor allem die Erzeugung der Fehlerbäume für die auslösenden Ereignisse sind arbeitsintensiv, müssen aber nur einmal durchgeführt werden. Die Fehlerbäume können dann für alle Erdbeben, unabhängig von der Intensität verwendet werden.

Die Menge aller in den seismischen Ereignis- und Fehlerbäumen zu berücksichtigenden BSK ist in der sogenannten seismischen Ausrüstungsliste (SAL) enthalten. In /TUE 10/ wurde ein Verfahren zum systematischen Aufbau dieser SAL im Rahmen von SPSA entwickelt.

Mit einer relativ hohen Wahrscheinlichkeit treten bei einem Erdbeben die folgenden auslösenden Ereignisse auf:

- Notstromfall,
- Ausfall Hauptwärmesenke,
- Ausfall Hauptspeisewasser.

Weitere auslösende Ereignisse, wie z.B. Brand, Kühlmittelverluststörfälle oder Überflutungen treten, entsprechend der individuellen Erdbebenempfindlichkeit der BSK, mit geringerer Wahrscheinlichkeit auf. Die Eintrittshäufigkeiten für erdbebenbedingt ausgelöste Ereignisse ist zu ermitteln. Dies kann entweder durch eine Ausfalleffektanalyse (FMEA, bottom up) oder durch Auslöser-Fehlerbäume (top down) geschehen. Bei der FMEA wird für alle BSK analysiert, inwieweit deren erdbebenbedingte Ausfälle Auswirkungen hinsichtlich eines auslösenden Ereignisses haben. Die Vorgehensweise mittels FMEA ist aufgrund der Vielzahl von durch Erdbeben potentiell ausgefallenen Komponenten und der entsprechenden Ausfallkombinationen, die zu einem auslösenden Ereignis führen, extrem aufwändig, so dass der Erstellung von Auslöser-Fehlerbäumen im Top-Down-Verfahren der Vorzug zu geben ist. Bei der Modellierung von Auslöser-Fehlerbäumen wird untersucht, welche BSK-Ausfälle bzw. -Ausfallkombinationen zu einem auslösenden Ereignis führen. Die gefundenen BSK-Ausfälle werden entsprechend der individuellen Erdbebenempfindlichkeit mit Daten versehen (Zuordnung von Versagenswahrscheinlichkeiten, siehe Kap.3.3.5). Stochastische Ausfälle können hier vernachlässigt werden, da das Zeitfenster für das gleichzeitige Auftreten eines Zufalls-

fehlers und eines Erdbebenereignisses sehr klein ist. Das ist bei der Störfallbeherrschung anders, da dort überwiegend Stand-by-Systeme angefordert werden.

Da bei einem Erdbeben mehrere auslösende Ereignisse gleichzeitig auftreten und sich dabei gegenseitig beeinflussen können, müssen diese auch in einem gemeinsamen Ereignisablauf modelliert werden: Zunächst werden die Verzweigungen hinsichtlich der auslösenden Ereignisse gebildet mit den jeweiligen Wahrscheinlichkeiten für deren Eintreten bei Erdbeben einer bestimmten Intensität.

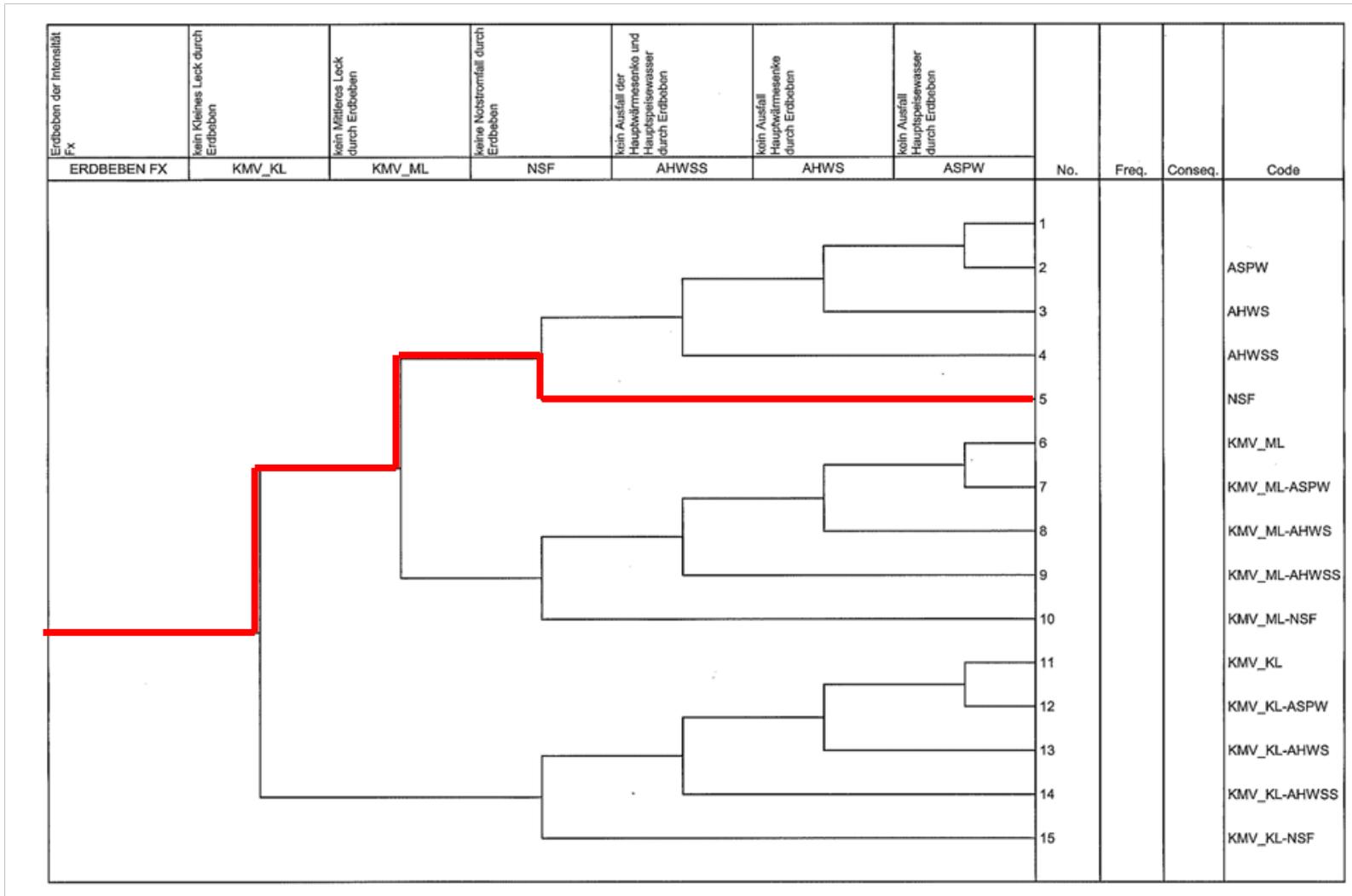
Die Endzustände des *Ereignisbaumes für die Auswahl der auslösenden Ereignisse aufgrund von Erdbeben* ergeben die Eingangsinformation für die Ereignisablaufanalyse, nämlich die Kombination der möglichen auslösenden Ereignisse und der jeweiligen Eintrittshäufigkeit. An die Endzustände wird je ein Ereignisbaum angeknüpft, der grundsätzlich die Störfallabläufe für jede 'Kombination von auslösenden Ereignissen', also die Superposition von verschiedenen aus der PSA für den Leistungsbetrieb bekannten Ereignisse abbildet. Dabei können bei verschiedenen Auslöser-Kombinationen mit zu erwartendem gleichen Störfallverlauf gleiche Ereignisbäume angeknüpft werden (Diese Vorgehensweise entspricht damit in etwa der Vorgehensweise beim Übergang von PSA der Stufe 1 zu Stufe 2).

Ein Beispiel für einen *Ereignisbaum für die Auswahl der auslösenden Ereignisse aufgrund von Erdbeben* zeigt Abb. 3-1. Dort sieht man links als einleitendes Ereignis ein Erdbeben einer bestimmten Intensität (hier: einer bestimmten maximalen Freifeldbeschleunigung  $F_x$ ). Daran reihen sich die zu erwartenden auslösenden Ereignisse (kleines Leck durch Erdbeben, mittleres Leck durch Erdbeben, Notstromfall durch Erdbeben, Ausfall Hauptwärmesenke und Hauptspeisewasser durch Erdbeben, Ausfall Hauptwärmesenke durch Erdbeben, Ausfall Speisewasser durch Erdbeben). Die Reihe der zu erwartenden auslösenden Ereignisse ist bei einer Erdbeben-PSA systematisch zu vervollständigen. Es kann vorläufig unterstellt werden, dass das Ereignisablaufdiagramm von Abb. 3-1 weitgehend diejenigen auslösenden Ereignisse abbildet, die sich bei einem Erdbeben ereignen können. Es soll allerdings darauf hingewiesen werden, dass je nach Beeinträchtigung der Integrität von Komponenten durch Erdbeben auch lokale Brände sowie anlageninterne Überflutungen allein oder zusätzlich vorstellbar sind. Sowohl Brände als auch Überflutungen werden allerdings nicht im *Ereignisbaum für die Auswahl der auslösenden Ereignisse aufgrund von Erdbeben* sondern nur in den Systemfehlerbäumen als Abhängigkeiten modelliert (siehe dazu /TUE 10/ und ein Beispiel in Tab. 3-1 des vorliegenden Berichts).

Die möglichen Ereignisabläufe enden im Ereignisablaufdiagramm in Abb. 3-1 in Superpositionen der auslösenden Ereignisse. Die Ablaufpfade beginnen jeweils beim auslösenden Ereignis und passieren dann die auslösenden Ereignisse, die im RiskSpectrum<sup>®</sup>-Projekt als Funktionsereignis definiert sind. Es wird an den Verzweigungen abgefragt, ob das Funktionsereignis eintritt oder nicht eintritt. Geht der Pfad am Verzweigungspunkt nach oben, bedeutet dies, dass wie im Funktionsereignis definiert, das genannte Ereignis durch Erdbeben nicht eintritt. Bei nach unten gerichtetem Pfad am Verzweigungspunkt tritt dagegen das auslösende Ereignis ein. Grundsätzlich ist es - soweit der Ereignisablauf richtig modelliert ist - gleichgültig, in welcher Reihenfolge die Funktionsereignisse abgefragt werden. Es ist jedoch zweckmäßig zunächst das Eintreten von möglichen Lecks abzufragen und dann das Eintreten von Transienten. Unabhängig davon ob ein Leck eintritt oder nicht, wird abgefragt, ob ein Notstromfall allein oder in Kombination mit Lecks eintritt. Tritt ein Notstromfall ein, braucht nicht mehr abgefragt werden, ob auch die Hauptwärmesenke oder das Hauptspeisewasser ausgefallen sind. Beide Systeme stehen bei einem Notstromfall nicht zur Verfügung. Zweckmäßigerweise wird dann die Kombination aus Ausfall Hauptspeisewasser und Hauptwärmesenke abgefragt, weil bei deren Auslösung die einzelnen auslösenden Ereignisse nicht mehr abgefragt werden müssen. Tritt diese Kombination nicht ein, wird anschließend abgefragt, ob einer der beiden verbliebenen auslösenden Ereignisse eingetreten ist.

Bei einer Erdbeben-PSA werden diese seismisch bedingten Wahrscheinlichkeiten für die Funktionsereignisse entweder durch externe FMEA-Untersuchungen oder durch Einbinden von Auslöser-Fehlerbäumen ermittelt. Die Einbindung von Auslöserfehlerbäumen ist vorzuziehen, da dadurch Abhängigkeiten zwischen auslösendem Ereignis und Störfallbeherrschung automatisch berücksichtigt werden, wenn z.B. der Ausfall von Komponenten sowohl zum auslösenden Ereignis führt als auch für die Störfallbeherrschung eine Rolle spielt. Die Ereignisablaufpfade enden jeweils in einer Kombination aus einem oder mehreren auslösenden Ereignissen. Die Ereignissequenz mit der laufenden Nr. 1 beschreibt dagegen den Eintritt des Erdbebens ohne Auslösung weiterer Ereignisse. In der Spalte „Freq.“ stehen die Häufigkeiten für die möglichen auslösenden Ereignisse bzw. deren Superposition nach Durchführung der probabilistischen Bewertung.

Im Beispiel in Kap. 4.2 wird nur der seismisch bedingte Notstromfall (rot gekennzeichnete Ereignissequenz mit der laufenden Nr. 5) betrachtet.



**Abb. 3-1** Ereignisbaum für die Berechnung der Eintrittshäufigkeit von verschiedenen auslösenden Ereignissen bzw. Kombination durch Erdbeben

### 3.2 Berücksichtigung seismischer Abhängigkeiten

Bei einem Erdbeben sind alle Bauwerke, Systeme und Komponenten an einem Kraftwerksstandort betroffen. Die wenigen vorliegenden Auswertungen zum Ausfallverhalten von BSK bei einem realem Erdbeben zeigen allerdings, dass die logisch erscheinende Annahme einer starken Korrelation der Ausfälle aller BSK, durch eine Reihe entgegengesetzt wirkender Faktoren gemindert wird (siehe dazu die Auswertung zu /BUD 91/ in Kap. 2.1). Die Methoden zur Beschreibung von derartigen Korrelationen in einem aus Ereignis- und Fehlerbäumen gebildeten Anlagenmodell sind bekannt, allerdings ist auch in den heutigen SPSA immer noch keine einheitliche, theoretisch und empirisch begründete Herangehensweise abgeleitet worden. Dabei geht es vor allem darum, Mengen von BSK unterschiedlicher Korrelation auf der Grundlage vorgegebener Kriterien zusammenzustellen und die mengenbezogenen Korrelationsparameter zu quantifizieren. Zur Bestimmung der Korrelationsparameter ist es nachteilig, dass kaum experimentelle Ergebnisse (z.B. Auswertungen von Rütteltests oder Analysen zu den Auswirkungen realer Erdbeben) in Bezug auf BSK-Ausfall-Korrelationen vorliegen. Zur quantitativen Bewertung der Abhängigkeiten bleibt also nur der Weg der Sensitivitätsanalyse.

Nachfolgend wird ein allgemeines Modell zur Beschreibung der Abhängigkeit von BSK-Ausfällen abgeleitet. Dabei wird zum einen davon ausgegangen, auf welche Art und Weise einzelne Komponenten aufgrund seismischer Einwirkungen ausfallen können (Kap. 3.2.1) und zum anderen werden Mengen von Komponenten gesucht, deren seismisches Ausfallverhalten voneinander abhängig ist (Kap. 3.2.2). Die Herangehensweise wird an einem einfachen Beispiel verdeutlicht (Kap. 4.1). Schließlich werden die Erkenntnisse in einem Modell zur Beschreibung von seismisch-abhängigen Ausfällen zusammengefasst (Kap. 3.2.3).

Jede Art seismischer Abhängigkeit wird durch ein Wertetripel  $\{\mathbf{A}, \mathbf{M}, \kappa\}$  beschrieben.

$\mathbf{M}$  sei eine Menge seismisch relevanter BSK, d. h. jede BSK aus  $\mathbf{M}$  gehört zur seismischen Ausrüstungsliste SAL.

$\mathbf{A}$  sei eine gemeinsame Eigenschaft aller BSK aus  $\mathbf{M}$ , die bei einem Erdbeben zum abhängigen Ausfall von BSK aus  $\mathbf{M}$  führen kann.

**A** beschreibt die Ursache für den seismisch bedingten korrelierten Ausfall von BSK aus **M** und  $\kappa$  das Ausmaß der Korrelation.

$W_A(F)$  ist die Wirksamkeitsfunktion der Eigenschaft **A** bei gegebenen makroseismischen Parameter  $F$ . Durch  $W_A(F)$  wird die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von abhängigen Ausfällen in **M** quantifiziert. Ist  $W_A(F)$  größer als Null bedeutet das nur, dass mit dieser Wahrscheinlichkeit BSK irgendwelcher Teilmengen aus **M** gemeinsam aufgrund der seismischen Einwirkung ausfallen

Die gemeinsame Eigenschaft **A** der BSK aus **M** kann z.B. sein:

- BSK stehen in einem Gebäude  
(hier beschreibt die Wirksamkeitsfunktion  $W_A(F)$  die Wahrscheinlichkeit für einen Zusammenbruch des Gebäudes bei einem mit dem makroseismischen Parameter  $F$  charakterisierten Erdbeben),
- BSK sind in einem Raum  
(hier könnte die Wirksamkeitsfunktion  $W_A(F)$  die Wahrscheinlichkeit für den Einsturz der Raumdecke bei einem mit dem makroseismischen Parameter  $F$  charakterisierten Erdbeben beschreiben),
- BSK befinden sich im Ausbreitungsbereich eines Brandherdes  
(hier beschreibt die Wirksamkeitsfunktion  $W_A(F)$  die Wahrscheinlichkeit der Brandentstehung an einer zuvor durch Brandanalysen identifizierten BSK)  
oder
- BSK sind vom gleichen Typ und auf gleicher Kote angeordnet  
(hier kann z.B. angenommen werden, dass eine Korrelation der Ausfälle der BSK aus **M** immer zu berücksichtigen ist, dann ist  $W_A(F) = 1$  für alle  $F$ ).

Die Wirksamkeitsfunktion  $W_A(F)$  der Eigenschaft **A** kann in den meisten Fällen durch den Ausfall einer BSK (mit Angabe einer Fragility) beschrieben werden, d. h. das seismische Eintreten von **A** stellt die Ursache für den eventuellen Ausfall von BSK-Teilmengen aus **M** dar.

Der dritte Wert im Tripel **{A, M,  $\kappa$ }** ist  $\kappa$ ,  $\kappa$  steht für die Kopplungsfunktion  $\kappa(M, F)$ . Mit der Kopplungsfunktion wird beschrieben, in welchem Umfang bei Wirksamkeit der Eigenschaft **A** mit einem abhängigen Ausfall von BSK aus Teilmengen von **M** bei gegebenen seismischen Parameter  $F$  zu rechnen ist.

Die Kopplungsfunktion  $\kappa(M,F)$  ist ebenso wie die Wirksamkeitsfunktion  $W_A(F)$  der Ausfallursache **A** der BSK aus **M** von der Erdbebenstärke  $F$  abhängig. Weitere Beispiele für  $\{A, M, \kappa\}$  sind in Tab. 3-1 gegeben.

In vielen Anwendungsfällen kann angenommen werden, dass  $\kappa(M,F)$  sowohl unabhängig von der Erdbebenstärke ist als sich auch immer nur auf die Gesamtmenge **M** bezieht (siehe dazu auch die Beispiele in Tab. 3-1). Dann ist  $\kappa$  ein einfacher Parameter, der beschreibt, in wie vielen Fällen bei Wirksamwerden einer Eigenschaft **A** alle BSK aus **M** gemeinsam ausfallen.

Zur Sicherstellung der umfassenden Berücksichtigung seismischer Abhängigkeiten ist das Auswahlverfahren anzuwenden, siehe dazu die Ergebnisse aus /GRS 01/. Im Auswahlverfahren werden vor allem auf der Grundlage von Auswertungen der Anlagendokumentation und von systematischen Begehungen zuerst qualitativ alle Mengen von BSK erfasst, die aufgrund von (entsprechend dem SPSA-Umfang) vorgegebenen Eigenschaften ein seismisch abhängiges Ausfallverhalten vermuten lassen (Auswahlschritt 1). Bei nachfolgenden Begehungen (Auswahlschritt 2) werden die Abhängigkeiten quantifiziert, d. h. es sind die Funktionen  $W_A(F)$  und  $\kappa(M,F)$  zu bestimmen. Dabei kann es durchaus vorkommen, dass zuvor vermutete Abhängigkeiten nach erneuter Begehung und eingehender Begutachtung verworfen werden können. In solchen Fällen ist dann insbesondere  $\kappa(M,F)$  gleich Null zu setzen, d. h. auch, dass die vorher vermutete Abhängigkeitsmenge **M** in der Datenbank erhalten bleibt. So bleiben alle einmal getroffenen Entscheidungen nachvollziehbar.

### 3.2.1 Komponentenausfälle aufgrund von seismischen Einwirkungen

Die Nichtverfügbarkeit einer Komponente **K** bei Erdbebeneinwirkung mit einem gegebenen makroseismischen Parameter **F** (steht hier für die maximale Freifeldbeschleunigung, kann aber auch für andere äquivalente Parameter wie z.B. die Intensität stehen) setzt sich folgendermaßen zusammen:

a)  $NV_K$

(Nichtverfügbarkeit der Komponente aus PSA Stufe 1)

Diese Nichtverfügbarkeit ist unabhängig vom Erdbeben und damit auch unabhängig vom makroseismischen Parameter **F**.

b)  $W_K(F)$

(erdbebenbedingte Versagenswahrscheinlichkeit der Komponente **K**, unabhängiges Einzelversagen der Komponente)

Die erdbebenbedingte Versagenswahrscheinlichkeit (Fragility) einer Komponente ist abhängig vom makroseismischen Parameter **F** des Erdbebens, d. h. der ursprüngliche Fehlerbaum wird um eine Dimension erweitert (siehe auch Abb. 3-2)

c)  $P_{K/M}(F)$

(erdbebenbedingte Versagenswahrscheinlichkeit der Komponente **K**, Berücksichtigung von Abhängigkeiten zu anderen BSK)

Es wird angenommen, dass die Komponente **K** zu einer Gruppe von BSK gehört, die aufgrund einer gemeinsamen Eigenschaft **A** abhängig voneinander ausfallen. Diese BSK-Gruppe wird **M** genannt. Die gemeinsame Eigenschaft kann z.B. eine gemeinsame Bodenplatte, eine starre Verbindung zwischen den BSK, die Aufstellung in einem Raum oder einem Gebäude (Nähe der Aufstellung) sein.

Diese Versagenswahrscheinlichkeit ist bei allen BSK im Anlagenmodell zu berücksichtigen, die zur BSK-Gruppe **M** gehören.

Die Versagenswahrscheinlichkeit  $P_{K/M}(F)$  setzt sich zusammen aus der erdbebenbedingten Versagenswahrscheinlichkeit  $W_A(F)$  der gemeinsamen Eigenschaft (z.B. Gebäudeversagen) und einem Parameter  $\kappa$  als Maß dafür, dass das Versagen der gemeinsamen Eigenschaft **A** zum Ausfall aller BSK der Gruppe **M** führt (Hier wird zur Veranschaulichung und Vereinfachung der Problematik angenommen, dass die Kopplungsfunktion  $\kappa(M,F)$  konstant, d. h. unabhängig von **F** und **M** ist,  $\kappa(M,F) = \kappa$ ).

Ist  $\kappa = 1$ , führt das Versagen der gemeinsamen Eigenschaft **A** zum Ausfall aller BSK der Gruppe **M**.

Allgemein gilt:

$$P_{K/M}(F) = P_A(F) \cdot \kappa \quad \forall K \in M$$

d)  $P_{K/BSK_{Klasse2}}(F)$

(Versagenswahrscheinlichkeit der Komponente **K** durch erdbebenbedingtes Versagen einer BSK der Klasse II /KTA 90/)

Die Versagenswahrscheinlichkeit  $P_{K/BSK_{Klasse2}}(F)$  setzt sich zusammen aus der

erdbebenbedingten Versagenswahrscheinlichkeit  $P_{BSK_{Klasse\ 2}}(F)$  der BSK der Klasse II (z.B. einer Brandschutzmauer) und einer Wahrscheinlichkeit  $\kappa$  als Maß dafür, dass das Versagen der BSK der Klasse II zum Ausfall der Komponente **K** führt:

$$P_{K/BSK_{Klasse\ 2}}(F) = P_{BSK_{Klasse\ 2}}(F) \cdot \kappa$$

Man könnte z.B. im Fall der Brandschutzmauer  $\kappa = 0,5$  annehmen, d. h. die Komponente **K** wird nur zerstört, wenn die Mauer auch in Richtung der Komponente zusammenbricht.

Entsprechend dieser Formel können auch Folgeschäden an der Komponente **K** durch Lastabstürze behandelt werden.

e)  $P_{K/Brand}(F)$

(Versagenswahrscheinlichkeit der Komponente **K** durch erdbebenbedingten Brandschaden)

An einer BSK in der Nähe der Komponente **K** tritt erdbebenbedingt in Abhängigkeit von der Stärke des Erdbebens ein Brand auf. Dieser Brand verursacht mit Wahrscheinlichkeit  $P_{K/Brand}(F)$  einen Brandschaden an der Komponente **K**.

Die Versagenswahrscheinlichkeit  $P_{K/Brand}(F)$  setzt sich zusammen aus der erdbebenbedingten Brandentstehung  $P_{Brand}(F)$  und einer Wahrscheinlichkeit

$\kappa = p_{Brandausbreitung}$  als Maß dafür, dass der Brand zum Ausfall von **K** führt:

$$P_F(K/Brand) = P_F(Brand) \cdot p_{Brandausbreitung}$$

Die angegebene Formel ist sehr allgemein. Es ist noch keine SPSA bekannt, in der erdbebenbedingte Brände umfassend modelliert sind, insbesondere wird die Abhängigkeit der Brandentstehung von der Erdbebenstärke nur schwer zu fassen sein. In /MAT 08/ wird das Konzept der seismischen Kapazität einer BSK erweitert, indem komponentenbezogene Brandkapazitäten abgeleitet werden (siehe Kap. 2.1).

f)  $P_{K/Flutung}(F)$

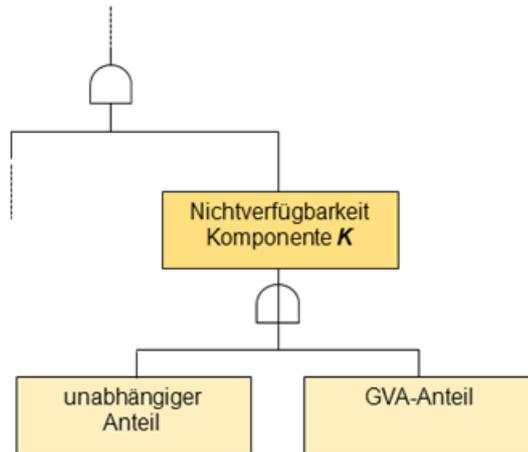
(Versagenswahrscheinlichkeit der Komponente **K** durch erdbebenbedingte Überflutung)

Eine BSK in der Nähe der Komponente **K** verursacht erdbebenbedingt in Abhängigkeit von der Intensität *I* des Erdbebens eine Überflutung. Diese Überflutung verursacht mit Wahrscheinlichkeit  $P_{K/Flutung}(F)$  einen Schaden an der

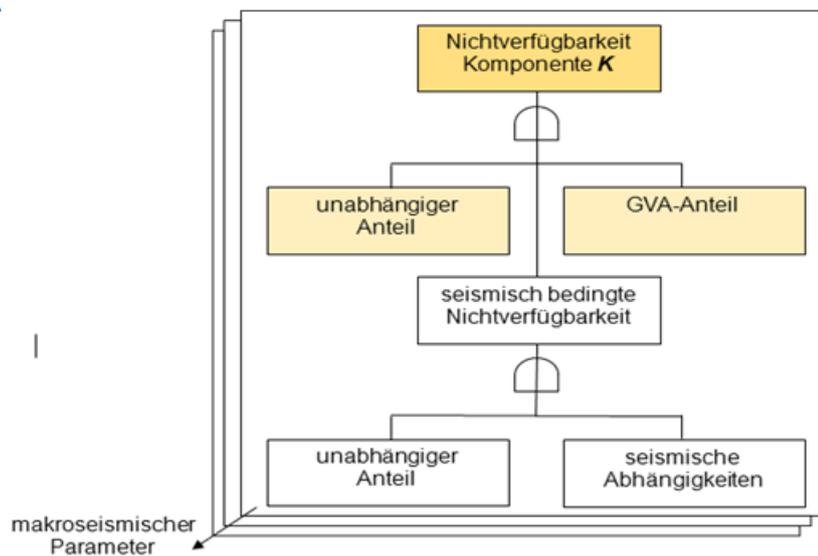
Komponente  $K$ . Die Versagenswahrscheinlichkeit  $P_{K/Flutung}(F)$  setzt sich zusammen aus der erdbebenbedingten Entstehung einer Überflutung  $P_{Flutung}(F)$  und einer Wahrscheinlichkeit  $\kappa = p_{FS}$  als Maß dafür, dass die Überflutung zum Ausfall von  $K$  führt:

$$P_{K/Flutung}(F) = P_{Flutung}(F) \cdot p_{FS}$$

Ausfallbeschreibung einer Komponente  $K$  im Anlagenmodell einer PSA der Stufe 1



Erweiterung der Ausfallbeschreibung von Komponente  $K$  in einer Seismik-PSA



**Abb. 3-2** Erweiterung des Anlagenmodells in einer Seismik-PSA für eine Komponente  $K$

Inwieweit bei der Bestimmung der Nichtverfügbarkeit einer Komponente die Anteile b) bis f) eine Rolle spielen, ist durch Auswertung der Anlagendokumentation und bei Begehungen festzustellen.

Für welche Komponenten in welchem Umfang eine erdbebenbedingte Nichtverfügbarkeit zu bestimmen ist, wird in einem Auswahlverfahren festgelegt (siehe dazu den Ergebnisbericht zum Vorhaben *Weiterentwicklung und Erprobung von Methoden und Werkzeugen für probabilistische Sicherheitsanalysen /GRS 01/*).

### 3.2.2 Modellierung von Abhängigkeiten im Ausfallverhalten von BSK

In Kap. 3.2.1 wurde ausgehend von einer Komponente im Anlagenmodell einer PSA der Stufe 1 gefragt, inwieweit das Modell zum Ausfallverhalten der Komponente bei seismischen Ereignissen erweitert werden muss.

Nachfolgend wird von Mengen  $M$  von BSK ausgegangen. Für alle BSK in einer Menge  $M$  wird angenommen, dass deren seismisches Ausfallverhalten aus verschiedenen Gründen als abhängig angesehen werden muss. Zur Beschreibung dieser Abhängigkeiten wird ein einfaches Modell abgeleitet. Das Ergebnis entspricht dem Herangehen in Kap. 3.2.1.

Es werden folgende Bezeichnungen für Mengen, Gatter und Basisereignisse eingeführt, Wahrscheinlichkeiten werden entsprechend zugeordnet:

$M$   $M$  steht für eine Menge von BSK, die sich durch eine gemeinsame Eigenschaft  $A$  auszeichnen (z.B. befinden sich alle BSK aus  $M$  in einem Gebäude oder alle BSK aus  $M$  sind starr miteinander verbunden).

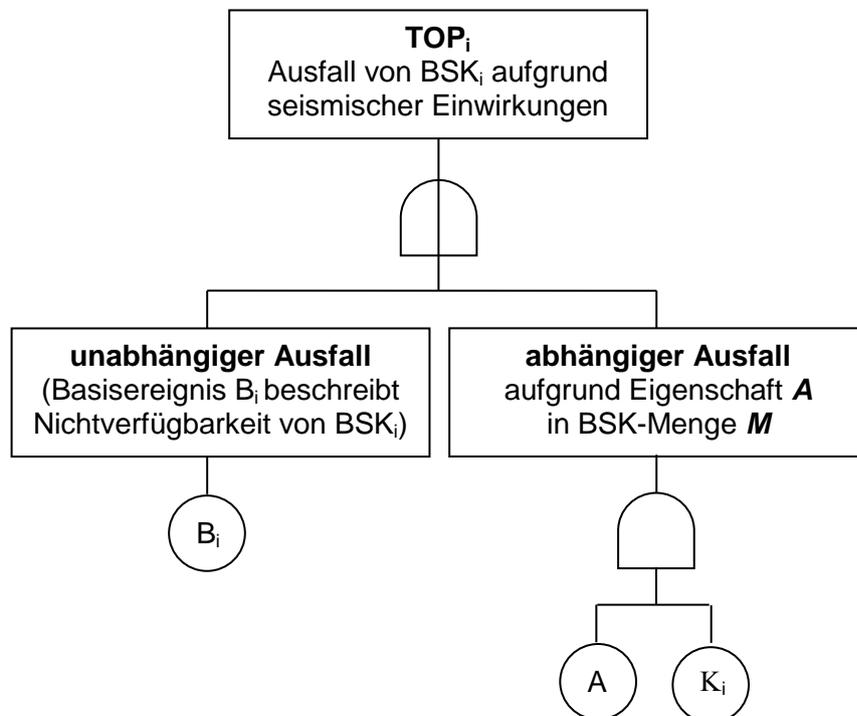
$n$  Anzahl von BSK in  $M$

$TOP_i$  TOP-Gatter des Fehlerbaums zur Berechnung der seismischen Gesamtausfallwahrscheinlichkeit  $\hat{p}_{BSK_i}(F)$  von  $BSK_i$ ,  $i = 1, \dots, n$

$B_i$  Basisereignis für den seismisch bedingten unabhängigen Ausfall von  $BSK_i$ ,  $i = 1, \dots, n$  mit Wahrscheinlichkeit  $W_{BSK_i}(F)$

- A** Basisereignis zur Beschreibung des Ausfalls der gemeinsamen Eigenschaft **A**. Die entsprechende Wahrscheinlichkeit  $W_A(F)$  ist unabhängig von der konkreten BSK in der Menge **M**.
- $K_i$  Mit diesem Basisereignis wird mit intensitätsabhängiger Wahrscheinlichkeit  $\kappa_i(F)$  beschrieben, wie oft der Ausfall der Eigenschaft **A** zum Ausfall von  $BSK_i$ ,  $i = 1, \dots, n$  führt.  
Ist  $\kappa_i(F) = \kappa(F)$  für alle  $i = 1, \dots, n$ , dann wird beschrieben, wie oft der Ausfall der Eigenschaft **A** zum gleichzeitigem Ausfall aller  $BSK_i$ ,  $i = 1, \dots, n$  führt.  
Zur Vereinfachung wird in den nachfolgenden Beispielen angenommen, dass die bedingten Wahrscheinlichkeiten  $\kappa_i(F) = \kappa_i$  unabhängig von der Erdbebenintensität (Freifeldbeschleunigung  $F$ ) sind.
- $\hat{p}_{BSK_i}(F)$  (Gesamt-)Wahrscheinlichkeit  
des seismisch bedingten Ausfalls von  $BSK_i$ ,  $i = 1, \dots, n$  bei gegebener Freifeldbeschleunigung  $F$  und Berücksichtigung der Abhängigkeiten aufgrund Eigenschaft **A** innerhalb der Menge **M**
- $p_{BSK_i}(F)$  Wahrscheinlichkeit  
des unabhängigen seismisch bedingten Ausfalls von  $BSK_i$ ,  $i = 1, \dots, n$  bei gegebener Freifeldbeschleunigung  $F$
- $W_A(F)$  Wahrscheinlichkeit der erdbebenbedingten Wirksamkeit der gemeinsamen Eigenschaft **A** bei gegebener Freifeldbeschleunigung  $F$
- $\kappa_i(F)$  bedingte Wahrscheinlichkeit des Ausfalls von  $BSK_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , wenn die Eigenschaft **A** wirksam geworden ist.  
In den nachfolgenden Beispielen wird angenommen, dass  $\kappa_i(F) = \kappa_i$  unabhängig von der Freifeldbeschleunigung  $F$  ist.  
Gilt  $\kappa_i = \kappa$  für alle  $i = 1, \dots, n$ , dann fallen nur in  $100 \cdot \kappa\%$  der Fälle bei Wirksamkeit von **A** alle BSK aus **M** mit Wahrscheinlichkeit  $W_A(F)$  aus.

Die seismische Gesamtausfallwahrscheinlichkeit bezüglich der Eigenschaft **A** für jede BSK<sub>i</sub>,  $i = 1, \dots, n$  aus **M** ergibt sich dann aus dem Fehlerbaum in Abb. 3-3. Es ist wichtig, dass im Fehlerbaummodell alle BSK der Menge **M** entsprechend ersetzt werden. Nur dann werden die Abhängigkeiten über die Eigenschaft **A** innerhalb von **M** richtig berücksichtigt.



**Abb. 3-3** Standardfehlerbaum für den seismischen Ausfall einer BSK mit abhängigen Ausfällen wegen einer Eigenschaft **A**

Das Modell kann weiter verallgemeinert werden. Eine konkrete BSK kann aufgrund verschiedener Eigenschaften **A**<sub>1</sub> bis **A**<sub>m</sub> verschiedenen BSK-Mengen **M**<sub>1</sub> bis **M**<sub>m</sub> angehören (vgl. auch in Kap. 3.2.1 die Ausfälle wegen Brandausbreitung, Überflutung oder aufgrund von Ausfällen von Klasse II – BSK und auch Abb. 3-7).

Nachfolgend einige Beispiele für Fälle, bei denen das beschriebene Modell sinnvoll eingesetzt werden kann. Wir beschränken uns dabei auf eine Eigenschaft.

– **Gebäude- oder Raumversagen**

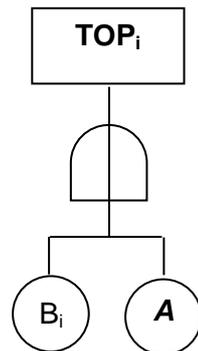
$M = \{BSK_1, BSK_2, \dots, BSK_n\}$  sei die Menge aller relevanten BSK in einem Gebäude oder in einem Raums. Die Zugehörigkeit zu einem Gebäude oder zu einem Raum ist die gemeinsame Eigenschaft **A** der Objekte der Menge **M**.

Weiter sei  $W_A(F)$  die Versagenswahrscheinlichkeit des Gebäudes (bzw. des

Raums) in Abhängigkeit von  $F$ .

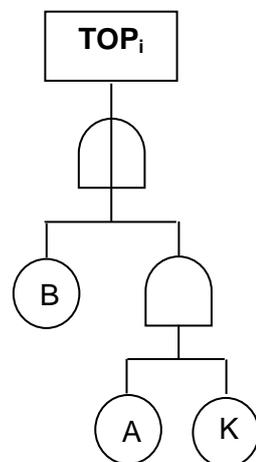
Es wird konservativ angenommen, dass immer alle BSK der Menge  $M$  ausfallen, wenn das Gebäude bzw. der Raum versagt, d. h.  $\kappa_i = \kappa = 1$ .

Somit ergibt sich für jede  $BSK_i$  aus  $M$  die Fehlerbaumdarstellung des seismischen Ausfalls in Abb. 3-4, d. h.  $BSK_i$  fällt aus, wenn die BSK an sich aus seismischen Gründen ausfällt oder wenn das Gebäude bzw. der Raum versagt.



**Abb. 3-4** BSK-Ausfall bei Gebäude- oder Raumversagen

- **Einfluss einer BSK der Klasse II** (vgl. Definition in /KTA 90/, Teil 1)  
 $M = \{BSK_1, BSK_2, \dots, BSK_n\}$  sei die Menge aller relevanten BSK, die bei Versagen einer BSK der Klasse II mit Wahrscheinlichkeit  $\kappa_i$ ,  $i = 1, \dots, n$  versagen.  
 Anmerkung: In diesem Fall wird in der Mehrzahl der Fälle  $M$  nur aus einer Komponente bestehen.  $W_A(F)$  sei die Versagenswahrscheinlichkeit der BSK der Klasse II in Abhängigkeit von  $F$ .



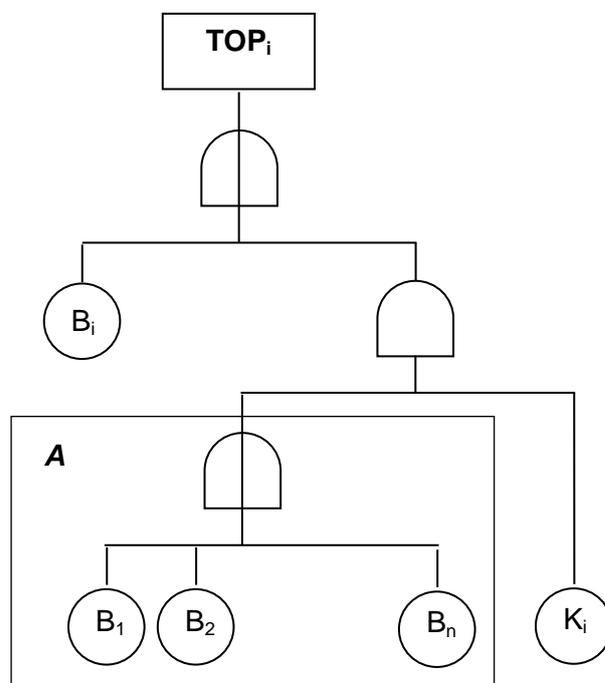
**Abb. 3-5** Einfluss von BSK der Klasse II

Unter Einbeziehung der Versagensmöglichkeiten durch die Einwirkung einer BSK der Klasse II ergibt sich für jede  $BSK_i$  aus  $M$  der Fehlerbaum in Abb. 3-5. Der Fehlerbaum ist identisch mit dem in Abb. 3-3, die Wahrscheinlichkeiten der Basisereignisse sind entsprechend zu interpretieren. Dazu folgendes Beispiel:

In einem Raum stehen drei Komponenten, zwei sind von sicherheitstechnischer Bedeutung. Die dritte ist eine Großkomponente ohne sicherheitstechnische Bedeutung, die aber bei seismischen Einwirkungen mit  $W_A(F)$  verrutschen und dabei die wichtigen Komponenten zerstören kann. Dabei wird die erste wichtige Komponente mit bedingter Wahrscheinlichkeit 0,5 und die andere mit bedingter Wahrscheinlichkeit 0,1 zerstört, d. h.  $\kappa_1 = 0,5$  und  $\kappa_2 = 0,1$ .

– **Technologische Abhängigkeiten**

$M = \{BSK_1, BSK_2, \dots, BSK_n\}$  sei die Menge aller relevanten BSK, bei denen aufgrund einer gemeinsamen Eigenschaft  $A$  davon ausgegangen werden muss, dass sie bei seismischen Einwirkungen nicht unabhängig mit Wahrscheinlichkeit  $p_{BSK_i}(F)$  ausfallen. Es wird angenommen, dass die Komponenten gemäß einem Kopplungsparameter  $\kappa$  (unabhängig von der konkreten  $BSK_i$ ) gemeinsam ausfallen. Ist  $\kappa = 0$ , liegt Unabhängigkeit der Ausfälle vor; bei  $\kappa = 1$  führt konservativ jeder Einzelausfall zum Ausfall aller BSK der Menge  $M$ .



**Abb. 3-6** Fehlerbaum bei technologischen Abhängigkeiten

### 3.2.3 Zusammenfassung

Zur Beschreibung des seismischen Ausfallverhaltens einer Komponente  $K$  im Fehlerbaummodell einer Systemfunktion wird standardmäßig von einem unabhängigen seismischen Ausfall  $K_{u,s}$  und von der Möglichkeit abhängiger Ausfälle mit seismischen Ursachen ausgegangen.

Die abhängigen Ausfälle werden charakterisiert durch Mengen  $M_i$  von BSK, von der Art der Abhängigkeit des Ausfalls von  $K$  aufgrund einer Eigenschaft  $A_i$  und einer die Stärke der Abhängigkeit beschreibenden Funktion  $\kappa_i$  (Kopplungsfunktion, abhängig von der Intensität  $F$  und Teilmengen von  $M$ ).

Abhängige Ausfälle aufgrund seismischer Einwirkungen lassen sich immer durch ein Wertetripel  $\{A, M, \kappa\}$  beschreiben. Die Kopplung  $\kappa$  ist abhängig von der Erdbebenintensität. Zur Vereinfachung wird in den Beispielen der Tab. 3-1 jedoch meist angenommen, dass die Kopplung  $\kappa$  unabhängig von der Erdbebenintensität ist.

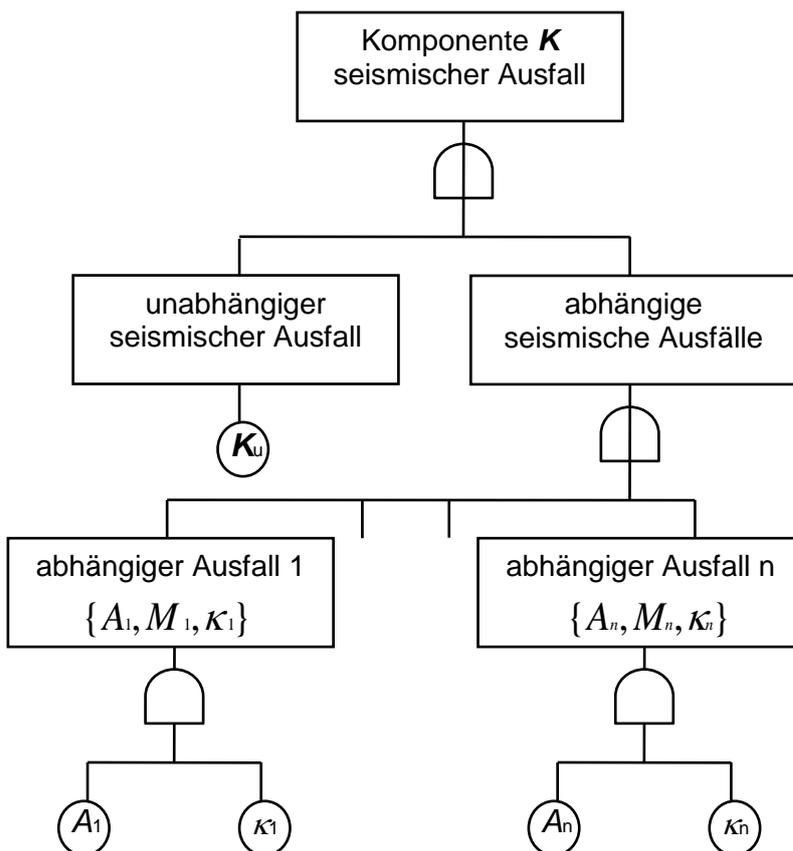
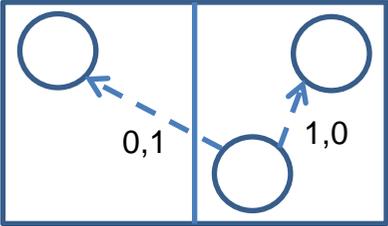
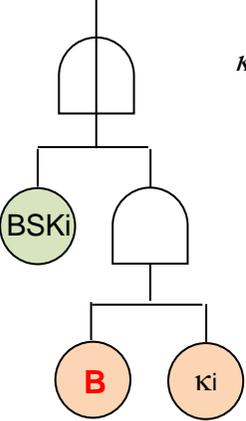


Abb. 3-7 Modellierung von seismischen Abhängigkeiten

**Tab. 3-1** Abhängige Ausfälle bei seismischen Einwirkungen

Art der Abhängigkeit (Eigenschaft <b>A</b> )	Abhängigkeit (Menge <b>M</b> )	Kopplungsfunktion $\kappa(F, M)$	Modellierungsbemerkungen
<p>Abhängigkeit von BSK in einem Raum, z.B. Eigenschaft <b>A</b> sei die <b>Erdbebenfestigkeit der Raumdecke</b> (gegeben: seismische Versagenswahrscheinlichkeit der Decke in Abhängigkeit von <b>F</b>)</p>	<p>Menge <b>M</b> umfasst die BSK des betrachteten Raumes</p> <p>Anmerkung: Es interessieren natürlich nur solche BSK, die zur SAL gehören (relevante BSK).</p>	<p><math>\kappa = 1</math>, wenn bei Versagen von <b>A</b> die BSK aus <b>M</b> mit Sicherheit ausfallen.</p> <p>Modifikationen sind raumspezifisch möglich (leichte Decke, kompakte BSK), sind aber zu begründen.</p>	<p>Die entsprechende Modellierung ist bei allen BSK aus <b>M</b>, die im Anlagenmodell der PSA Stufe 1 enthalten sind, anzuwenden. Eventuell mögliche vereinfachte Modellierungen sind zu begründen.</p>
<p><b>Brandausbreitung</b> nach seismisch induziertem Brand an einer BSK B</p>  <p>(bekannt: bedingte Brandentstehungswahrscheinlichkeit an BSK B <math>W_B(F)</math> eventuell sogar in Abhängigkeit von der Erdbebenstärke <b>F</b>)</p>	<p><math>M = \{BSK_1, BSK_2\}</math></p> <p><math>BSK_2</math> befindet sich im Raum der Brandquelle, <math>BSK_1</math> im benachbarten Raum.</p>	<p>Die Ergebnisse einer Brand-PSA seien bekannt. Die Kopplungsfunktion beschreibt die bedingte Ausbreitungswahrscheinlichkeit auf die Zielkomponenten <math>BSK_1</math> und <math>BSK_2</math>:</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin-bottom: 10px;">Ausfall BSK i</div>  $\kappa(F, M) = \begin{cases} \kappa_2 = 1,0 & \text{wenn } M = BSK_2 \\ \kappa_1 = 0,1 & \text{wenn } M = BSK_1 \end{cases}$	<p>Die Frage der seismisch bedingten Brände ist zwar international ein Thema, es ist aber keine PSA bekannt, bei der diese Abhängigkeit modelliert wurde. Bis jetzt ist nur ein Ereignis eines seismisch induzierten Brandes bekannt /KAT 08/.</p>

Art der Abhängigkeit (Eigenschaft <b>A</b> )	Abhängigkeit (Menge <b>M</b> )	Kopplungsfunktion $\kappa(F, M)$	Modellierungsbemerkungen
<p>Abhängigkeit von BSK in einem Gebäude, Eigenschaft <b>A</b> - <b>Erdbebenfestigkeit des Gebäudes</b> (gegeben: seismische Versagenswahrscheinlichkeit des Gebäudes in Abhängigkeit von <b>F</b>)</p>	<p>Menge <b>M</b> besteht aus sämtlichen BSK des betrachteten Gebäudes</p> <p>Anmerkung: Es interessieren natürlich nur solche BSK, die zur SAL gehören.</p>	<p><math>\kappa = 1</math>, wenn bei Versagen von E die entsprechende BSK mit Sicherheit ausfällt</p> <p>Modifikationen sind gebäudespezifisch möglich (z.B. könnten unterirdische Kabelräume nicht betroffen sein), sind aber zu begründen.</p>	<p>Die entsprechende Modellierung ist bei allen BSK aus M, die im Anlagenmodell der PSA Stufe 1 enthalten sind, anzuwenden. Eventuell mögliche vereinfachte Modellierungen sind zu begründen (z.B. sind oft ganze Systemfunktionen in einem Gebäude untergebracht, d. h. in einem solchen Fall wäre eine Ausfallmodellierung auf Systemfunktionsebene wesentlich einfacher).</p>
<p>Abhängigkeit von BSK in einem Gebäude, z.B. Eigenschaft <b>A</b> ist die Möglichkeit einer <b>Überflutung</b> im Gebäude wegen des Ausfalls einer BSK aufgrund seismischer Ursachen (gegeben: Wahrscheinlichkeit eines Lecks an einer BSK im Raum in Abhängigkeit von <b>F</b>)</p>	<p>Menge <b>M</b> besteht aus den SAL-BSK des betrachteten Gebäudes, die aufgrund von Überflutung ausfallen können; eine BSK ist als Ausgangspunkt der Überflutung hervorgehoben.</p> <p>Zur Bestimmung von <b>M</b> ist eine Überflutungsanalyse heranzuziehen.</p>	<p><math>\kappa = x</math>, ist die bedingte Wahrscheinlichkeit dafür, dass Komponente <b>K</b> durch seismisch verursachte Überflutung ausfällt.</p> <p>Beispiele:  <math>x = 1 \dots</math>  wenn mit Sicherheit angenommen wird, dass K bei einer Überflutung im Gebäude ausfällt  <math>x = w \dots</math>  wenn aus einer vorhandenen Überflutungs-PSA die bedingte Ausfallwahrscheinlichkeit w von <b>K</b> aufgrund von Überflutung begründet genutzt werden kann.</p>	

Art der Abhängigkeit (Eigenschaft <b>A</b> )	Abhängigkeit (Menge <b>M</b> )	Kopplungsfunktion $\kappa(F, M)$	Modellierungsbemerkungen
<p><b>Abhängigkeit von einer BSK der Klasse II</b> Eigenschaft <b>A</b> - Erdbebenfestigkeit der Klasse-II-BSK und Versagensmechanismus der BSK (gegeben: seismische Versagenswahrscheinlichkeit der Klasse-II-BSK in Abhängigkeit von <b>F</b>)</p>	<p>Menge <b>M</b> besteht aus den SAL-BSK, die durch den Ausfall der Klasse-II-BSK geschädigt werden können.</p>	<p><math>\kappa = x</math>, ist die bedingte Wahrscheinlichkeit dafür, dass Komponente <b>K</b> bei Versagen der Klasse-II-BSK aus <b>M</b> ausfällt. Beispiele: <math>x = 0,5 \dots</math> wenn die Komponente K auf einer Seite einer Mauer (Klasse-II-BSK !) steht; <math>x = 0,25 \dots</math> wenn der Ausfall der Komponente K von der Fallrichtung eines Schornsteins abhängt.</p>	
<p><b>technologische Abhängigkeit</b> Eigenschaft <b>A</b> – Wirkung der technologischen Abhängigkeit auf das Ausfallverhalten der BSK von <b>M</b> (gegeben: seismische Versagenswahrscheinlichkeit aller Komponenten von <b>M</b> in Abhängigkeit von <b>F</b>)</p>	<p>Menge <b>M</b> besteht aus der Komponente <b>K</b> und weiteren sicherheitstechnisch wichtigen Komponenten, die durch eine technologische Abhängigkeit oder durch andere gemeinsame Eigenschaften verbunden sind. Technologische Abhängigkeiten können z.B. durch starre Verbindungen oder durch Verankerung auf einer gemeinsamen Bodenplatte gegeben sein.</p>	<p><math>\kappa = x</math>, ist ein Maß für die Stärke der Kopplung der Komponenten aufgrund der technologischen Abhängigkeit. Ist <math>x = 1</math>, wird angenommen, dass ein Ausfall einer Komponente aus M zum Ausfall aller Komponenten führt (starke Kopplung).</p>	<p>Im Anlagenmodell muss für jede Komponente <b>K</b> aus <b>M</b> eine Modellierung entsprechend Abb. 3-6 vorgenommen werden.</p>

Zusammengefasst ergeben sich folgende Arbeitsschritte bei der Modellierung von Abhängigkeiten im seismischen Ausfallverhalten von BSK:

- Zusammenstellung aller Abhängigkeitsmengen ***M*** aufgrund der systemanalytischen Untersuchungen und der Erkenntnisse aus den Begehungen (Auswahlstufe 1),
- Beschreibung der Abhängigkeiten (Festlegung der Abhängigkeitsart ***A***) und Quantifizierung des Kopplungsverhaltens (Festlegung von  $\kappa$ ) für jede Menge ***M*** aufgrund der systemanalytischen Untersuchungen und der Erkenntnisse aus den Begehungen (Auswahlstufe 2),
- Modellierung der beschriebenen Abhängigkeiten ***{A, M,  $\kappa$ }*** (Einbeziehung in Ereignis- und Fehlerbäume),
- Quantifizierung des Anlagenmodells, Durchführung von Sensitivitätsanalysen bezüglich der Kopplungsfunktion  $\kappa$ .

### 3.3 Quantifizierung

#### 3.3.1 Die seismische Widerstandsfähigkeit technischer Einrichtungen

##### 3.3.1.1 Seismische Versagenswahrscheinlichkeiten

Eine BSK versagt in Abhängigkeit von der Stärke eines Erdbebens. Zur Quantifizierung des Ausfallversagens werden seismische Versagenswahrscheinlichkeiten genutzt. Unter einer seismischen Versagenswahrscheinlichkeit einer BSK wird die Wahrscheinlichkeit  $W_{BSK}(F)$  des Ausfalls bzw. Funktionsverlustes einer BSK als Funktion der Stärke des Erdbebens (hier: Freifeldbeschleunigung  $F$ ) verstanden. Die entsprechende Funktion wird seismische Versagenskurve der BSK genannt (vgl. W0.50 in Abb. 3-8).

Die seismische Versagenskurve einer BSK ist mit großen Unsicherheiten behaftet. Diese Unsicherheiten können mit Hilfe subjektiver Wahrscheinlichkeitsverteilungen, die das Wissen des Experten widerspiegeln, beschrieben werden. Zu einer gegebenen Freifeldbeschleunigung kann dann entsprechend dieser subjektiven Wahrscheinlichkeitsverteilung gesagt werden mit welchem Vertrauensgrad die Versagenswahrscheinlichkeit kleiner als ein bestimmter Wert ist. In Abb. 3-8 sind die Unsicherheiten durch zwei Versagenskurven W0.05 und W0.95 mit 5 % und 95 % Vertrauensgrad beschrieben.

Die Form der Versagenskurve lässt sich als statistische Verteilung beschreiben. Vereinfachend wird oft angenommen, dass die maximale Freifeldbeschleunigung lognormal verteilt ist ( $F \sim LNV(m,s)$ ). Weitere Vereinfachungen ermöglichen, dass die Versagenskurve einer BSK einschließlich des Unsicherheitsbandes durch nur drei Parameter beschrieben werden kann:

$$F = F_{0,50} \cdot \varepsilon_R \cdot \varepsilon_U \quad (\text{Formel 3-1})$$

- $F_{0,50}$  Median der lognormal verteilten maximalen Freifeldbeschleunigung  
(Das ist die Freifeldbeschleunigung, bei der die entsprechende BSK mit Wahrscheinlichkeit 0,50 ausfällt.)
- $\varepsilon_R \sim LNV(0, \beta_R)$   
 $\varepsilon_R$  beschreibt die Streuung von  $F$  um den Median  $F_{0,50}$ .

Der Median von  $\varepsilon_R$  ist 1.

$\beta_R$  ist ein Maß für die Steigung der Kurven in Abb. 3-8.

–  $\varepsilon_U \sim LNV(0, \beta_U)$

$\varepsilon_U$  beschreibt die aleatorische Unsicherheit bezüglich Median  $F_{0,50}$ .

Der Median von  $\varepsilon_U$  ist 1.

$\beta_U$  ist ein Maß für den Abstand der Kurven in Abb. 3-8.

Zum Verständnis der Unsicherheitsangaben sei noch angemerkt, dass im Fall eines sehr kleinen  $\beta_R$ -Wertes von einer Grenzbeschleunigung  $F_G$  gesprochen werden kann. Treten Freifeldbeschleunigungen kleiner  $F_G$  auf, bleibt die entsprechende BSK intakt; ist die Freifeldbeschleunigung hingegen größer als  $F_G$  ist die BSK in Folge des Erdbebens mit Wahrscheinlichkeit 1 ausgefallen. In einem solchen Fall wird mit  $\beta_U$  die aleatorische Unsicherheit bezüglich  $F_G = F_{0,50}$  beschrieben.

Das Produkt von lognormal verteilten Größen ist wieder lognormal, somit gilt

$$F = F_{0,50} \cdot \varepsilon_C \text{ mit } \varepsilon_C \sim LNV(0, \beta_c) \text{ und } \beta_c = \sqrt{\beta_R^2 + \beta_U^2} \quad (\text{Formel 3-2})$$

Die Versagenskurven  $W(F, Q)$  lassen sich mit Formel 3-3 berechnen.

$$W(F, Q) = NV\left(\frac{\ln(F / F_{0,5}) + \beta_U \cdot NV^{-1}(Q)}{\beta_R}\right) \quad (\text{Formel 3-3})$$

Dabei steht  $NV(x)$  für die standardisierte Normalverteilung und  $NV^{-1}(x)$  für die inverse Verteilungsfunktion. In Abb. 3-8 ist neben der lognormalen Versagenskurve  $W(F, 0,50) = W_{0.50}$  auch die Form der entsprechenden Dichte  $W_{0.50} \text{ Dichte}$  eingezeichnet.

$F_{HCLPF}$  ist die Freifeldbeschleunigung, bei der es mit hohem Vertrauensgrad (95 %) sehr unwahrscheinlich ist (0,05), dass die entsprechende BSK versagt. HCLPF steht für einen Vertrauensgrad von 0,95 für eine geringe Versagenswahrscheinlichkeit von 0,05 (high confidence low probability of failure, vgl. auch den Wert HCLPF in Abb. 3-8).

Aus (Formel 3-33) ergibt sich für  $F = F_{HCLPF}$

$$NV\left(\frac{\ln(F_{HCLPF} / F_{0,5}) + \beta_U \cdot NV^{-1}(0,95)}{\beta_R}\right) = 0,05$$

aus

$$\frac{\ln(F_{HCLPF} / F_{0,5}) + 1,6449 \cdot \beta_U}{\beta_R} = -1,6449$$

folgender Ausdruck für  $F_{HCLPF}$

$$F_{HCLPF} = F_{0,5} \cdot \exp(-1,6449 \cdot (\beta_R + \beta_U)) \quad (\text{Formel 3-4})$$

Sind  $F_{HCLPF}$  und  $F_{0,5}$  gegeben, gilt für die Summe der Parameter zur Beschreibung der Unsicherheitsbänder entsprechend (Formel 3-4)

$$\beta_R + \beta_U = \ln(F_{HCLPF} / F_{0,5}) / NV(0,05) \quad (\text{Formel 3-5})$$

Folgende vereinfachte Versagenskurve  $W_{best}(F)$  kann für die Ermittlung von Punktwerten Verwendung finden:

$$W_{best}(F) = NV\left(\frac{\ln(F / F_{0,5})}{\sqrt{\beta_R^2 + \beta_U^2}}\right) = NV\left(\frac{\ln(F / F_{0,5})}{\beta_c}\right) \quad (\text{Formel 3-6})$$

In den meisten Veröffentlichungen zu SPSA sind, wenn überhaupt, zu den seismischen Widerstandsfähigkeiten der BSK  $F_{HCLPF}$  und  $F_{0,5}$  gegeben (siehe z.B. /KLA 08/ und Tab. 3-2). Man kennt dann zusätzlich die Summe der Parameter zur Beschreibung der Unsicherheitsbänder (vgl. Formel 3-5), aber der tatsächliche Verlauf der Versagenskurve  $W_{best}(F)$ , vgl. (Formel 3-6), zwischen den Fixpunkten hängt wesentlich von  $\beta_U$  und  $\beta_R$  ab.

Der Sicherheitsreservefaktor  $SR$  für eine BSK ist definiert als das Verhältnis des Medians der Freifeldbeschleunigung  $F_{0,50}$  zum Wert des Bemessungserdbebens  $F_{BEB}$ :

$$SR = \frac{F_{0,50}}{F_{BEB}} \quad (\text{Formel 3-7})$$

Die Sicherheitsreserve einer BSK bezüglich ihres Versagens bei Erdbebeneinwirkung ist bei gegebenen Bemessungserdbeben um so größer je größer  $SR$  ist. Anders formuliert, soll eine BSK in einer Region mit größerem Bemessungserdbeben eingesetzt werden, sind entsprechende Maßnahmen zu ergreifen, wenn die Sicherheitsreserve erhalten werden soll.

In Tab. 3-2 sind für ausgewählte BSK aus der PSA GKN-1 die seismischen Parameter  $F_{HCLPF}$  und  $F_{0,5}$  angegeben /KLA 08/. Die Summe der Unsicherheiten  $\beta_U + \beta_R$  wurde

mit Formel (5) ermittelt. Für die Ermittlung von  $\beta_C$  wurde angenommen, dass  $\beta_U = \beta_R$  gilt. Weiterhin wurden die Sicherheitsreservefaktoren und die Punktwerte der Versagenswahrscheinlichkeiten der BSK bei einem Bemessungserdbeben (Standort GKN: 0,17g) ermittelt.

**Tab. 3-2** Ausgewählte seismische Widerstandfähigkeiten SPSA GKN-1 (aus /KLA 08/)

BSK	$F_{0,50}$ [g]	$F_{HCLPF}$ [g]	$\beta_U + \beta_R$	$\beta_C$	$W_{best}$ (0,17g)	SR
Hilfsanlagengebäude	2,97	0,96	0,69	0,49	2,3 E-09	17,47
Schaltanlagengebäude	1,59	0,51	0,69	0,49	2,3 E-06	9,35
Maschinenhaus	1,02	0,33	0,69	0,49	1,2 E-04	6,00
Mauerwerkswände (Notstromdieselgeb.)	1,30	0,34	0,82	0,58	2,3 E-04	7,65
NS-Schaltanlagen	1,58	0,42	0,81	0,57	5,0 E-05	9,29
Batterien (Notstromdieselgeb., nicht verankert)	0,61	0,2	0,68	0,48	3,9 E-03	3,59
Reaktorschutzschränke	3,15	0,81	0,83	0,59	3,3 E-07	18,53
FD-Armaturen	0,73	0,29	0,56	0,40	1,2 E-04	4,29
Notspeisepumpen	0,73	0,29	0,29	0,21	1,2 E-04	4,29
Flutbehälter	0,83	0,34	0,54	0,38	1,6 E-05	4,88
Rangierverteiler (Notstromdieselgeb.)	1,90	0,75	0,57	0,40	1,1 E-09	11,18

In Abb. 3-8 sind die Zusammenhänge zu den Versagenswahrscheinlichkeiten von BSK am Beispiel eines Flutbehälters (siehe Tab. 3-2) grafisch zusammengefasst dargestellt. Auf der Abszisse ist die maximale Freifeldbeschleunigung aufgetragen, auf der Ordinate die Versagenswahrscheinlichkeit der BSK. Der HCLPF-Wert  $F_{HCLPF}$  und der Median  $F_{0,50}$  der maximalen Freifeldbeschleunigung sind angegeben. Zum Vergleich ist der entsprechende Kennwert  $F = 0,17g$  des Bemessungserdbebens am Standort von GKN markiert. Weiterhin sind die den Freifeldbeschleunigungen zugeordneten Intensitäten (nach Trifunac & Brady, siehe Kap. 3.3.2) eingetragen.

Das stärkste historisch registrierte Beben in Mitteleuropa fand 1356 in Basel statt. Diesem Beben wird heute eine Intensität von 10 zugeordnet. Auf dem Gebiet der alten Bundesrepublik wurden seit 1800 ca. 35 Beben der Stärke 7 bis 8 registriert, d. h. das eigentlich interessierende Intervall umfasst Freifeldbeschleunigungen bis 1,05g (vgl. Tab. 3-4).

Die Kurven  $W(F,Q)$  der seismisch bedingten Versagenswahrscheinlichkeiten werden neben den Unsicherheiten  $\beta_R, \beta_U$  durch die Beschleunigungswerte  $F_{HCLPF}$  (bzw.  $F_{0.50}$ ) bestimmt. Für gegen seismische Einwirkungen ausgelegte Komponenten ist anzunehmen, dass  $F_{HCLPF}$  größer als  $F_{BEB}$  ist ( $F_{BEB}$  ist die maximale Freifeldbeschleunigung des Bemessungserdbebens). Nach Vorgaben des PSA-Leitfadens sind SPSA nur durchzuführen, wenn die Intensität des Bemessungserdbebens am Standort des KKW größer als 7 ist, d. h. wenn die maximale Freifeldbeschleunigung größer 0,13g (nach /TRI 75/, vgl. Tab. 3-4) oder größer als 0,10 g (nach /MUR 77/, vgl. Tab. 3-4)

Für den Standort des Referenzkraftwerks wurde ein Bemessungserdbeben mit  $F = 0,17g$  ermittelt. Die eigentlich interessierenden Versagenswahrscheinlichkeiten der BSK der SAL beziehen sich auf Freifeldbeschleunigungen kleiner oder nur geringfügig größer als  $F_{HCLPF}$ . Die Eintrittshäufigkeiten von Erdbeben mit Intensitäten größer 10 (das entspricht einer maximalen Freifeldbeschleunigung von 1,05g nach /TRIF 05/ oder 0,57g nach /MUR 77/) gehen gegen Null, insofern ist der Verlauf der Kurven bei Abszissenwerten größer Intensität 10 nicht relevant.

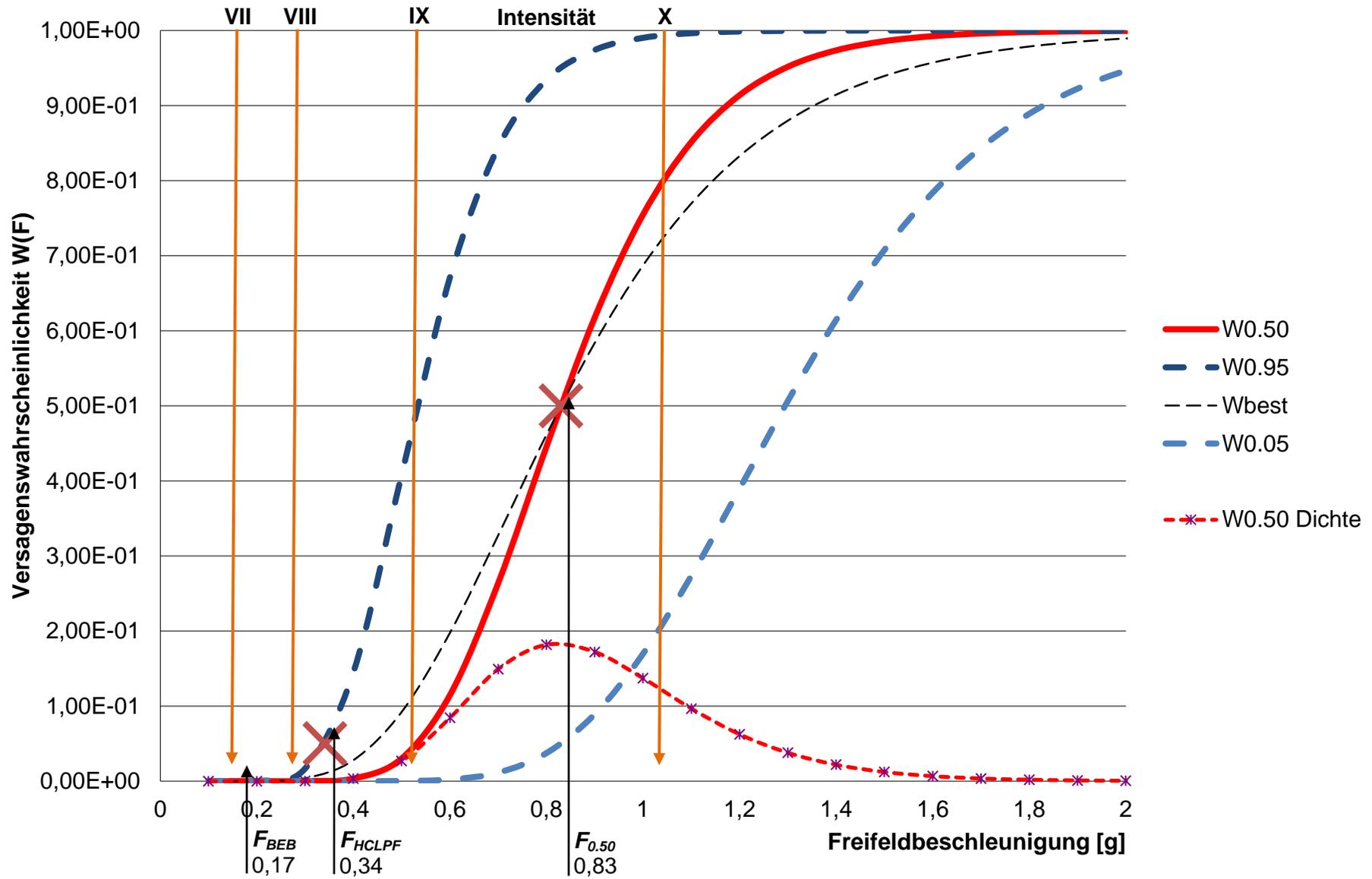


Abb. 3-8 Diagramm der Versagenswahrscheinlichkeiten (Daten: Flutbehälter aus Tab. 3-2)

### 3.3.2 Korrelation zwischen Freifeldbeschleunigung und Intensität

Seit den ersten Versuchen die Stärke von Erdbeben zu klassifizieren - das begann Mitte des 17. Jahrhunderts - wurden mehr als 50 Erdbeben-Intensitätsskalen entwickelt. Diese Skalen entstanden, um die seismischen Auswirkungen auf Menschen, Strukturen und deren Umgebung zu beschreiben. Dabei beeinflussen die Populationsdichte, die Konstruktionstypen der Gebäude und die allgemeine soziale, ökonomische und kulturelle Umgebung des Standorts die abschließende Beschreibung und Quantifizierung der Bebenstärke.

Die Schwierigkeit der Charakterisierung von historischen Erdbeben auf der Grundlage einer Erdbebenintensitätsskala besteht heute darin, dass deren subjektive und qualitative Natur auf den ersten Blick nur einen groben funktionalen Zusammenhang mit tatsächlich gemessenen Parametern der seismisch induzierten Bodenbewegung (z.B. maximale Freifeldbeschleunigung) zulässt.

In Deutschland wird die Erdbebenintensität (im Zusammenhang mit der Auslegung von Kernkraftwerken) mit der zwölfstufigen MSK-Skala (nach Medvedev, Sponheuer, Karnik) bzw. der moderneren EMS-Skala /FAK 05/, /KTA 90/, Teil 1, /GRU 98/ beschrieben. Ergänzend wird in Tab. 3-3 auch die Erdbebenstärke (Magnitude) nach der Richterskala aufgeführt. Die Magnitude ist ein Maß für die Energiefreisetzung im Erdbebenherd, d.h. weit unterhalb der Bodenoberfläche und ggf. räumlich versetzt zum Standort eines Kernkraftwerks. Je nach Entfernung zwischen Erdbebenherd und Kernkraftwerksstandort sowie den dazwischen gegebenen Bodeneigenschaften können sich für die gleiche Energiefreisetzung eines Erdbebens große Unterschiede in den beobachteten Wirkungen (Intensitäten) an der Erdoberfläche ergeben. Insofern stellt der in Tab. 3-3 vorgenommene Vergleich nur eine sehr grobe Zuordnung von Größenverhältnissen dar.

Mit den heute vorhandenen Erbebeninstrumentierungen ist man grundsätzlich in der Lage, die Magnitude und geographischen Parameter eines stattgefundenen Erdbebens gut zu bestimmen. Für Gebiete mit geringer Erdbebentätigkeit ergibt sich jedoch das Problem, aus historischen Beschreibungen der Wirkungen eine belastbare Intensitätszuordnung vorzunehmen und für diese wiederum eine Korrelation zu ingenieurseismischen Kenngrößen zu finden.

**Tab. 3-3:** Erdbebenskalen

<b>Wirkungen</b>	<b>MSK- (bzw. EMS-) Skala</b>	<b>Magnitude (Richter)</b>
nur mit Instrumenten nachweisbar	I	~ 2,0
vereinzelt spürbar (obere Geschosse von Hochhäusern)	II	~ 2,5
vor allem von ruhenden Personen deutlich gespürt, Vibrationen ähnlich den Erschütterungen durch Fahrzeuge	III	~ 3,0
in Häusern allgemein spürbar, Gegenstände schwanken, Fenster klirren	IV	3,5 - 4,0
Schlafende erwachen, Türen schlagen, Fenster zerspringen	V	4,0 - 4,5
starkes Beben, leichte Gebäudeschäden, Putzrisse, schwere Möbelstücke bewegen sich	VI	4,5 - 5,0
Menschen flüchten ins Freie, mäßige Gebäudeschäden, Kamine stürzen ein	VII	~ 5,5
zerstörend, große Spalten im Mauerwerk, Giebelteile stürzen ein, Bäume schwanken	VIII	6,0 - 6,5
verwüstend, Panik, Wand- und Dacheinstürze, Erdbeben, Bodenrisse	IX	6,5 - 7,0
Backsteinbauten werden zerstört, Bodenspalten bis zu einem Meter, Dämme und Deiche werden beschädigt, Schienen verbogen	X	~ 7,5
nur wenige Gebäude stehen noch, umfangreiche Veränderungen des Erdbodens mit Rutschungen und breiten Bodenspalten	XI	7,5 - 8,0
völlige Zerstörung von Gebäuden, Veränderung der Bodentopographie, Bebenwellen sind auf der Bodenoberfläche sichtbar	XII	~ 8,5

Zur Bestimmung des Bemessungserdbebens sind die historischen Beben in Standortnähe auszuwerten. Als Bemessungserdbeben ist das Erdbeben mit der für den Standort größten Intensität anzunehmen, das unter Berücksichtigung einer größeren Umgebung des Standortes nach wissenschaftlichen Erkenntnissen auftreten kann. Intensitätsangaben nach der EMS-Skala eignen sich nicht als Eingabedaten für Auslegungsrechnungen, deshalb sind diese Parameter durch ingenieurseismische Kenndaten zu ersetzen, die durch Verwendung angemessener, dem Stand der Wissenschaft entsprechender Beziehungen gewonnen werden /KTA 90/, Teil 1.

Im Wesentlichen werden die Umrechnungen nach Cancani /FAK 05/, nach Trifunac & Brady /TRI 75/ und Murphy & O'Brien /MUR 77/ angewendet.

Im Leitfaden /FAK 05/ wird zwischen der maximalen Freifeldbeschleunigung  $F$  und der Erdbebenintensität  $I$  folgender Zusammenhang (nach Cancani, ohne Angabe einer Literaturstelle) angenommen:

- Die zu den Standort-Intensitäten gehörenden Freifeldbeschleunigungen verdoppeln sich von Intensitätsstufe zu Intensitätsstufe.
- Die Bezugsgröße ist das Bemessungserdbeben, dem eine maximale horizontale Bodenbeschleunigung zugeordnet ist.

Nach Trifunac & Brady /TRI 75/ gilt  $\log F = 0,014 + 0,3 I$ ,  
 nach Murphy & O'Brien /MUR 77/ gilt  $\log F = 0,25 + 0,25 I$ , mit  $F$  in  $\text{cm/s}^2$ .

Aus Tab. 3-4 sieht man, dass mit der Umrechnung nach /TRI 75/ im höheren Intensitätsbereich weitaus größere maximale Freifeldbeschleunigungen als nach /MUR 77/ erhält.

**Tab. 3-4** Zusammenhang zwischen Intensität und maximaler Freifeldbeschleunigung bei einem Erdbeben

Intensität	F [g] nach /TRI 75/	F [g] nach /MUR 77/
IV	0,02	0,02
V	0,03	0,03
VI	0,07	0,06
VII	0,13	0,10
VIII	0,26	0,18
IX	0,53	0,32
X	1,05	0,57

Bei diesen Korrelationen ist aber zu berücksichtigen, dass vielfältige Einflussfaktoren vorliegen, die zu unterschiedlichen Ergebnissen führen können. Dazu gehören die Entstehungscharakteristik des Erdbebens, welche zu unterschiedlichen Formen der Energieausbreitung führt, und die jeweiligen Bodeneigenschaften mit unterschiedlichem Dämpfungs- oder Verstärkungsverhalten.

Da die Wirkungen auf Bauwerke und technische Einrichtungen dynamischer Art sind, sind für die tatsächlichen Wechselwirkungen auch der Zeitverlauf der Erdbebenanregung bzw. dessen Frequenzspektrum von entscheidender Bedeutung.

### 3.3.3 Eintrittshäufigkeiten von Erdbeben

Für die Durchführung einer SPSA werden die Ergebnisse der seismischen Gefährdungsanalyse des Anlagenstandortes, die jährlichen Überschreitenshäufigkeiten des Auftretens von seismischen Ereignissen vorgegebener Intensität, benötigt.  $H(I)$  sei die Funktion der standortspezifischen jährlichen Überschreitenshäufigkeiten in Abhängigkeit von einem makroseismischen Parameter, hier der Intensität nach der MSK-Skala,  $H(I)$  ist die Anzahl von Erdbeben in einem Jahr mit einer Intensität größer  $I$ .

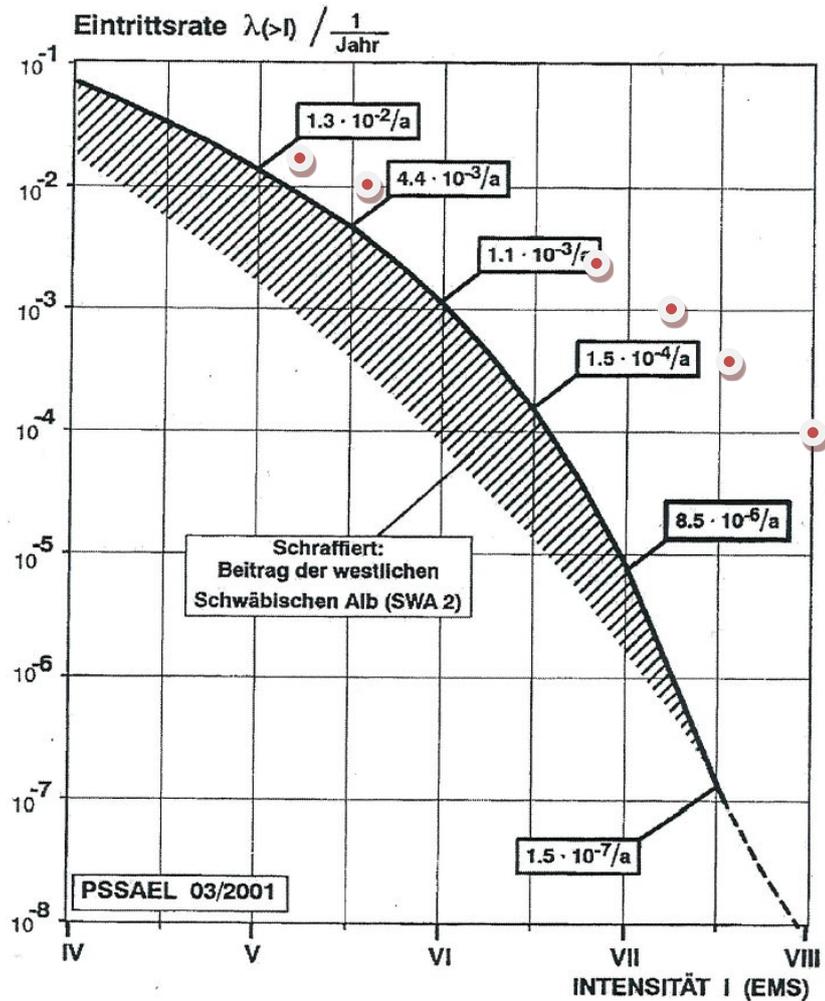
In diesem Vorhaben ist es nicht die Aufgabe, die Möglichkeiten zur Bestimmung standortspezifischer Überschreitenshäufigkeiten zu diskutieren. Es soll hier lediglich eine geeignete Funktion  $H(I)$  zur Nutzung bei der Erprobung der abgeleiteten Methodik anhand einiger öffentlich zugänglicher Beispiele bereitgestellt werden. Die aus der Literatur bekannten  $H(I)$ -Kurven sind zum einen durch große Unsicherheiten an den Standorten selbst gekennzeichnet und zum anderen auch durch große Abweichungen bei verschiedenen, auch nahe beieinanderliegenden Standorten. Nachfolgend sind einige Beispiele aufgeführt.

In Abb. 2-6 sind die seismischen Gefährdungskurven für den Standort Beznau aufgezeichnet. Der Unterschied zwischen dem Verlauf der Kurve entsprechend der alten Studie und der Kurve entsprechend der PEGASOS-Studie ist gewaltig.

**Tab. 3-5** Seismische Gefährungsdaten für die Region Aachen /SPE 09/

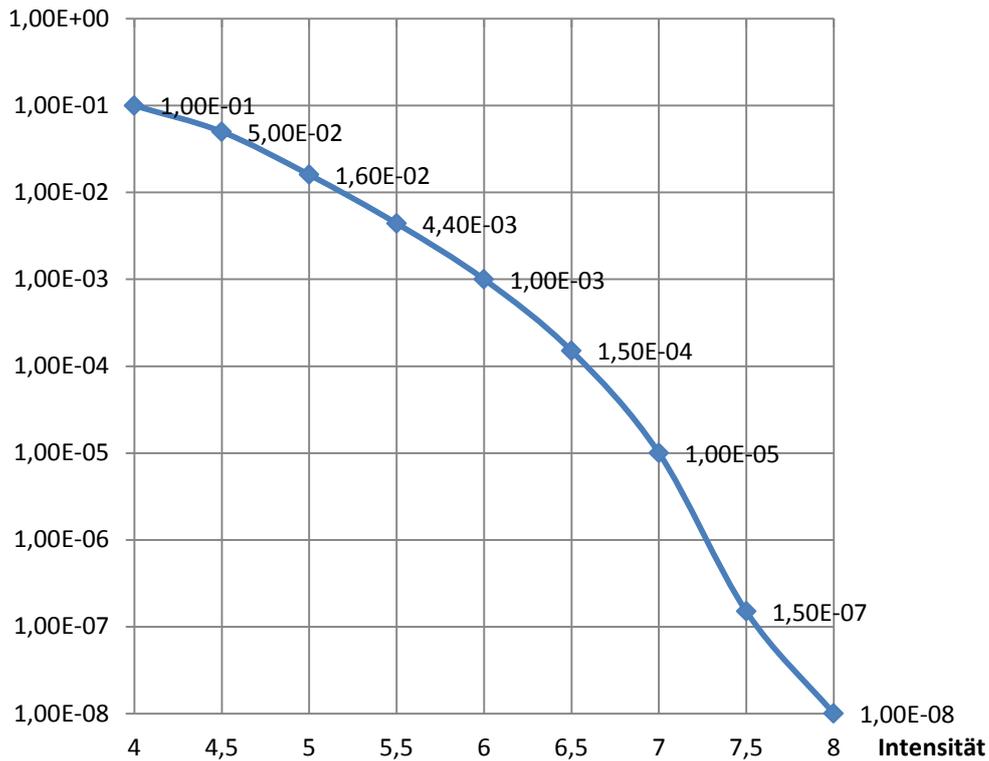
Intensität (MSK)	F [g]	H(I) [1/a]	Wiederkehrperiode [a]
5,30	0,04	2,0 E-02	50
5,58	0,05	1,0 E-02	100
6,85	0,09	2,1 E-03	475
7,25	0,12	1,0 E-03	1000
7,55	0,14	5,0 E-04	2000
8,15	0,20	1,0 E-04	10000

In /SPE 09/ sind die jährlichen Überschreitenshäufigkeiten für die Region von Aachen gegeben, siehe Tab. 3-5. Zur Umrechnung der Intensität in F wurde die Beziehung nach Murphy und O'Brien genutzt (siehe Kap. 3.3.2).



**Abb. 3-9** Seismische Gefährungsdaten Standort GKN (aus /WBI 06/) (rot – Werte aus Tab. 3-5, Gefährungsdaten für Aachen)

Abgeleitet aus den Daten zur seismischen Gefährdung am Standort des Referenzkraftwerks wird zur beispielhaften Nutzung die Kurve in Abb. 3-10 genutzt.



**Abb. 3-10** Annahmen zu den seismischen Gefährungsdaten für die Beispiele in Kap. 4

Die Eintrittshäufigkeiten von Erdbeben mit einer Intensität größer  $I$  können mit einer Poissonverteilung beschrieben werden, die entsprechende Zufallsgröße (Anzahl von Erdbeben in einem Jahr mit einer Intensität größer  $I$ ) sei  $H(I)$ .

Dann ergibt sich die Wahrscheinlichkeit, dass genau  $m$  Erdbeben mit einer Intensität größer  $I$  innerhalb eines Jahres  $a$  auftreten, aus:

$$P(H(I) = m) = \frac{(\lambda \cdot a)^m}{m!} \cdot e^{-\lambda \cdot a}, \quad (\text{Formel 3-8})$$

dabei bezeichnet  $\lambda$  die jährliche Eintrittsrate mit Dimension  $[1/a]$ .

Der Erwartungswert der Poissonverteilung ist gleich  $\lambda a$ . Das ist die mittlere Eintrittshäufigkeit eines Erdbebens mit einer Intensität größer  $I$  pro Jahr (Überschreitenshäufigkeit).

Die angegebene Formel der Poissonverteilung (Formel 3-8) und die eindeutige Festlegung von  $\lambda$  kann genutzt werden, um die Begriffsverwirrung in den Diagrammen zu standortbezogenen Erdbebengefährungsdaten aufzuklären:

- Eintrittsrate für ein Erdbeben mit einer Intensität größer  $I$  pro Jahr  
(wie in Abb. 3-9)  
 $\lambda$  [1/a]
- Überschreitenshäufigkeit, mittlere Anzahl von Erdbeben pro Jahr mit einer Intensität größer  $I$  (wie z.B. in Abb. 2-6):  
 $\lambda a$  [dimensionslos]
- Eintrittswahrscheinlichkeit eines Erdbebens mit einer Intensität größer  $I$  in einem Jahr  
 $1 - e^{-\lambda \cdot a}$  [dimensionslos]  
(Für  $\lambda \ll 1$  und das ist bei Erdbeben größer dem Bemessungserdbeben der Fall, gilt näherungsweise  $1 - e^{-\lambda \cdot a} = \lambda \cdot a$ )

### 3.3.4 Häufigkeit eines erdbebenbedingten Kernschadens

Es wird nachfolgend angenommen, dass das *Anlagenmodell Erdbeben* quantifizierbar aufgestellt ist, d. h. für jede Freifeldbeschleunigung  $F$  kann die Wahrscheinlichkeit eines Kernschadenszustandes  $W(F)$  berechnet werden. In  $W(F)$  gehen sowohl die Nichtverfügbarkeiten der Systemfunktionen als auch die bedingten Wahrscheinlichkeiten der seismisch induzierten störfallauslösenden Ereignisse ein. Weiterhin sei die Funktion der standortspezifischen Überschreitenshäufigkeiten bekannt, d. h. zu jeder Freifeldbeschleunigung  $F$  kann die Häufigkeit angegeben werden, dass bei einem Erdbeben am Standort diese Freifeldbeschleunigung überschritten wird; zur Illustration siehe die Abb. 4-5 für ein kleineres Beispiel.

Die summarische Häufigkeit eines erdbebenbedingten Kernschadens  $KSH_{seismisch}$  ergibt sich entsprechend Formel 3-8, siehe z.B. auch /CHO 09/.

$$KSH_{seismisch} = \int_0^{\infty} H(F) \left( \frac{\Delta W(F)}{\Delta F} \right) \Delta F = \int_0^{\infty} W(F) \left( \frac{\Delta H(F)}{\Delta F} \right) \Delta F \quad (\text{Formel 3-9})$$

Folgende Abschätzungen liefern eine Näherung für  $KSH_{seismisch}$ . Dazu wird die Intensitätsachse (hier: Achse der maximalen Freifeldbeschleunigungen) diskret unterteilt (n Stützstellen):

$$\{F_0, F_1, \dots, F_n\}$$

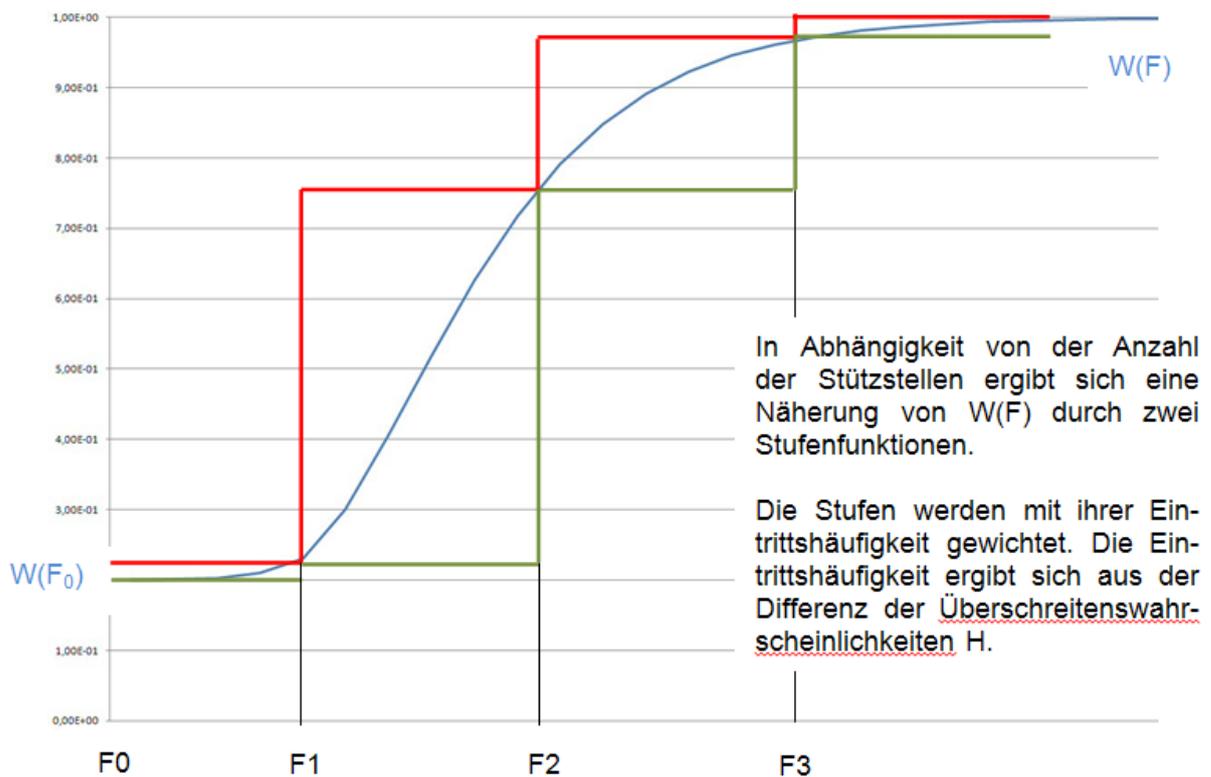
mit  $F_0 = 0$ ,

$$H(F_0) = 1 \text{ und}$$

$W(F_0)$  gleich der Wahrscheinlichkeit eines Kernschadens, wenn kein Erdbeben vorliegt.

Für die Freifeldbeschleunigungen  $\{F_0, F_1, \dots, F_n\}$  werden die Wahrscheinlichkeiten  $\{W(F_0), W(F_1), \dots, W(F_n)\}$  für das Auftreten eines Kernschadenszustandes berechnet.

Zwei Treppenfunktionen  $\overline{W(F)}, \underline{W(F)}$  bilden eine obere und untere Schranke der Versagenskurve  $W(F)$ , siehe Abb. 3-12.



**Abb. 3-11** Schranken von  $W(F)$ , 3 Stützstellen

Es wird festgelegt, dass

$$\overline{W(F)} = 1 \quad \forall F \geq F_n \quad \text{und} \quad \overline{W(F)} = W(F_1) \quad \forall F \leq F_1$$

sowie

$$\underline{W(F)} = W(F_n) \quad \forall F \geq F_n \quad \text{und} \quad \underline{W(F)} = W(F_0) \quad \forall F \leq F_1$$

Eine obere und untere Abschätzung für  $KSH_{seismisch}$  ergibt sich dementsprechend aus den folgenden Formeln 3-10 und 3-11.

$$\overline{KSH}_{seismisch} = \sum_{k=1}^n [H(F_{k-1}) - H(F_k)] \cdot W(F_k) + H(F_n) \quad (\text{Formel 3-10})$$

$$\underline{KSH}_{seismisch} = \sum_{k=1}^n [H(F_{k-1}) - H(F_k)] \cdot W(F_{k-1}) + H(F_n) \cdot W(F_n) \quad (\text{Formel 3-11})$$

Es gilt

$$\underline{KSH}_{seismisch} \leq KSH_{seismisch} \leq \overline{KSH}_{seismisch} \quad (\text{Formel 3-12})$$

Die Genauigkeit der Abschätzung hängt von der Anzahl und der Lage der n Stützstellen ab.

Es werden zwei Möglichkeiten der Stützstellenwahl  $\{INT_0, INT_1, \dots, INT_n\}$  empfohlen:

– Intervalle auf der Intensitätskala

Bestimmung der Intensität des Bemessungserdbebens  $INT_{BEB}$ ,

$INT_0 = 0$ , kein Erdbeben

$INT_n = 9$

$INT_1 = [INT_{BEB}] - 2$ , dabei ist  $[A]$  der ganzzahlige Anteil von A

$INT_{i+1} = INT_i + 0,5$ ;  $i = 1, 2, \dots, n-1$

– Intervalle von Überschreitenshäufigkeiten

Als Stützstellen werden die Intensitäten genutzt, die vorgegebenen

Überschreitenshäufigkeiten entsprechen (inverse Funktion  $H^{-1}$  der

anlagenspezifischen seismischen Gefährungsdaten, siehe z.B. Tab. 2-4).

### 3.3.5 Berechnungsvorschrift

In der nachfolgenden Berechnungsvorschrift wird nicht auf Abhängigkeiten und auf das Problem der Unsicherheiten eingegangen.

Bei der nachfolgenden kurzen Beschreibung der Berechnung der seismischen Kernschadenshäufigkeit KSH werden die Bezeichnungen in Tab. 3-6 herangezogen.

**Tab. 3-6:** Berechnungsvorschrift – verwendete Abkürzungen

Abkürzung	Erläuterung
FRAG <sub>k</sub>	Fragility k aus der generischen Datenbank der Fragilities; FRAG <sub>k</sub> ist beschrieben durch ein Quadrupel {HCLPF; F <sub>0.50</sub> ; β <sub>U</sub> ; β <sub>R</sub> }, siehe Kap. 3.3.1.1
INT <sub>1</sub> , ..., INT <sub>n</sub>	Für die Intensitäten INT <sub>i</sub> , i=1,...,n sind die Kernschadenshäufigkeiten KSH <sub>i</sub> zu bestimmen
F <sub>1</sub> , ..., F <sub>n</sub>	F <sub>i</sub> ist der Intensität INT <sub>i</sub> zugeordnete makroseismische Parameter, i=1,...,n
W <sub>i</sub> (FRAG <sub>k</sub> )	Für eine gegebene BSK mit Fragility k wird für die Intensität i die seismische Versagenswahrscheinlichkeit W <sub>i</sub> (FRAG <sub>k</sub> ) berechnet, siehe auch (Formel 3-6) in Kap. 3.3.1.1
H <sub>i</sub>	Überschreitenshäufigkeit zur Intensität INT <sub>i</sub> , i=1,2,...,n
KSW <sub>i</sub>	Bedingte Kernschadenswahrscheinlichkeit bei Auftreten eines Erdbebens mit Intensität i, i=1,...,n
KSH <sub>seismisch</sub>	summarische seismische Kernschadenshäufigkeit

Es wird angenommen, dass eine seismische Gefährdungsanalyse des KKW-Standorts durchgeführt wurde und ein seismisches RiskSpectrum<sup>®</sup>-Anlagenmodell vorliegt. Zur Berechnung der summarischen seismischen Kernschadenshäufigkeit KSH wird folgendermaßen vorgegangen:

- Bereitstellung von Fragilities

Für alle seismisch relevanten BSK im Anlagenmodell sind seismische Ausfallwahrscheinlichkeiten (Fragilities) bereitzustellen. Dazu existiert eine Datenbank generischer Fragilities mit folgenden Feldern

<FRAG> | <HCLPF> | <F<sub>0.50</sub>> | <β<sub>U</sub>> | <β<sub>R</sub>> | <Bemerkungen>

Im Feld <Bemerkungen> ist der generische Datensatz verbal beschrieben, z.B. für welche BSK in welcher SPSA die entsprechende Fragility schon verwendet wurde oder Angabe einer Literaturstelle. Die Felder <HCLPF> | <F<sub>0.50</sub>> | <β<sub>U</sub>> | <β<sub>R</sub>> beschreiben

die Fragility-Funktion und  $\langle FRAG \rangle$  ist nichts weiter als ein Index, mit dem der spezielle Datensatz zugeordnet werden kann.

Für die seismisch relevanten BSK, für die keine übertragbaren generischen seismischen Ausfallwahrscheinlichkeiten zur Verfügung stehen, oder für solche BSK, bei denen anlagenspezifische Versagensmöglichkeiten bestehen, die von den generischen Daten abweichende Werte erwarten lassen, sind anlagenspezifische Versagenswahrscheinlichkeiten zur Ermittlung der Fragilities durchzuführen. Während bei den generischen Fragilities als Bezugsgröße für die Erbebenstärke unmittelbar die Intensität oder die maximale Freifeldbeschleunigung herangezogen werden kann, sind bei anlagenspezifischen Versagensanalysen weitergehende ingenieurseismische Kenngrößen (z.B. Beschleunigungsfrequenzspektrum) heranzuziehen. Die ermittelten anlagenspezifische Fragilities werden in die Datenbanktabelle übernommen.

- Bereitstellung der seismischen Gefährungsdaten

Es werden  $n$  Intensitäten  $\{INT_1, INT_2, \dots, INT_n\}$  festgelegt, für eine bedingte seismische Kernschadenswahrscheinlichkeit berechnet werden soll (siehe Kap. 7). Aus der Gefährungsanalyse sind die den Intensitäten zugeordneten Überschreitenshäufigkeiten  $\{H_1, H_2, \dots, H_n\}$  bekannt.

- Bereitstellung von Datensätzen zur Berechnung der  $KSW_i$  für einzelne Intensitäten

Es wird eine Tabelle mit der nachfolgenden Struktur erstellt:

$\langle BSK \rangle \mid \langle FRAG_k \rangle \mid \langle W_1(FRAG_k) \rangle \mid \langle W_2(FRAG_k) \rangle \mid \dots \mid \langle W_n(FRAG_k) \rangle$

In der  $\langle BSK \rangle$ -Spalte werden alle seismisch relevanten BSK aus dem RiskSpectrum<sup>®</sup>-Anlagenmodell bereitgestellt. In der Spalte  $\langle FRAG_k \rangle$  ist gekennzeichnet, welche Fragility für die entsprechende BSK anzuwenden ist. Die Spalte  $\langle W_i(FRAG_k) \rangle$  enthält die seismische Ausfallwahrscheinlichkeit der entsprechenden BSK für Intensität  $i$ ,  $i = 1, \dots, n$ . Die Berechnung erfolgt mit (Formel 3-6) aus Kap. 3.3.1.1.

Für jede Intensität  $i, i = 1, \dots, n$  wird eine RiskSpectrum<sup>®</sup>-Rechnung durchgeführt, die Spalte  $\langle W_i(\text{FRAG}_k) \rangle$  ist der Eingabedatensatz für die seismischen Parameter im Anlagenmodell.

- Durchführung von  $n$  RiskSpectrum<sup>®</sup>-Rechnungen

Man erhält als Ergebnis der RiskSpectrum<sup>®</sup>-Rechnungen folgenden Vektor von Werten  $\{KSW_1, KSW_2, \dots, KSW_n\}$ .  $KSW_i$  ist die bedingte Wahrscheinlichkeit, dass bei einem Erdbeben der Intensität  $INT_i$  ein Kernschaden eintritt.

- Zusammenfassung der Ergebnisse

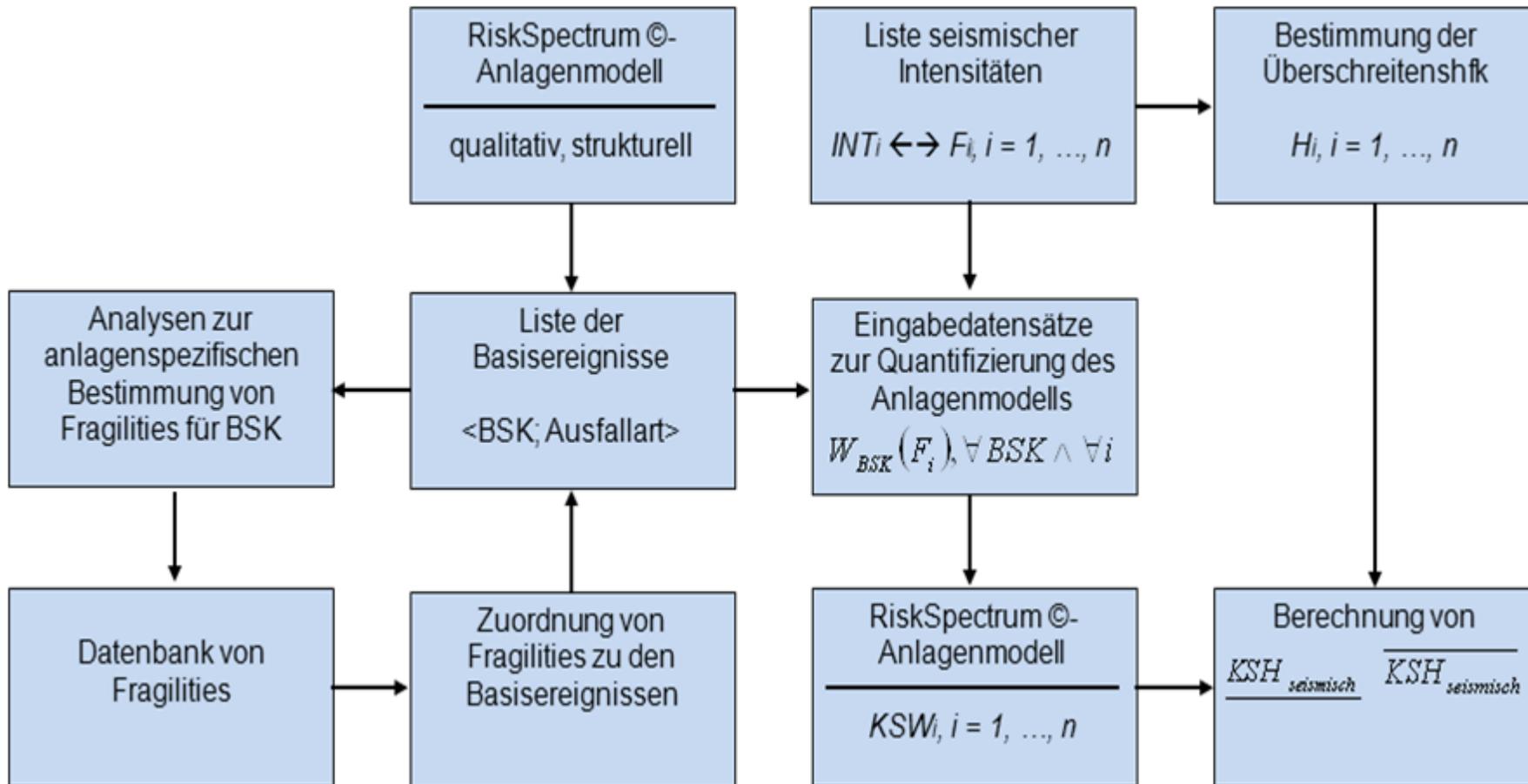
Eine obere und untere Grenze für  $KSH_{\text{seismisch}}$  ergibt sich aus (Formel 3-10) und (Formel 3-11) oder Nutzung der Rechenvorschrift in Tab. 3-7.

**Tab. 3-7:** Rechenvorschrift zur Berechnung einer unteren und oberen Abschätzung für die summarische seismische Kernschadenshäufigkeit

Überschreitenshäufigkeit [1/a]	Differenzen $\Delta_i$	bedingte Kernschadenswahrscheinlichkeit $KSW_i$	untere	obere
			Abschätzung	
$H_0 = 1$	-----	$KSW_0$	$H_n \times KSW_n$	$H_0$
$H_1$	$H_0 - H_1$	$KSW_1$	$\Delta_1 \times KSW_0$	$\Delta_1 \times KSW_1$
$H_2$	$H_1 - H_2$	$KSW_2$	$\Delta_2 \times KSW_1$	$\Delta_2 \times KSW_2$
...	...	...	...	...
$H_{n-1}$	$H_{n-2} - H_{n-1}$	$KSW_{n-1}$	$\Delta_{n-1} \times KSW_{n-2}$	$\Delta_{n-1} \times KSW_{n-1}$
$H_n$	$H_{n-1} - H_n$	$KSW_n$	$\Delta_n \times KSW_{n-1}$	$\Delta_n \times KSW_n$
			$\Sigma_{\text{untere}}$	$\Sigma_{\text{obere}}$

- Überprüfung der Ergebnisse

Werden keine Unsicherheiten betrachtet, sollte die obere Abschätzung als Ergebnis der seismischen Analyse genutzt werden. Ist die Differenz  $\Sigma_{\text{obere}} - \Sigma_{\text{untere}}$  zu groß, ist die Anzahl  $n$  der zu berechnenden Intervalle zu vergrößern.



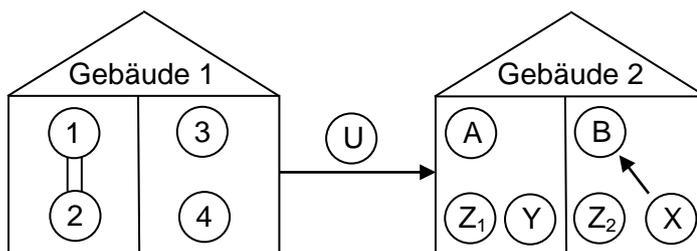
**Abb. 3-12** Ablaufschema zur Berechnung der Häufigkeit eines erdbebenbedingten Kernschadens

## 4 Anwendungen

Im Kap. 3 wird die Aufstellung und Quantifizierung von Anlagenmodellen zur Durchführung einer PSA bei seismischen Einwirkungen diskutiert. Zur Veranschaulichung der Modellierungsannahmen, -bedingungen und -probleme werden die nachfolgenden zwei Beispiele herangezogen.

### 4.1 Modellierung und Quantifizierung an einem einfachen Beispiel (Beispiel 1)

Die Modellierung und Quantifizierung erdbebenbedingter Ereignisabläufe ist eine komplexe Aufgabe, deshalb wird nachfolgend ein Beispiel konstruiert, an dem das Vorgehen erläutert und erprobt werden kann (siehe Abb. 4-1).

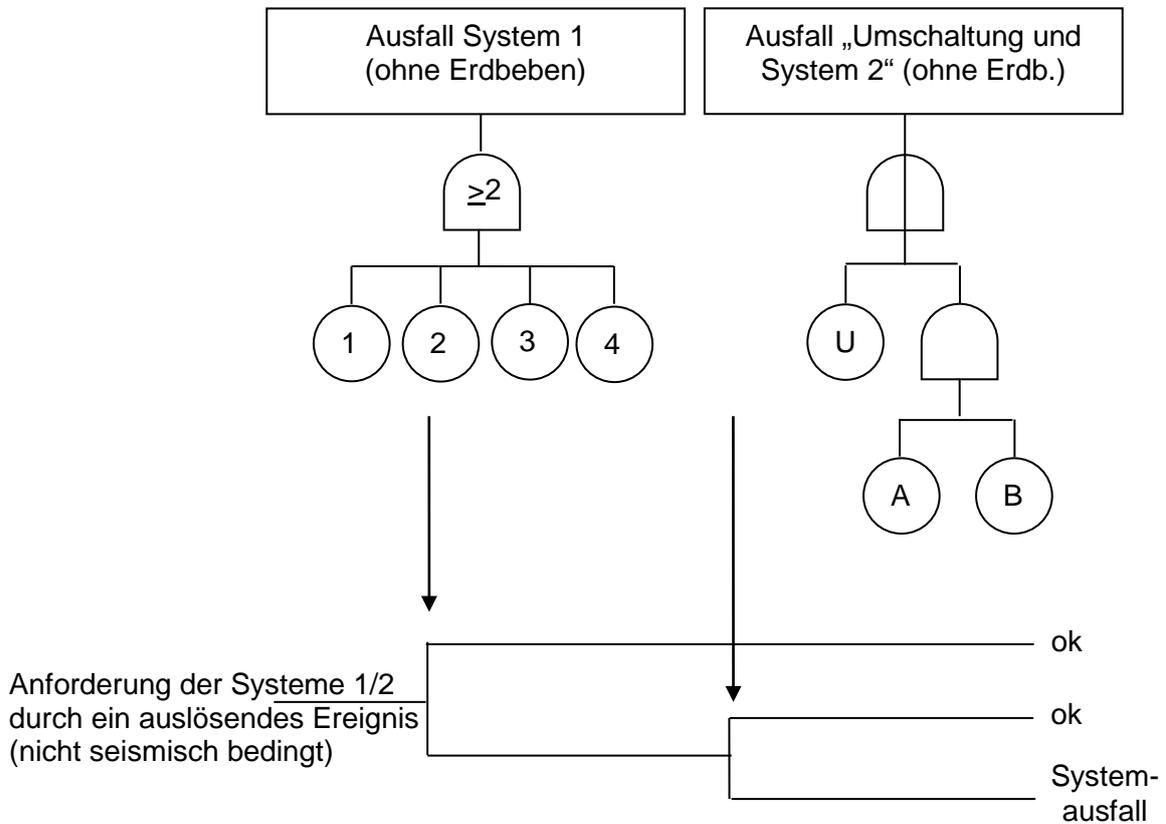


**Abb. 4-1** Beispiel 1: Festlegungen

In Gebäude 1 befindet sich System 1 mit vier Komponenten (1, 2, 3, 4). Die Komponenten befinden sich in zwei Räumen. System 1 ist ausgefallen, wenn zwei der vier Komponenten ausfallen. System 2 befindet sich in Gebäude 2. System 2 ist ausgefallen, wenn beide Komponenten (A, B) nicht verfügbar sind. Das Gesamtsystem ist ausgefallen, wenn sowohl System 1 als auch System 2 ausgefallen sind. Nach Ausfall von System 1 kann auf System 2 umgeschaltet werden (Funktionselement U, Personalhandlung).

Im Gebäude 2 befinden sich die BSK X, Y, Z<sub>1</sub>, Z<sub>2</sub>, welche an sich nichts mit der Gesamtfunktion des beschriebenen Systems zu tun haben, aber im Erdbebenfall zu berücksichtigen sind.

An diesem Beispiel werden das Vorgehen bei SPSA erprobt und verschiedene Herangehensweisen diskutiert.



**Abb. 4-2** Beispiel 1: Ereignis und Fehlerbäume zum Beispielsystem (ohne Betrachtung seismischer Einwirkungen)

Im Folgenden werden für verschiedene BSK seismische Versagenskurven benötigt. Unter einer seismischen Versagenswahrscheinlichkeit einer BSK wird die Wahrscheinlichkeit  $W_{BSK}(F)$  des Ausfalls bzw. Funktionsverlustes einer BSK als Funktion der Stärke des Erdbebens (hier: Freifeldbeschleunigung  $F$ ) verstanden.

Angenommen, Auslegungsüberprüfungen und Begehungen haben ergeben, dass die Komponenten 3, 4, B und U gegen Erdbeben beliebiger Stärke robust sind. Für die Komponenten 1, 2 und A werden seismische Versagenswahrscheinlichkeiten  $W_1(F)$ ,  $W_2(F)$  und  $W_A(F)$  angegeben. Die entsprechenden Basisereignisse werden 1S, 2S und AS genannt.

Es werden folgende Abhängigkeiten berücksichtigt:

- Der Ausfall von Gebäude 1 mit  $W_{\text{Gebäude1}}(F)$  (bzw. 2 mit  $W_{\text{Gebäude2}}(F)$ ) führt zum Ausfall von System 1 (bzw. System 2).
- Im Gebäude 1 ist bei Erdbeben der Ausfall von Raum 1 möglich mit Wahrscheinlichkeit  $W_{\text{Raum1}}(F)$ . Das führt zum gleichzeitigen Ausfall der Komponenten 1 und 2.
- Die Komponenten 1 und 2 sind starr miteinander verbunden, so dass mit einer Korrelation  $p_{12}$  bez. des Ausfalls bei Erdbeben gerechnet werden muss.
- Die Komponente X ist eine BSK der Klasse II, d.h. selbst ohne sicherheitstechnische Bedeutung, aber der seismisch bedingte Ausfall (hier Auftreten von Schwingungen) von X mit  $W_X(F)$  führt mit Wahrscheinlichkeit  $p_{XB}$  zum Ausfall der Komponente B.

Der Wert von  $p_{XB}$  ist intensitätsabhängig. X steht in der Nähe von B. Bei größeren seismisch-induzierten Schwingungen von X kommt es zur Schädigung von B.

$$p_{XB} = \begin{cases} 0 & \text{Intensität} \leq 6 \\ 0,5 & 6 < \text{Intensität} \leq 7 \\ 1 & 7 < \text{Intensität} \end{cases}$$

- Bei den BSK  $Z_1$  und  $Z_2$  kann es im Erdbebenfall zu Überhitzungen kommen, aber nur im Raum der Komponente A gibt es eine BSK Y mit leichtentzündlichem Brandgut. Entsprechend /MAT 08/ wird angenommen, dass für die Komponente  $Z_1$  ein seismisch bedingtes Brandpotential abgeleitet werden kann. Die Brandausbreitung auf Komponente A erfolgt mit Wahrscheinlichkeit  $p_{ZA}$ .

Die entsprechend erweiterten Fehlerbäume für System 1 und System 2 sind in Abb. 4-3 und Abb. 4-4 enthalten. Dabei wurden die Bezeichnungen in Tab. 4-1 gewählt (vgl. auch die Nomenklaturvorgaben in /GRS 01/). Alle Basisereignisse, die mit „S-“ beginnen, sind seismische Ausfallwahrscheinlichkeiten und damit abhängig von der Erdbebenstärke.

**Tab. 4-1**

Beispiel 1:

Bezeichnungen der Basisereignisse im RiskSpectrum<sup>®</sup>-Modell

Bezeichnung der Komponente oder Wahrscheinlichkeit im Beispiel	Bezeichnung im RiskSpectrum <sup>®</sup> Modell	Bemerkung
1	SYS01BSK01	unabhängiger Zufallsausfall
1	S-SYS01BSK01	Ausfallwahrscheinlichkeit bei Erdbeben (abhängig von der Erdbebenstärke)
2	SYS01BSK02	unabhängiger Zufallsausfall
2	S-SYS01BSK02	Ausfallwahrscheinlichkeit bei Erdbeben (abhängig von der Erdbebenstärke)
$p_{12}$	KAP--BSK01-02	Abhängigkeitsparameter zwischen BSK 1 und 2
3	SYS01BSK03	unabhängiger Zufallsausfall
4	SYS01BSK04	unabhängiger Zufallsausfall
A	SYS01BSK0A	unabhängiger Zufallsausfall
A	S-SYS01BSK0A	Ausfallwahrscheinlichkeit bei Erdbeben (abhängig von der Erdbebenstärke)
B	SYS01BSK0B	unabhängiger Zufallsausfall
U	SYS01BSK0U	unabhängiger Zufallsausfall
Gebäude 1	S-GE1	Fragility von Gebäude1 (abhängig von der Erdbebenstärke)
Gebäude 2	S-GE2	Fragility von Gebäude2 (abhängig von der Erdbebenstärke)
Raum 1	S-GE1—01001	Fragility von Raum1 (abhängig von der Erdbebenstärke)
X	S-SYS00BSK0X	Ausfallwahrscheinlichkeit bei Erdbeben (abhängig von der Erdbebenstärke)
$p_{XB}$	S-KAP--BSK0X-0B	bedingte Wahrscheinlichkeit des Ausfalls von B, wenn X versagt; abhängig von der Intensität des Erdbebens
$Z_1$	S-SYS00BSKZ1	Seismische Brandwahrscheinlichkeit
$P_{Z1A}$	KAP--BSKZ1-0A	Bedingte Brandausbreitungswahrscheinlichkeit

Im Beispiel werden drei Fragility-Kurven unterschieden (Fall 1 bis Fall 3 in Tab. 4-2), die Werte und die Zuordnung zum Beispiel wurden willkürlich festgelegt.

**Tab. 4-2** Beispiel 1: Fragility-Kurven

	Fall 1	Fall 2	Fall 3
$F_{HCLPF}$	0,22	0,35	0,44
$F_{0.5}$	0,5	0,8	1,0
$\beta_U$	0,3	0,3	0,3
$\beta_R$	0,2	0,2	0,2

**Tab. 4-3** Beispiel 1: Festlegung der Ausfalldaten für die Komponenten

Basisereignis	unabh. Ausfall-Wk oder Kopplungswert	seism. Parameter			
		$F_{HCLPF}$	$F_{0.5}$	$\beta_U$	$\beta_R$
SYS01BSK01	1,00E-02	Fall 1			
SYS01BSK02	1,00E-02	Fall 1			
SYS01BSK03	1,00E-02	---	---	---	---
SYS01BSK04	1,00E-02	---	---	---	---
SYS01BSK0U	2,50E-01	---	---	---	---
SYS01BSK0A	1,00E-02	Fall 1			
SYS01BSK0B	1,00E-02	---	---	---	---
SYS00BSK0X	---	Fall 2			
SYS00BSKZ1	---	Fall 2			
KAP--BSK01-02	0,5	---	---	---	---
KAP--BSK0X-0B	{0; 0,5; 1}	---	---	---	---
KAP--BSKZ1-0A	0,8	---	---	---	---
S-GE1	---	Fall 3			
S-GE2	---	Fall 3			
S-GE1—01001	---	Fall 2			

Aufgrund der Daten in Tab. 4-3 werden den Basisereignissen in Abhängigkeit von der Freifeldbeschleunigung die Werte in Tab. 4-5 zugewiesen. Dazu wird die Kurve der Überschreitenswahrscheinlichkeiten gemäß Beispiel in Abb. 3-10 für 8 Intensitäten ausgewertet.

**Tab. 4-4** Beispiel 1: Intensitäten, zugeordnete Bodenbeschleunigungen und Überschreitenshäufigkeiten

Bez.	Intensität	Freifeldbeschleunigung [g]		H(F)
		T&B	M&O	
F1	4,0	0,017	0,018	1,0 E-01
F2	5,0	0,033	0,032	1,6 E-02
F3	5,5	0,047	0,043	4,4 E-03
F4	6,0	0,066	0,057	1,0 E-03
F5	6,5	0,094	0,076	1,5 E-04
F6	7,0	0,132	0,102	1,0 E-05
F7	7,5	0,187	0,136	1,5 E-07
F8	8,0	0,264	0,181	1,0 E-08

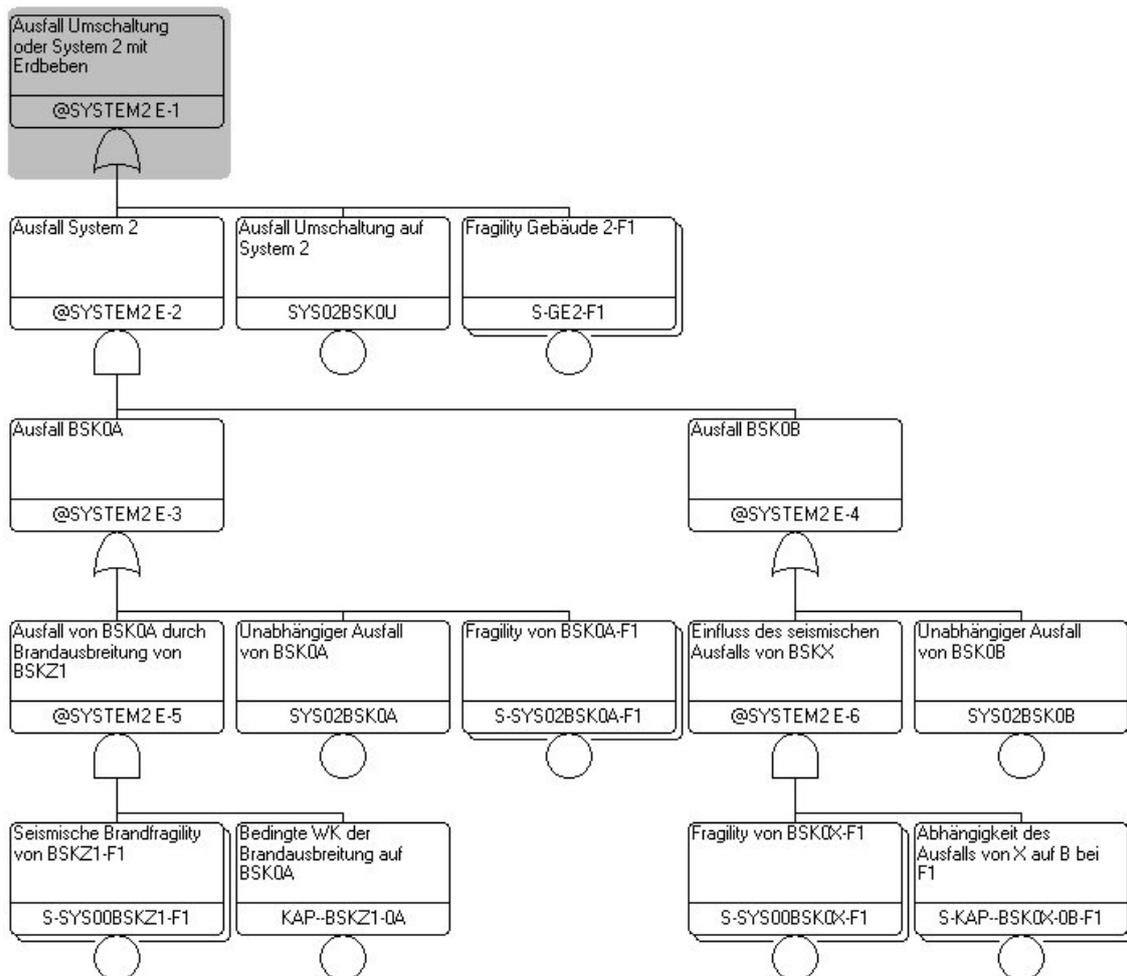
Die entsprechenden Freifeldbeschleunigungen wurden nach Trifunac & Brady (T&B) und Murphy & O'Brien (M&O) bestimmt (siehe Kap. 3.3.2 und Tab. 4-4), die M&O-Werte werden in den Beispielen (z.B. in Tab. 4-5) genutzt.

**Tab. 4-5** Beispiel 1:  
Erwartungswerte des seismischen Ausfalls für die Fragility-Kurven; Fall 1 bis Fall 3 und Wert von  $p_{XB}$  für zu berechnenden Intensitäten

Bez.	Intensität	F [g]	Fall 1	Fall 2	Fall 3	$p_{XB}$
F1	4,0	0,018	1,49 E-20	3,37 E-26	3,91 E-29	0
F2	5,0	0,032	1,23 E-14	2,18 E-19	6,71 E-22	0
F3	5,5	0,043	5,07 E-12	2,57 E-16	1,31 E-18	0
F4	6,0	0,057	8,57 E-10	1,18 E-13	9,69 E-16	0
F5	6,5	0,076	8,71 E-08	3,32 E-11	4,42 E-13	0,5
F6	7,0	0,102	5,20 E-06	5,57 E-09	1,22 E-10	0,5
F7	7,5	0,136	1,53 E-04	4,45 E-07	1,57 E-08	1
F8	8,0	0,181	2,41 E-03	1,88 E-05	1,07 E-06	1

Die bedingte Eintrittshäufigkeit für einen Systemausfall (siehe Tab. 4-6) ohne Betrachtung seismischer Einwirkungen beträgt  $1,48E-04/a$ . Wird die bedingte Häufigkeit eines Systemausfalls für die Erdbebenintensitäten F1 bis F8 (siehe die Bezeichnungen in Tab. 4-5) berechnet, ergeben sich die Werte in Tab. 4-6.





**Abb. 4-4** Beispiel 1: Fehlerbaum für System 2 im Erdbebenfall

Es kann festgestellt werden, dass erst ein Erdbeben mit einer Intensität größer VII (F6) die Systemschadenshäufigkeit wesentlich steigen lässt.

**Tab. 4-6** Beispiel 1: Wahrscheinlichkeit eines Systemausfalls bei Anforderung (Bedingung: Erdbeben gegebener Intensität tritt ein)

kein Erdbeben	F1 bis F5	F6	F7	F8
1,48 E-04	1,50 E-04/a	1,51 E-04/a	1,91 E-04/a	7,95 E-04/a

In Tab. 4-7 werden die tatsächlichen Systemschadenshäufigkeiten miteinander verglichen. In der Spalte „Kein Systemschaden durch Erdbeben“ ist die Systemschadenshäufigkeit eines Systems angegeben, das durch Erdbeben nicht zerstört werden kann,

in der Spalte „Erdbebenschaden des Systems“ die Systemschadenshäufigkeit unter Berücksichtigung der zuvor definierten möglichen Erdbebenausfälle. Unter Berücksichtigung der Eintrittshäufigkeiten von Erdbeben ergeben sich erst „größere“ relative Unterschiede im Ergebnis in Bereichen, die nicht mehr relevant sind.

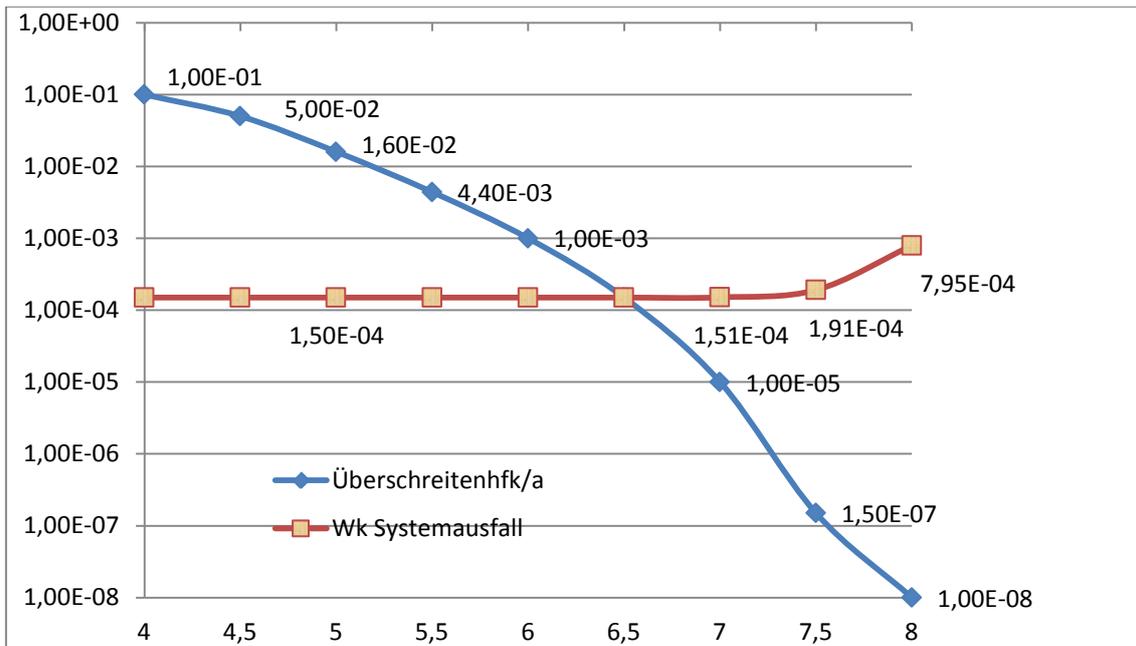
**Tab. 4-7** Beispiel 1: Ergebnisse- Systemschadenshäufigkeiten

Bezeichnung	Eintrittshäufigkeit pro Jahr H(F)/a	Systemschadenshäufigkeiten unter Berücksichtigung der Eintrittshäufigkeit des Erdbebens/a	
		kein Systemschaden durch Erdbeben H(F) x 1,48 E-04/a	Erdbebenschaden des Systems H(F) x W(F)/a
F1	1,0 E-01	1,48 E-05	H(F1) x 1,50 E-04 = 1,50 E-05
F2	1,6 E-02	2,37 E-06	H(F2) x 1,50 E-04 = 2,40 E-06
F3	4,4 E-03	6,51 E-07	H(F3) x 1,50 E-04 = 6,60 E-07
F4	1,0 E-03	1,63 E-07	H(F4) x 1,50 E-04 = 1,50 E-07
F5	1,5 E-04	2,22 E-08	H(F5) x 1,50 E-04 = 2,25 E-08
F6	1,0 E-05	1,48 E-09	H(F6) x 1,51 E-04 = 1,15 E-09
F7	1,5 E-07	2,22 E-11	H(F7) x 1,91 E-04 = 2,87 E-11
F8	1,0 E-08	1,48 E-12	H(F8) x 7,95 E-04 = 7,95 E-12

Das Gesamtrisiko für den Ausfall des Beispielsystem im Erdbebenfall liegt zwischen 1,48 E-04/a und 1,50 E-04/a (siehe Tab. 4-8). Dabei wurde eine Erdbebenhäufigkeit entsprechend Abb. 4-3 angenommen.

**Tab. 4-8** Beispiel 1: Berechnung des Gesamtrisikos

	H(F(i))	W(F(i))	A = H(F(k))-H(F(k-1))	A x W(F(i))	A x W(F(i-1))
F0	1,0 E-00	1,48 E-04	---	1,00E-08	7,95E-12
F1	1,0 E-01	1,50 E-04	9,00E-01	1,35E-04	1,33E-04
F2	1,6 E-02	1,50 E-04	8,40E-02	1,26E-05	1,26E-05
F3	4,4 E-03	1,50 E-04	1,16E-02	1,74E-06	1,74E-06
F4	1,0 E-03	1,50 E-04	3,40E-03	5,10E-07	5,10E-07
F5	1,5 E-04	1,50 E-04	8,50E-04	1,28E-07	1,28E-07
F6	1,0 E-05	1,51 E-04	1,40E-04	2,11E-08	2,10E-08
F7	1,5 E-07	1,91 E-04	9,85E-06	1,88E-09	1,49E-09
F8	1,0 E-08	7,95 E-04	1,40E-07	1,11E-10	2,67E-11
Summen				<b>1,48 E-04</b>	<b>1,48 E-04</b>



**Abb. 4-5** Beispiel 1: Überschreitenshäufigkeiten und Wahrscheinlichkeiten für den Systemausfall

Am Beispiel lassen sich einige wichtige Bearbeitungsschritte bei der Modellierung und Quantifizierung erdbebenbedingter Ereignisabläufe herausarbeiten, die nachfolgend noch einmal hervorgehoben werden:

- Zusammenstellung der SAL einschließlich der Beschreibung der Abhängigkeiten  
Diese Problematik wurde ausführlich in /TUE 10/ behandelt. Dort wurde ein Verfahren zur Klassifizierung von BSK in Hinblick auf ihre sicherheitstechnische Relevanz bei seismischen Einwirkungen entwickelt. Schon bei dem hier praktizierten einfachen Beispiel zeigt sich die Notwendigkeit einer systematischen Vorgehensweise.
- Zusammenstellung der Daten für die BSK der SAL (Fragilities und Kopplungsfaktoren)  
Die Zusammenstellung der Daten ist mehr oder weniger ein formaler Punkt, wenn sie denn einmal festgelegt sind. Trotzdem können bei der großen Datenmenge fehlerhafte Eingaben passieren. Deshalb wurden eine Berechnungsvorschrift und ein Datenflussdiagramm zur Anwendung bei SPSA erarbeitet (siehe Kap. 3.3.5).
- Festlegung der Intensitäten/Freifeldbeschleunigungen  $F_1$  bis  $F_n$  zur Berechnung der zugehörigen bedingten Kernschadenswahrscheinlichkeiten (siehe dazu Kap. 3.3.4)

- Für jede Fragility-Kurve müssen die entsprechenden Ausfallwahrscheinlichkeiten für  $F_1$  bis  $F_n$  berechnet werden und als Parameter in RiskSpectrum<sup>®</sup> eingegeben werden.

An Beispiel 1 ist zu sehen, dass ein Datenflussdiagramm benötigt wird. Erste Vorschläge zur Datenübergabe an RiskSpectrum<sup>®</sup> wurden in Beispiel 2 erprobt (zur entsprechenden MS EXCEL<sup>®</sup>-Datei <Seismische Eingabeparameter.xlsx> siehe Kap. 7.2).

- Quantifizierungsschritte:

Berechnung der Kernschadenswahrscheinlichkeiten für  $F_1$  bis  $F_n$ ;

Bereitstellung der seismischen Überschreitenswahrscheinlichkeiten am Standort und Berechnung der Differenzen zwischen den Stützstellen  $F_i$  und  $F_{i+1}$ ;

Berechnung der summarischen seismisch bedingten Kernschadenshäufigkeit;

Bewertung des Ergebnisses und eventuelle Korrektur des Ergebnisses durch Betrachtung weiterer Freifeldbeschleunigungen.

Diese Quantifizierungsschritte werden auch an dem komplexen Beispiel 2 (Kap. 4.2) erprobt.

## **4.2 Seismisch bedingter Notstromfall in der Referenzanlage (Beispiel 2)**

Da die Erstellung eines umfassenden seismischen Anlagenmodells im Rahmen dieses Projektes zu aufwändig ist, wird die Methodik am Beispiel eines erdbebenbedingten Notstromfalls für eine reale Referenzanlage erprobt. Bei den Fehlerbäumen wird nur auf die Komponenten der PSA Stufe 1 der Referenzanlage zurückgegriffen. Auf die neue Methodik zur Erstellung einer umfassenden seismischen Ausrüstungsliste /TUE 10/ konnte noch nicht zurückgegriffen werden, deshalb werden im Beispiel auch noch keine seismischen Abhängigkeiten berücksichtigt.

Es wird ein Ereignisbaum für das erdbebenbedingt ausgelöste Ereignis erstellt, unter Einbeziehung eines Fehlerbaums, der beschreibt wie aus einem Erdbebenereignis das Ereignis Notstromfall wird.

### **4.2.1 Annahmen bei der Modellierung von Fehlerbäumen für das Ereignis Erdbeben**

Bei der Erstellung des Fehlerbaums für das auslösende Ereignis oder bei der Modifizierung der Fehlerbäume für den Ausfall von erforderlichen Systemfunktionen bei einem durch Erdbeben ausgelösten Störfall bzw. Transiente werden grundsätzlich alle Komponenten in Betracht gezogen, auch wenn sie gegen Erdbeben bestimmter Stärke (z.B. Bemessungserdbeben) ausgelegt sind. Es wird davon ausgegangen, dass auch solche Komponenten mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit im Erdbebenfall ausfallen können. Eine Auslegung gegen Erdbeben macht sich nur in der numerischen Bewertung der Ausfallwahrscheinlichkeiten bei Erdbeben bemerkbar.

Für die Erstellung der Fehlerbäume werden unter anderem die Komponentenausfallmodi 'Leistungsschalter öffnet fälschlich', 'Leistungsschalter schließt fälschlich' und 'Erdungstrennschalter schließt fälschlich' verwendet. Ob die Konstruktion dieser Schalter es überhaupt zulässt, dass ein fälschliches Schließen durch Erdbeben zustande kommt, wird bei einer Anwendung noch zu überprüfen sein.

Für das fälschliche Schließen eines Erdungs- bzw. Erdungstrennschalter wird die Auslösung des vorgeschalteten Sicherungsorgans (Leistungsschalter) angenommen, so dass die Schiene dann spannungslos ist. Erdungsschalter dürfen nicht zum Aufschalten auf stromführende Schienen verwendet werden, ihre Zerstörung ist daher im Be-

reich des Möglichen, was aber für die Analyse zunächst keine Rolle spielt. Im Rahmen dieses Vorhabens und in diesem Beispiel wird zunächst davon ausgegangen, dass Erdungs- und Erdungstrennschalter mit einer noch abzuschätzenden Wahrscheinlichkeit im Erdbebenfall fälschlich auslösen und dadurch einen Erdschluss verursachen, der dann von einem übergeordneten Schutzorgan abgeschaltet wird. Dieses Szenario ist die pessimistischere Ausfallvariante, denkbar ist aber auch eine Zerstörung des Erdungsschalters durch den auftretenden Erdschlussstrom mit einer Zerstörung des Schalters, ohne Ansprechen der übergeordneten Schutzeinrichtung. Das Ausfallverhalten von Erdschluss- bzw. Erdschlusstrennschalter und seiner Folgeszenarien sind für den Erdbebenfall im konkreten Projekt zu klären.

Größere Kuppelschalter oder der Generatorschalter von Notstromdiesel wie Transformatoren können ölgekühlt sein. In diesem Fall ist zu untersuchen, ob ausreichend Öl vorhanden ist, dass bei Verlust der Integrität bei solchen Anlagen, ein Folgebrand entstehen kann, wenn das Öl mit heißen Flächen in Berührung kommt. Bei der Modellierung der Fehlerbäume wird ein Folgebrand nicht einbezogen. In Kap. 3.2 ist aber dargestellt wie Folgebrände als Abhängigkeiten modelliert werden können.

Das Ereignis Erdbeben löst in der Referenzanlage direkt kein RESA-Signal aus. Es wird anhand des Inspektionsniveaus (0,4 fache des Bemessungserdbebens) und der Überprüfung des Anlagenzustandes entschieden, ob von Hand abgefahren wird (siehe dazu auch die in /TUE 10/ enthaltenen Daten und Informationen zur seismischen Auslegung des Referenzkraftwerks). Es gibt auch Vorrichtungen, die an bestimmten Stellen in der Anlage wie z.B. am Dampferzeuger die Horizontalbeschleunigungen messen. Diese werden in der Warte angezeigt bzw. es wird eine Meldung ausgegeben. Handabschaltungen werden für das Beispiel 2 weder im Ereignisbaum noch in den Fehlerbäumen berücksichtigt.

Um seismische Abhängigkeiten zu identifizieren, werden die BSK, die in dem bestehenden PSA-Projekt bei einem Notstromfall mit den Basisereignissen ODER-verknüpft sind, die den erdbebenbedingten Ausfall beschreiben, ausgelesen und auch die räumliche Zuordnung abgespeichert. Durch ein geeignetes Auswahlverfahren (siehe dazu das in /TUE 10/TUE 10/ abgeleitete Verfahren und entsprechende Begehungsanweisungen), wird ermittelt, inwieweit es aufgrund des Erdbebens zu Folgeausfälle kommen kann, weil Komponenten sich innerhalb des Raumes bewegen, so dass andere Komponenten dadurch beschädigt werden. Von Interesse ist dabei immer, ob Komponenten des Sicherheitssystems oder Betriebskomponenten ausfallen, die zu einem

auslösenden Ereignis führen können. Dabei werden auch solche Komponenten in Betracht gezogen, die keine Sicherheitskomponenten sind und deren Ausfälle in der Leistungsbetrieb-PSA in den Fehlerbäumen gar nicht modelliert sind. Wenn diese aufgrund einer erdbebenbedingten Lageveränderung im Stande sind, zum Ausfall einer Sicherheitskomponente oder SAE-auslösenden Betriebskomponente beizutragen, werden diese Abhängigkeiten in den Fehlerbäumen modelliert.

Das Vorgehen ist umfassend in /TUE 10/ abgeleitet und beschrieben. Eine umfassende praktische Umsetzung des Vorgehens für die Referenzanlage ist in einem auf den Ergebnissen dieses Vorhabens aufbauenden Folgevorhabens /GRS 03/ geplant.

#### **4.2.2 Ereignisbaum für den durch Erdbeben initiierten Notstromfall**

Im Beispiel wird ausschließlich der durch Erdbeben ausgelöste Notstromfall untersucht, um aus der Erfahrung der Modellierung und aus den Ergebnissen weiterführende methodische Aspekte ableiten zu können. Dazu wurde in vereinfachter Weise ein Ereignisbaum erstellt, der zum einen die Ereignisablaufpfade der notwendigen Systemfunktionen für die Störfallbeherrschung und zum anderen die Systemfunktion „Ausfall der Eigenbedarfsversorgung“ enthält. Diese Systemfunktion und der damit verknüpfte Fehlerbaum beschreibt mit welcher Wahrscheinlichkeit Folgeausfälle des Erdbebens bzw. ihre Kombinationen zu einem Notstromfall führen. Die Modellierung des Fehlerbaums wird in Abschnitt 4.2.3 beschrieben

Das auslösende Ereignis Erdbeben (1. Spalte des Ereignisbaums, siehe Abb. 4-6) ist durch ein Basisereignis definiert. Dieses Basisereignis beschreibt die Eintrittshäufigkeit eines Erdbebens bestimmter Intensität (siehe dazu das allgemeine Vorgehen in Kap. 3.3.3 und das konkrete Vorgehen zur Datenbereitstellung in Kap. 4.2.5). Die logischen Verzweigungen im Ereignisbaum (siehe Abb. 4-6) und die den Störfall beherrschenden Systemfunktionen sind aus der Leistungsbetrieb-PSA für interne auslösende Ereignisse der Stufe 1 entnommen.

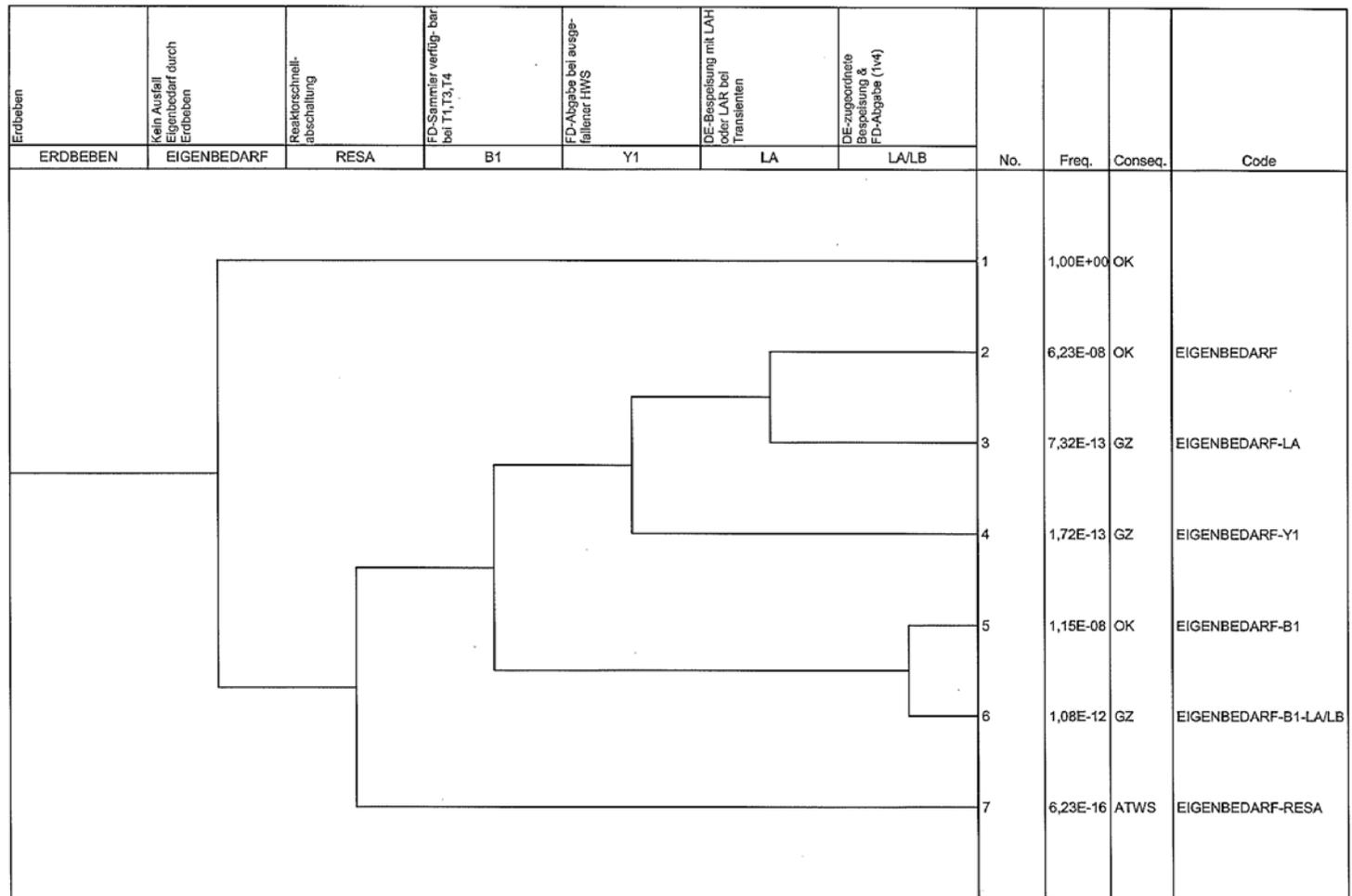


Abb. 4-6 Ereignisbaum für den erdbebeninduzierten Notstromfall

### 4.2.3 Fehlerbaum für die Einleitung eines Notstromfalls

Da die umfassende Modellierung eines Erdbebenereignisses im Rahmen dieses Projektes zu aufwändig ist, wird die Methodik am Beispiel eines erdbebenbedingten Notstromfalls für eine reale Anlage erprobt.

Zunächst wird ein Fehlerbaum für das erdbebenbedingt auslösende Ereignis Notstromfall erstellt. Der Fehlerbaum gibt die Ausfälle und die Kombinationen von Ausfällen an, die bei einem Erdbeben zum Notstromfall führen. Durch Quantifizierung des Fehlerbaums berechnet man die seismisch bedingte Wahrscheinlichkeit eines Notstromfall. Der Fehlerbaum enthält ausschließlich Basisereignisse, die den Ausfall der Komponenten durch Erdbeben beschreiben. Soweit Ausfälle zufallsbedingt zu einem Notstromfall führen, sind diese selbstmeldend und führen entweder zu einem speziellen Anlagenzustand (Reduktion der Leistung oder Abfahren der Anlage), oder werden repariert und sind daher nur während der Reparaturzeit nicht verfügbar. Sie werden daher nicht modelliert, d. h. in diesem Beispiel wird ein mögliches Versagen von Komponenten vor dem Eintritt eines Erdbebens vernachlässigt. Bei einer vollständigen Anwendung muss allerdings geprüft werden, ob die Berücksichtigung von selbstmeldenden Zufallsfehlern von Relevanz ist und daher diese Fehler doch zu berücksichtigen sind.

Der Fehlerbaum beschreibt die Möglichkeiten des Eintritts eines Notstromfalls. Die Erstellung des Fehlerbaums beruht auf der deduktiven Vorgehensweise (Top-down-Verfahren). Der Fehlerbaum und die zugehörigen Teilfehlerbäume sind in Abb. 4-7 bis Abb. 4-11 dargestellt. Die Teilfehlerbäume in den Abbildungen beschreiben nur den Ausfall der Schiene BBA, die Teilfehlerbäume für die übrigen Schienen BBB bis BBD weisen die die gleiche Struktur auf.

Die aktuelle Fassung beinhaltet zurzeit keine durch Erdbeben ausgelösten fälschlichen Signale, aber fehlerhafte Aktionen von Komponenten. Diese können durch mechanische Anregung aus dem Erdbeben selbst oder durch elektrische Signale angeregt werden. Werden Komponenten identifiziert, deren Fehlanregung zur Auslösung eines anlageninternen Störfalls oder Transiente beitragen, ist zu prüfen, ob auch in Fehlsignalen eine mögliche Ursache liegen kann. Umgekehrt ist auch zu prüfen, ob seismische Einwirkungen Fehlsignale auslösen können, die allein oder zusammen mit dem Ausfall bzw. Fehlanregung anderer Komponenten bei dem untersuchten Notstromfall

eine Rolle spielen oder ggf. andere Transienten auslösen können. Letztere Überprüfung sollte allerdings erst durchgeführt werden, wenn die relevanten durch Erdbeben ausgelösten Ereignisse untersucht worden sind. Diese Aufgabe steht somit am Ende der Bearbeitungsschritte innerhalb der Identifizierung möglicher anlageninterner auslösender Ereignisse, um ggf. relevante noch nicht untersuchte anlageninterne Ereignisse identifizieren zu können. Eine Quantifizierung solcher Fehlsignale zusammen mit anderen Ausfällen von Komponenten sollte durchgeführt werden, um ihre numerische Relevanz zu prüfen und zu entscheiden, welche Auswirkungen solche Fehlsignale haben können und ob sie gegebenenfalls gegen andere erdbebenbedingte Ausfälle vernachlässigt werden können. Eine solche Überprüfung kann mit einem hohen Aufwand verbunden sein. Die Fehlerbäume des Beispiels beinhalten Ausfälle der aktiven Komponenten. Da in einer PSA für den Leistungsbetrieb Ausfälle von Kabeln, z.B. zwischen Verteilungen und Schaltern nicht modelliert werden, sind diese ggf. noch im Fehlerbaum abzubilden. Soweit der Ausfall von Verteilungen bzw. Schienen aufgrund von Kurzschluss in der PSA für den Leistungsbetrieb nicht modelliert ist, sollten die erdbebenbedingten Ausfälle ergänzt werden.

Der Eintritt des Notstromfalls wird definiert als der Ausfall der Stromversorgung aus der Eigenbedarfsversorgung. Beim Leistungsbetrieb wird der Ausfall des Eigenbedarfs an sich als Notstromfall definiert. Hier wird im Allgemeinen das Fehlöffnen der Kuppelschalter zwischen den EB-Schienen und den Notstromschienen (10-kV-Ebene) vernachlässigt, da nur ein zeitgleiches bzw. nahezu gleiches Versagen dieser Kuppelschalter zum Notstromfall führt. Die Wahrscheinlichkeit für solche zeitgleichen Ereignisse wird aber gegenüber den Eintrittswahrscheinlichkeiten der anderen Eintrittsursachen eines Notstromfalls vernachlässigt.

Es können sich allerdings auch sogenannte Schienennotstromfälle ereignen, bei denen die normale Stromversorgung der Notstromschienen nur teilweise ausgefallen ist. Des Weiteren kann sich eine Situation ergeben, dass die Stromversorgung nur aufgrund des Fehlöffnens der Kuppelschalter zwischen EB-Schienen und Notstromschienen unterbrochen wird. In diesem Fall werden die Eigenbedarfsverbraucher über die EB-Anlage weiterversorgt, und die Notstromschienen über die Notstromdieselaggregate versorgt. Die genannten Fälle sind dann gesondert zu untersuchen.

Ein EB-Schiene (Fehlerbaum BBA; BBB; BBC; BBD) fällt aus wenn

- die Sammelschiene selbst ausfällt,
- die Einspeisung sowohl aus dem Hauptnetz/Generator und dem Reservenetz unterbrochen ist,
- die Einspeisung aus dem Reservenetz fälschlich geschlossen wird und die Einspeisung aus dem Hauptnetz aber nicht ausgefallen ist (NOT-Verknüpfung).

In letzterem Fall ist aufgrund der fehlenden Synchronisierung zwischen Hauptnetz und Reservenetz von einem Kurzschluss auszugehen, der beide Einspeiseschalter zu den Netzen öffnen lässt. Die NOT-Verknüpfung wurde implementiert, weil hohe Nichtverfügbarkeitswerte der Einspeisung aus Hauptnetz bzw. Generator nicht ausgeschlossen werden können.

Die Stromversorgungen der einzelnen EB-Schienen fallen aus (Fehlerbäume HN\_BBA; HN\_BBB; HN\_BBC; HN\_BBD), wenn

- die 10-kV-Einspeisung aus dem jeweiligen EB-Trafo fälschlich geöffnet wird,
- der jeweilige EB-Trafo BT01 bzw. BT02 ausfällt oder
- die Spannungsversorgung aus dem Hauptnetz bzw. Generator ausfällt.

Die Spannungsversorgung aus dem Hauptnetz bzw. Generator fallen aus (Fehlerbaum HN\_GEN), wenn die Einspeisung aus dem Generator und aus dem Hauptnetz unterbrochen wird.

Die Energieversorgung aus dem Generator fällt aus, wenn

- der Turbogenerator selbst ausfällt oder aufgrund des Erdbebens unter bestimmten Randbedingungen abgeschaltet (siehe Abschnitt 4.2.1) wird,
- der Generatorschalter fälschlich öffnet oder
- der Erdungsschalter für die Generatoreinspeisung fälschlich schließt.

Die Energieversorgung aus dem Hauptnetz fällt aus, wenn

- beide Maschinentrafos ausfallen,

- der Netzsachalter fälschlich öffnet oder
- einer der Erdungsschalter fälschlich schließt.

Der Ausfall des Hauptnetzes selbst muss ggf. auch unterstellt werden.

Das Reservenetz als Alternative zur Energieversorgung aus dem Hauptnetz bzw. Generator fällt aus (Fehlerbaum RN), wenn

- Der Reservenetztransformator BCT01 selbst ausfällt
- Der Netzleistungsschalter AEA01 fälschlich öffnet oder die Erdungsschalter auf der Oberspannungsseite des Reservenetztransformators fälschlich schließen.

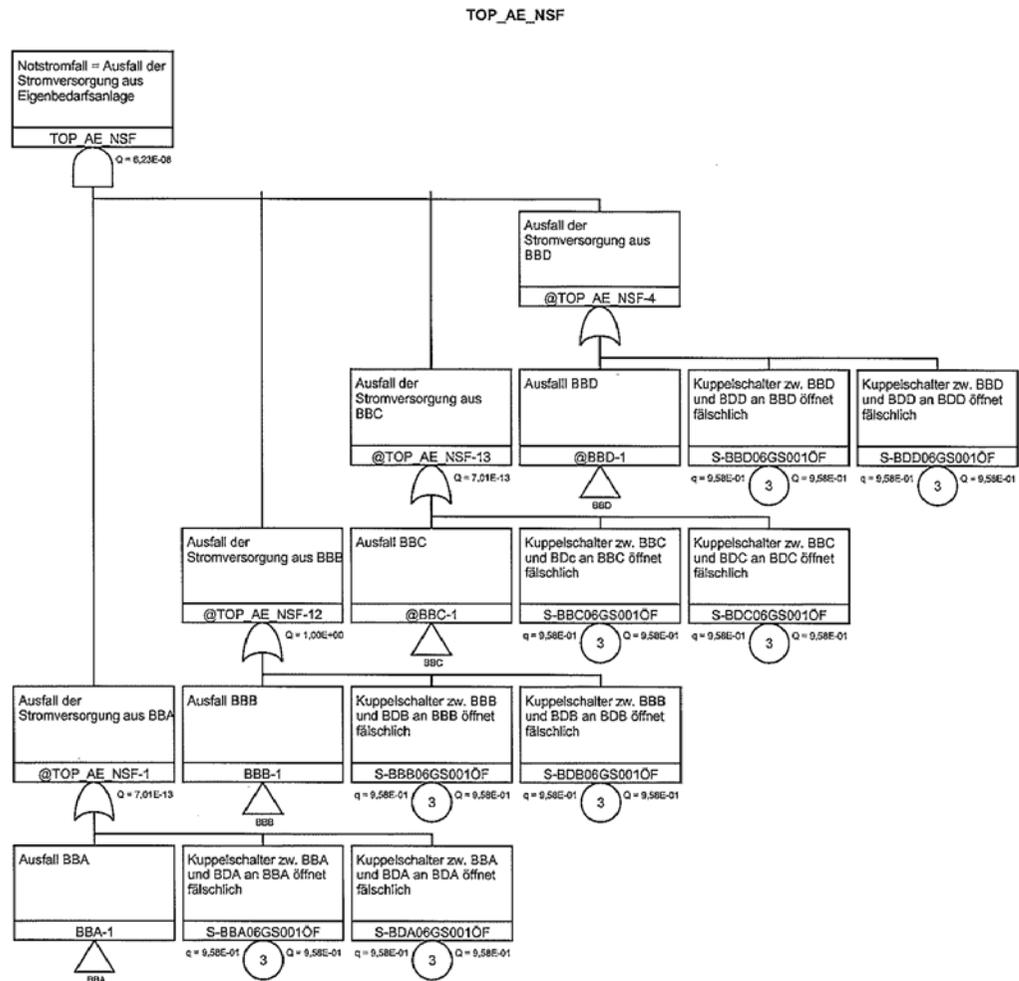
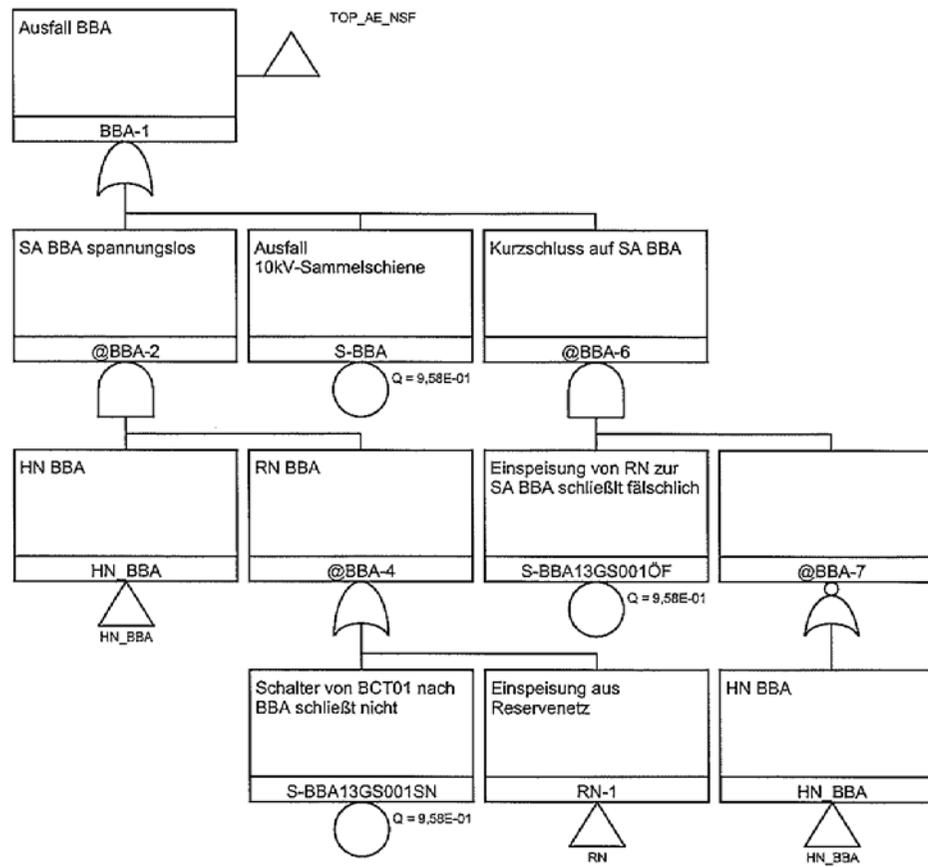
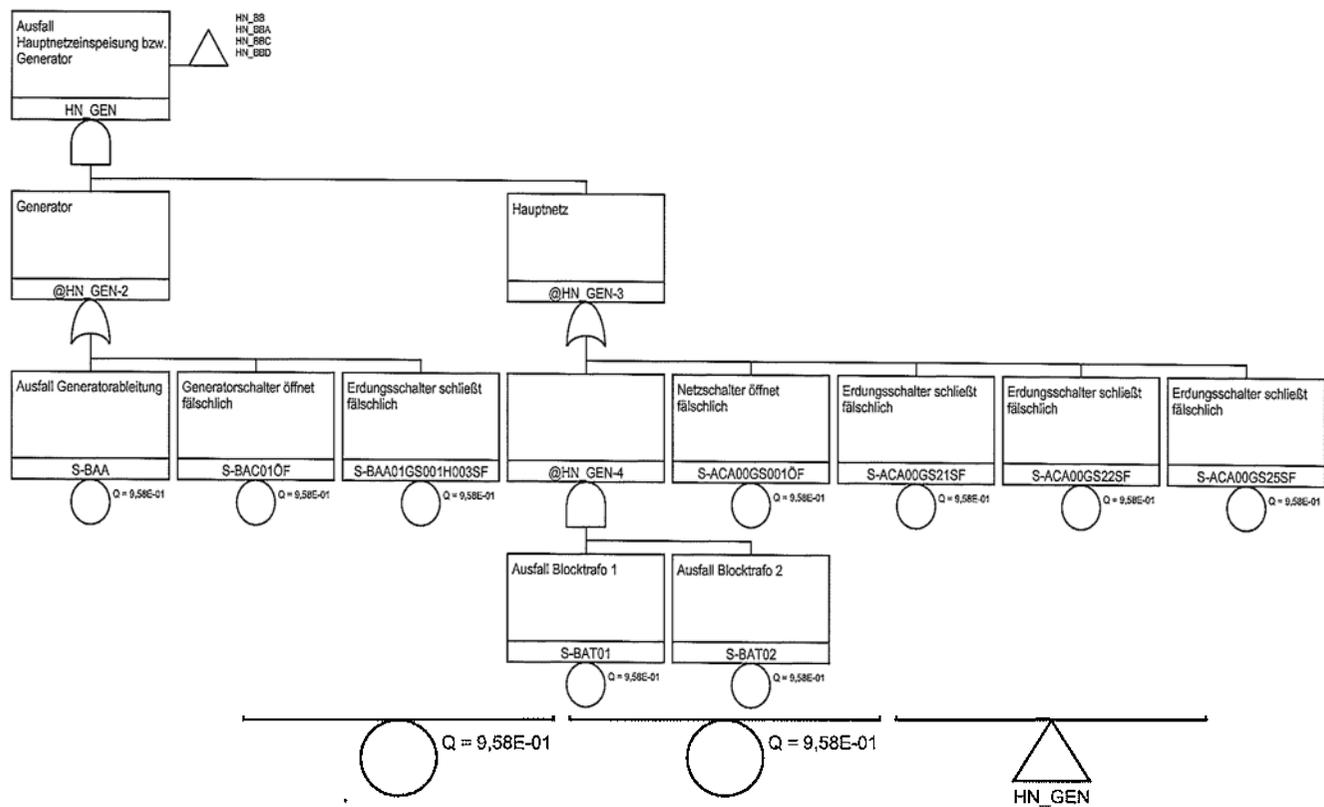


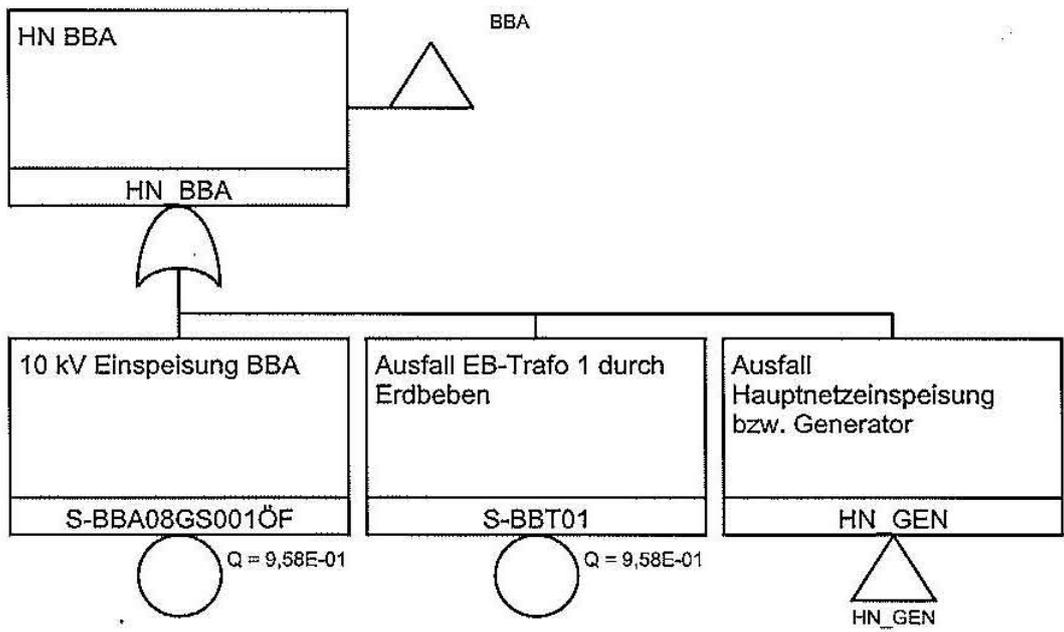
Abb. 4-7 Top-Fehlerbaum für das erdbebeninduzierte Ereignis Notstromfall



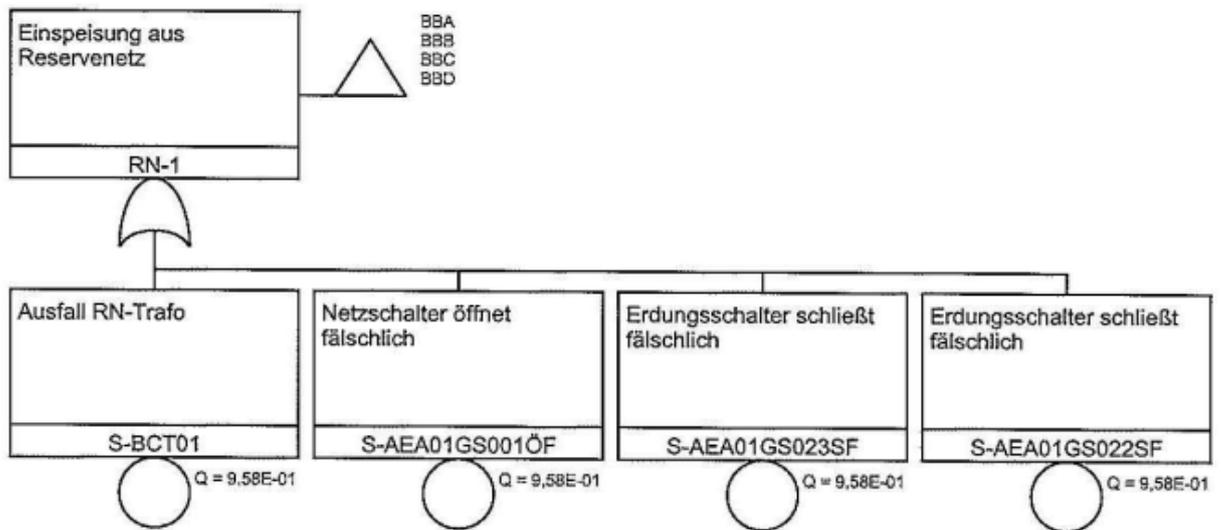
**Abb. 4-8** Teilfehlerbaum für den erdbebeninduzierten Ausfall der Eigenbedarfsschiene BBA



**Abb. 4-9** Teilfehlerbaum für den Ausfall der Einspeisung für BBA aus Hauptnetz bzw. Hauptgenerator



**Abb. 4-10** Ausfall von Hauptanschluss und Generator durch Erdbeben



**Abb. 4-11** Ausfall der Einspeisung aus dem Reservenetz durch Erdbeben

#### **4.2.4 Fehlerbäume zur Berechnung der Nichtverfügbarkeiten der Systemfunktionen zur Beherrschung des Notstromfalls bei einem Erdbeben**

Die Fehlerbäume, die den Ausfall der Systemfunktionen bei Leistungsbetrieb beschreiben, wurden aus der PSA für den Leistungsbetrieb entnommen und modifiziert. Es wurden alle vorhandenen Fehlerbäume für den Leistungsbetrieb bearbeitet. Eine Selektion der Fehlerbäume, die nur den Ausfall der benötigten Systemfunktionen für den Notstromfall bei Leistungsbetrieb beschreiben, wurde nicht durchgeführt, weil dies in Anbetracht der zahlreich vorhandenen Verknüpfungen zu aufwändig gewesen wäre.

Die vorhandenen Fehlerbäume wurden dahingehend modifiziert, dass zunächst jedes Basisereignis für verfahrens- und elektrotechnische Komponenten durch ein ODER-Gatter im Fehlerbaum ersetzt wurde. In dieses ODER-Gatter geht dann das ersetzte Basisereignis ein, das nach wie vor den Zufallsausfall beschreibt, sowie ein Basisereignis, das den Ausfall der Komponente durch Erdbeben beschreibt. Diese werden einheitlich mit dem Präfix S- gekennzeichnet. Die Struktur dieser Modifikationen ergibt sich somit entsprechend Abb. 3-3 wobei allerdings noch keine Basisereignisse für seismische Abhängigkeiten im Fehlerbaum implementiert wurden. Diese werden bei Bedarf in einem weiteren Modifikationsschritt berücksichtigt. Bei den Basisereignissen, die leittechnische Ausfälle beschreiben, wurde nicht in allen Fällen in dieser Weise vorgegangen. Leittechnische Komponenten, die einem Schrank zugeordnet werden können, wurden übergreifend durch den erdbebenbedingten Ausfall des Schrankes ersetzt. Die jeweiligen Schrankausfälle wurden in den Fehlerbäumen an geeigneter Stelle mit ODER-Gattern eingebunden.

In diesem Beispiel wurden keine Abhängigkeiten modelliert (siehe dazu aber das Beispiel 1 in Abschnitt. 4.1). In einem Folgevorhaben /GRS 03/ ist geplant, die Abhängigkeiten auf der Grundlage des in /TUE 10/ entwickelten Auswahlverfahrens anlagen-spezifisch zu finden und anschließend entsprechend dem festgelegten Vorgehen (vgl. Abschnitt. 3.1) mit dem Abhängigkeitsmodell in die Systemfehlerbäume einzubinden.

#### **4.2.5 Bereitstellung von Daten zur Quantifizierung des seismischen Anlagenmodells**

Nachfolgend wird auf die Bereitstellung von Daten zur Quantifizierung des seismischen Anlagenmodells (hier: zur Quantifizierung der seismisch induzierten KSH durch einen Notstromfall im Referenzkraftwerk) eingegangen.

Im vorliegenden Projekt konnte nicht auf Probleme der Unsicherheitsschätzung eingegangen werden. Weiterhin wurde zwar ein allgemeines Vorgehen zur Behandlung von Abhängigkeiten im seismischen Anlagenmodell abgeleitet, aber die Überprüfung der Auswirkungen verschiedener Ansätze mit anlagenspezifischen Daten konnte im vorliegenden Vorhaben nicht geleistet werden.

Bei der nachfolgenden Umsetzung der Berechnungsvorschrift (siehe Kap. 3.3.5) für einen konkreten Fall des Referenzkraftwerks werden hauptsächlich die entsprechenden Datenbanken und Formulare bereitgestellt. Die verwendeten Daten wurden aus einem generischen Datenpool zufällig ausgewählt und stehen nicht im Zusammenhang mit dem Referenzkraftwerk.

##### **4.2.5.1 Bereitstellung der seismischen Gefährungsdaten**

Es ist zum einen festzulegen, für welche Intensitäten das seismische Anlagenmodell berechnet werden soll. Zum anderen wird für jede dieser festgelegten Intensitäten die Überschreitenshäufigkeit gebraucht.

In Kap. 7 werden zwei Möglichkeiten der Stützstellenwahl  $\{INT_0, INT_1, \dots, INT_n\}$  empfohlen. Die erste Möglichkeit (Fall 1) geht von Intervallen auf der Intensitätsskala aus, die zweite (Fall 2) von Intervallen auf der Skala der Überschreitenswahrscheinlichkeiten.

– Fall 1: Intervalle auf der Intensitätsskala

Für das Bemessungserdbeben des Referenzkraftwerks wird 0,17 g maximale Freifeldbeschleunigung angenommen. Nutzt man die Beziehung von Murphy und O'Brien /MUR 77/ entspricht 0,17 g einer Intensität von 7,9.

Es ergeben sich folgende Stützstellen,  $n = 9$ :

$\{0; 5,0; 5,5; 6,0; 6,5; 7,0; 7,5; 8,0; 8,5; 9,0\}$  – Intensitäten oder entsprechend

$\{0; 0,032; 0,044; 0,057; 0,076; 0,102; 0,136; 0,181; 0,242; 0,322\}$  – maximale Freifeldbeschleunigungen.

- Fall 2: Intervalle von Überschreitenswahrscheinlichkeiten  
 Als Stützstellen werden die Intensitäten genutzt, die vorgegebenen Überschreitenswahrscheinlichkeiten entsprechen (hier die Werte aus Abb. 3-10).  
 Es wird von den Überschreitenswahrscheinlichkeiten  $\{1 \text{ E-1}, 1 \text{ E-2}, \dots, 1 \text{ E-8}\}$  ausgegangen.  
 Es ergeben sich folgende Stützstellen,  $n = 8$ :  
 $\{0; 4,0; 5,2; 6,0; 6,6; 7,0; 7,3; 7,55; 8,0\}$  – Intensitäten oder entsprechend  
 $\{0; 0,018; 0,036; 0,057; 0,082; 0,102; 0,121; 0,140; 0,181\}$  – maximale Freifeldbeschleunigungen.

Den festgelegten Intensitäten (bzw. maximalen Freifeldbeschleunigungen)  $INT_i$  können die Überschreitenshäufigkeiten  $H_i$  gemäß Abb. 3-10 zugeordnet werden. Die Überschreitenshäufigkeiten sind Abb. 3-10 entnommen.

Für die nachfolgenden Beispielrechnungen werden die in Tab. 4-9 rot gekennzeichneten seismischen Intensitäten herangezogen. Für  $INT_8$  wird eine Überschreitenshäufigkeit von  $5,0 \text{ E-09}$  und für  $INT_9$  von  $1,0 \text{ E-09}$  pro Jahr festgelegt.

**Tab. 4-9** Berechnungsintervalle und zugehörige Überschreitenshäufigkeiten

	$INT_1$	$INT_2$	$INT_3$	$INT_4$	$INT_5$	$INT_6$	$INT_7$	$INT_8$	$INT_9$
Fall1	0,032	0,044	<b>0,057</b>	0,076	<b>0,102</b>	0,136	<b>0,181</b>	<b>0,242</b>	<b>0,322</b>
Fall2	0,018	0,036	0,057	0,082	0,102	0,121	0,140	0,181	---
	$H(INT_1)$	$H(INT_2)$	$H(INT_3)$	$H(INT_4)$	$H(INT_5)$	$H(INT_6)$	$H(INT_7)$	$H(INT_8)$	$H(INT_9)$
Fall1	$1,6\text{E-}2$	$4,4\text{E-}3$	<b><math>1,0\text{E-}3</math></b>	$1,5\text{E-}4$	<b><math>1,0\text{E-}5</math></b>	$1,5\text{E-}7$	<b><math>1,0\text{E-}8</math></b>	$< 1,0\text{E-}8$	$\ll 1,0\text{E-}8$
Fall2	$1,0\text{E-}1$	$1,0\text{E-}2$	$1,0\text{E-}3$	$1,0\text{E-}4$	$1,0\text{E-}5$	$1,0\text{E-}6$	$1,0\text{E-}7$	$1,0\text{E-}8$	---

#### 4.2.5.2 Bereitstellung der seismischen Basisereignisse im Anlagenmodell

Es wird angenommen, dass das seismische Anlagenmodell mit der Hilfe von RiskSpectrum<sup>®</sup> aufgestellt ist. Sämtliche Basisereignisse sind so beschrieben, dass unterschieden werden kann, ob es sich um Zufallsausfälle oder um seismisch induzierte Ausfälle handelt. Es wird eine Liste der seismischen Basisereignisse erzeugt, z.B. mit den Export-Möglichkeiten von RiskSpectrum<sup>®</sup>.

Im vorliegenden Beispiel beschreiben alle Basisereignisse, deren Bezeichnung mit „S-“ beginnt, seismisch induzierte Ausfälle, in Tab. 4-10 gibt es einen Auszug. Von 2065 Basisereignissen sind 525 seismisch induziert.

**Tab. 4-10** Liste der seismischen Basisereignisse (Auszug)

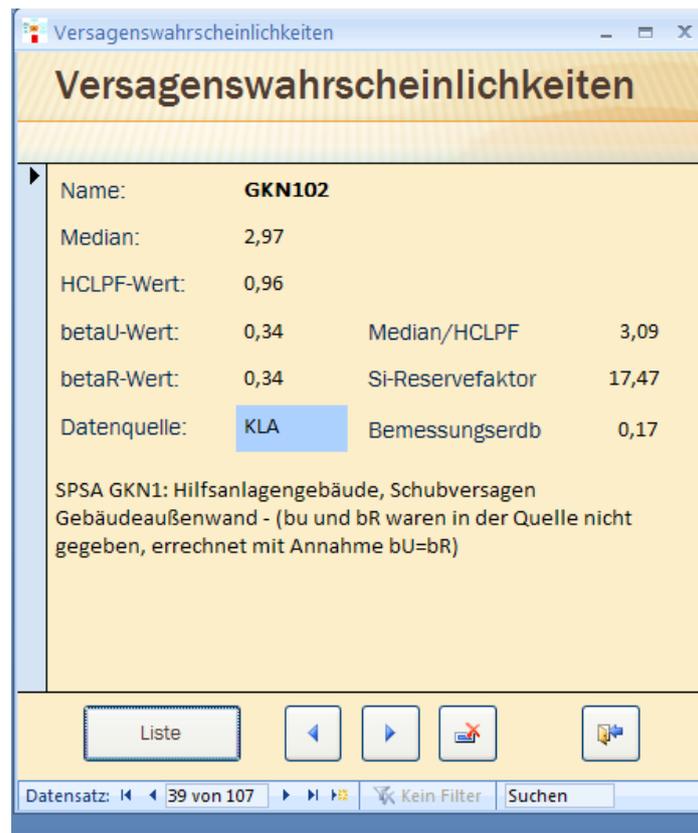
S-XKA50	Notstromaggregat 50
S-XKA50AG001	Ausfall Generatorschalter NSPNSG 1
S-XKA50-P	Notstromaggregat 50 Pumpe
S-XKA60	Notstromaggregat 60
S-XKA60AG001	Ausfall Generatorschalter NSPNSG 2
S-XKA60-P	Notstromaggregat 60 Pumpe
S-XKA70	Notstromaggregat 70
S-XKA70AG001	Ausfall Generatorschalter NSPNSG 3
S-XKA70-P	Notstromaggregat 60 Pumpe
S-XKA80	Notstromaggregat 80

#### 4.2.5.3 Bereitstellung von Fragilities

Zur unterstützenden Durchführung einer SPSA wurde eine MS ACCESS<sup>®</sup>-Datenbank <DB SPSA> entwickelt /TUE 10/. Diese Datenbank wurde aufgebaut, um im Verlauf der Erarbeitung einer SPSA die erforderlichen Daten aufzunehmen, aufzubereiten und in den verschiedenen Phasen der Projektbearbeitung geeignet zur Verfügung zu stellen. Diese Datenbank enthält auch eine Tabelle <tblVerswahr> zur Aufnahme, Speicherung und Recherche von Versagenswahrscheinlichkeiten (siehe Abb. 4-12).

In diese Tabelle werden sowohl generische als auch anlagenspezifische Versagenswahrscheinlichkeiten eingetragen. Eine VW-Kurve ist eindeutig festgelegt durch Angabe des HCLPF- bzw. des Medians und der Unsicherheiten  $\beta_U$  und  $\beta_R$  (siehe Kap. 3.3.1.1). In der Fachliteratur sind oft nicht alle Werte angegeben, deshalb ist folgendes festgelegt worden:

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



**Abb. 4-12** Datenbankformular zur Anzeige von Versagenswahrscheinlichkeiten

Jede Versagenswahrscheinlichkeit erhält einen eindeutigen Namen (z.B. GKN102 in Abb. 4-12). Dieser Name ist vom Nutzer festzulegen.

**Tab. 4-11:** Verwendete Versagenskurven in Beispiel 2 ( $\beta_U = 0,3$ ;  $\beta_R = 0,2$ )

Name	Median [g]	HCLPF [g]
HCLPFL	0,73	0,32
HCLPFM	0,23	0,10
HCLPFH	0,13	0,06

Es sollte weiterhin die Quelle der Daten angegeben sein. Durch Doppelklick auf das entsprechende Feld (in Abb. 4-12 auf das blau markierte Feld) erhält man nähere Informationen.

Im Beispiel werden zu Testzwecken drei Versagenskurven mit den Namen HCLPFL, HCLPFM, HCLPFH genutzt.

#### 4.2.5.4 Zuordnung von Fragilities zu den seismischen Basisereignissen

Im Auswahlverfahren /TUE 10/ wurde ermittelt, für welche seismisch induzierten Basisereignisse generische Versagenskurven zu verwenden sind. Für die anderen BSK sind anlagenspezifische Ableitungen der Versagenskurven durchzuführen. Es wird nun angenommen, dass alle benötigten Versagenskurven bereit stehen (siehe Kap. 4.2.5.3). Es ist nun jedem seismischen Basisereignis der Name der entsprechenden Versagenskurve zuzuordnen.

**Tab. 4-12** Zuordnung von Fragilities zu den seismisch induzierten Basisereignissen (Auszug)

S-XKA50	Notstromaggregat 50	HCLPFL
S-XKA50AG001	Ausfall Generatorschalter NSPNSG 1	HCLPFM
S-XKA50-P	Notstromaggregat 50 Pumpe	HCLPFH
S-XKA60	Notstromaggregat 60	HCLPFL
S-XKA60AG001	Ausfall Generatorschalter NSPNSG 2	HCLPFM
S-XKA60-P	Notstromaggregat 60 Pumpe	HCLPFH
S-XKA70	Notstromaggregat 70	HCLPFL
S-XKA70AG001	Ausfall Generatorschalter NSPNSG 3	HCLPFM
S-XKA70-P	Notstromaggregat 60 Pumpe	HCLPFH
S-XKA80	Notstromaggregat 80	HCLPFL
S-XKA80AG001	Ausfall Generatorschalter NSPNSG 4	HCLPFM
S-XKA80-P	Notstromaggregat 60 Pumpe	HCLPFH

#### 4.2.5.5 Bereitstellung von Datensätzen zur RiskSpectrum®-Eingabe

Es sind nun alle Größen bekannt, um die Quantifizierung des seismischen Anlagenmodells durchzuführen. Jedem seismischen Basisereignis wurde eine Versagenskurve zugeordnet. Daraus kann jetzt zu jeder gewünschten Intensität (bzw. maximalen Freifeldbeschleunigung) die Versagenswahrscheinlichkeit berechnet werden. Das wird nun in einem Excel-Datenblatt (siehe <seismische Eingabeparameter.xlsx) automatisch erledigt, zu den gewählten Intensitäten siehe Kap. 4.2.5.2.

Nach Abschluss der Prozedur steht nun für jede gewünschte Intensität ein RiskSpectrum®-Eingabedatensatz zur Verfügung. Erste Erfahrungen bei der Quantifizierung sind in Kap. 4.2.5.6 beschrieben.

**Tab. 4-13** Versagenswahrscheinlichkeiten bei verschiedenen Intensitäten (Auszug)

		INT <sub>3</sub>	INT <sub>5</sub>	INT <sub>7</sub>	INT <sub>8</sub>
S-XKA50	HCLPFL	1,11 E-02	2,51 E-01	8,21 E-01	9,58 E-01
S-XKA50AG001	HCLPFM	4,95 E-05	1,13 E-02	2,46 E-01	5,47 E-01
S-XKA50-P	HCLPFH	7,01 E-13	2,25 E-08	5,24 E-05	1,06 E-03
S-XKA60	HCLPFL	1,11 E-02	2,51 E-01	8,21 E-01	9,58 E-01
S-XKA60AG001	HCLPFM	4,95 E-05	1,13 E-02	2,46 E-01	5,47 E-01
S-XKA60-P	HCLPFH	7,01 E-13	2,25 E-08	5,24 E-05	1,06 E-03
S-XKA70	HCLPFL	1,11 E-02	2,51 E-01	8,21 E-01	9,58 E-01
S-XKA70AG001	HCLPFM	4,95 E-05	1,13 E-02	2,46 E-01	5,47 E-01
S-XKA70-P	HCLPFH	7,01 E-13	2,25 E-08	5,24 E-05	1,06 E-03
S-XKA80	HCLPFL	1,11 E-02	2,51 E-01	8,21 E-01	9,58 E-01
S-XKA80AG001	HCLPFM	4,95 E-05	1,13 E-02	2,46 E-01	5,47 E-01
S-XKA80-P	HCLPFH	7,01 E-13	2,25 E-08	5,24 E-05	1,06 E-03

#### 4.2.5.6 Quantifizierung

Zu Testzwecken werden zur Quantifizierung bezüglich der seismischen Ausfälle zwei Datensätze erzeugt.

Im ersten Fall (Fall 1) wird davon ausgegangen, dass sämtliche seismische Basisereignisse der Fragility-Kurve HCLPFL genügen. Im zweiten Fall (Fall 2) wird angenommen, dass alle seismischen Basisereignisse entsprechend HCLPFH ausfallen.

Für beide Fälle wird mit den in Tab. 4-9 festgelegten 5 Intensitäten gerechnet. Dort sind auch die entsprechenden Überschreitenshäufigkeiten verzeichnet.

Es wird hier noch einmal darauf hingewiesen, dass im Anlagenmodell noch keine Abhängigkeiten berücksichtigt sind.

**Tab. 4-14** Fall 1 - Ergebnisse

Überschreitenshäufigkeit $H_i$ [1/a]	Differenzen $\Delta_i$	Bedingte Kernschadenswahrscheinlichkeit $KSW_i$	untere	Obere
			Abschätzung	
$H_0 = 1$	-----	$KSW_0$	$H_n \times KSW_n$	$H_0$
$H_1 = 1 \text{ E-}03$	$\Delta_1 = 9,99 \text{ E-}01$	$KSW_1$	$\Delta_1 \times KSW_0$	$\Delta_1 \times KSW_1$
$H_2 = 1 \text{ E-}05$	$\Delta_2 = 9,90 \text{ E-}04$	$KSW_2$	$\Delta_2 \times KSW_1$	$\Delta_2 \times KSW_2$
$H_3 = 1 \text{ E-}08$	$\Delta_3 = 9,99 \text{ E-}06$	...	...	...

$H_4 = 5 \text{ E-}09$	$\Delta_4 = 5 \text{ E-}09$	$KSW_{n-1}$	$\Delta_{n-1} \times KSW_{n-2}$	$\Delta_{n-1} \times KSW_{n-1}$
$H_5 = 1 \text{ E-}09$	$\Delta_5 = 4 \text{ E-}09$	$KSW_n$	$\Delta_n \times KSW_{n-1}$	$\Delta_n \times KSW_n$
			$\Sigma_{\text{untere}}$	$\Sigma_{\text{obere}}$

**Tab. 4-15** Fall 2 - Ergebnisse

Über- schreitens- häufigkeit $H_i$ [1/a]	Differenzen $\Delta_i$	Bedingte Kernschadens- wahrscheinlich- keit $KSW_i$	untere	Obere
			Abschätzung	
$H_0 = 1$	-----	$KSW_0$	$H_n \times KSW_n$	$H_0$
$H_1 = 1 \text{ E-}03$	$\Delta_1 = 9,99 \text{ E-}01$	$KSW_1$	$\Delta_1 \times KSW_0$	$\Delta_1 \times KSW_1$
$H_2 = 1 \text{ E-}05$	$\Delta_2 = 9,9 \text{ E-}04$	$KSW_2$	$\Delta_2 \times KSW_1$	$\Delta_2 \times KSW_2$
$H_3 = 1 \text{ E-}07$	$\Delta_3 = 9,9 \text{ E-}06$	...	...	...
$H_4 = 1 \text{ E-}08$	$\Delta_4 = 9 \text{ E-} 8$	$KSW_{n-1}$	$\Delta_n \times KSW_{n-1}$	$\Delta_n \times KSW_n$
			$\Sigma_{\text{untere}}$	$\Sigma_{\text{obere}}$

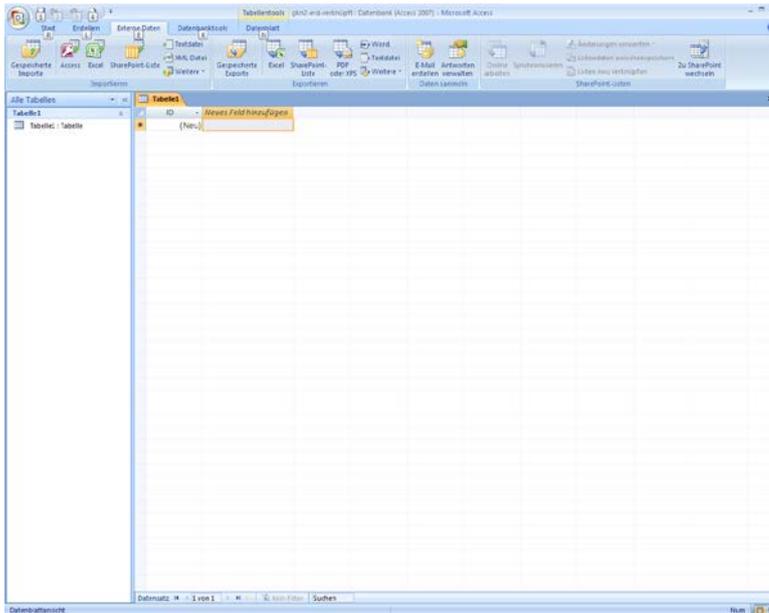
#### 4.2.6 Einlesen der Fragilities mit Hilfe von MS ACCESS® in das RiskSpectrum®-Projekt

Im vorliegenden Kap. wird die Vorgehensweise zur Aktualisierung der Zuverlässigkeitskenngrößen in einem bestehenden RiskSpectrum®-Projekt durch Eintragen der aktuellen Werte in MS ACCESS®- oder MS EXCEL®-Tabellen beschrieben. Bei umfangreichen und komplexen Datenänderungen erleichtert die Eingabe der Werte in MS ACCESS® bzw. MS EXCEL® die Aktualisierung. Die Daten lassen sich außerdem anhand der MS ACCESS- bzw. MS EXCEL®-Tabellen leichter überprüfen. Die Aktualisierung kann in einer einzigen MS ACCESS®- bzw. MS EXCEL®-Datei (Änderungstabelle) erfolgen.

Das bestehende RiskSpectrum®-Projekt <\*.rsd> kann unter MS ACCESS® im MS ACCESS®-Format als Datenbank (.accdb) geöffnet werden, allerdings nicht gleichzeitig auch im RiskSpectrum®-Format. Jede Änderung in der MS ACCESS®-Datei <\*.accdb> bewirkt automatisch auch eine entsprechende Änderung im rsd-Format. Dabei ist zu beachten, dass Änderungen in MS ACCESS® beim Schließen automatisch gespeichert werden (ohne Aufforderung zum Speichern!).

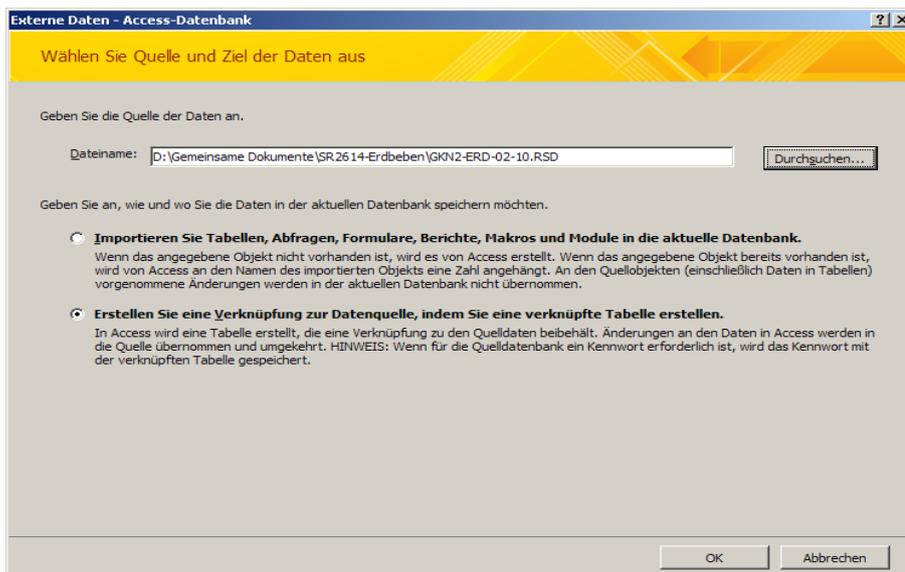
Die mit dem zu aktualisierenden RiskSpectrum-Projekt <\*.rsd> verknüpfte MS ACCESS®-Datenbank kann in MS ACCESS 2007® durch folgende Schritte erzeugt werden:

- Unter Datei/neu *Leere Datenbank* öffnen
- Ordner (zweckmäßigerweise Ordner, in dem das zu verknüpfende RiskSpectrum-Projekt <\*.rsd> steht) und Namen (z.B. <GKN2-ERD-verknüpft.accdb>) der leeren Datenbank angeben und *erstellen* anklicken. Es ergibt sich das Bild in Abb. 4-13:



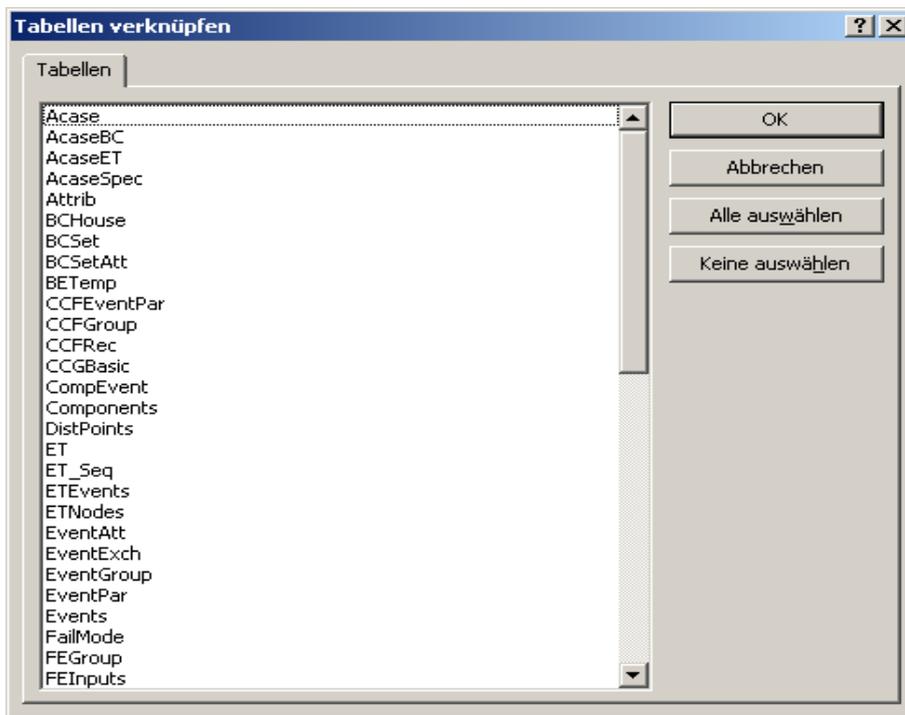
**Abb. 4-13:** Erzeugung der MS ACCESS®-Datenbank eines RiskSpectrum®-Projekts (Schritt 1)

- In der leeren Datenbank unter *Externe Daten* und *ACCESS* die zu verknüpfenden Tabellen angeben:
- Im Fenster *Externe Daten-Access-Datenbank* unter *Dateiname <\*.rsd>* die *rsd*-Datei suchen und verknüpfen (Abb. 4-14):



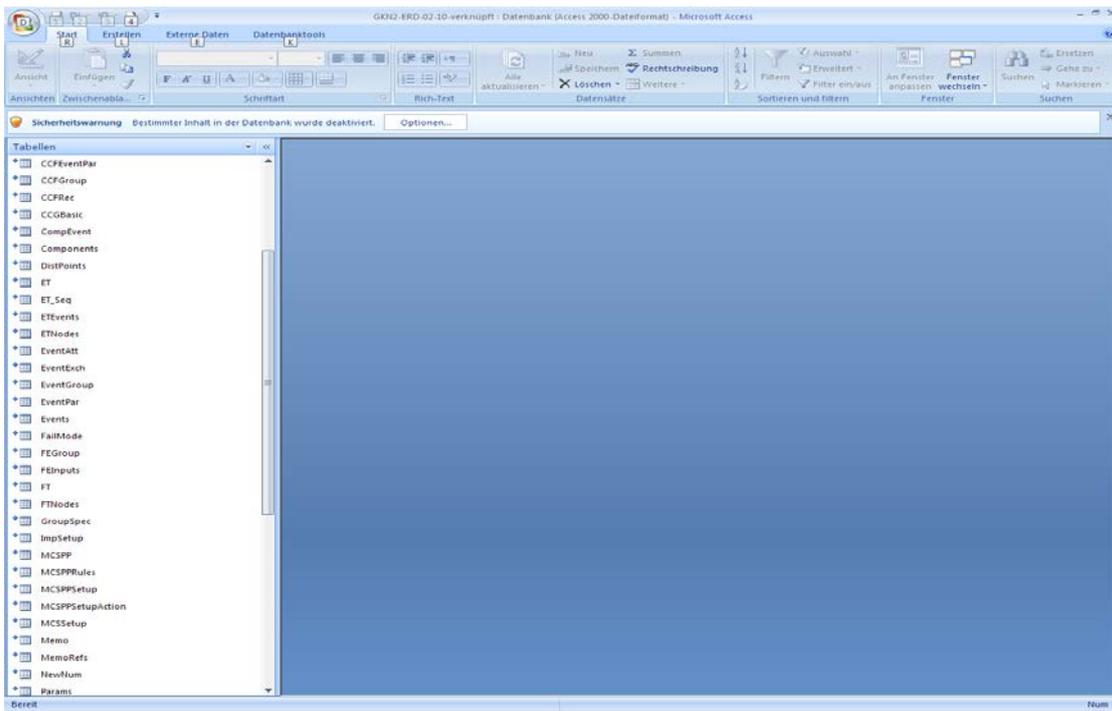
**Abb. 4-14:** Erzeugung der MS ACCESS®-Datenbank eines RiskSpectrum®-Projekts (Schritt 2)

- Im Fenster *Tabellen verknüpfen* die Schaltfläche *Alle auswählen* anklicken (Abb. 4-15)



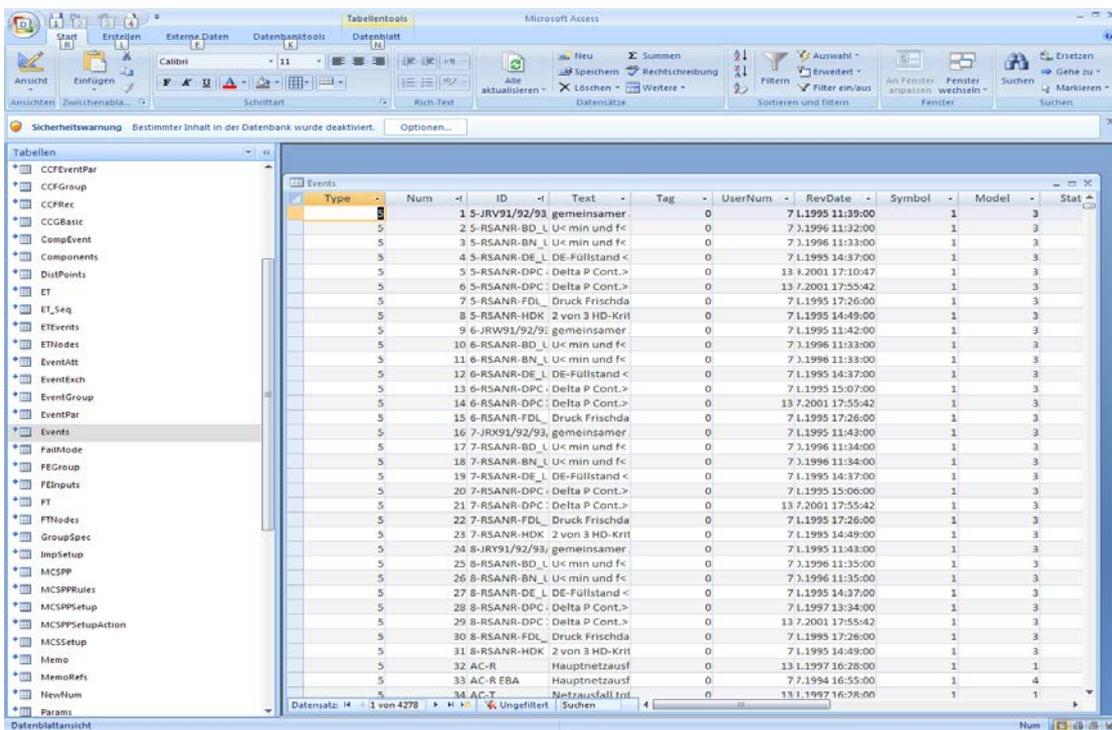
**Abb. 4-15:** Erzeugung der MS ACCESS®-Datenbank eines RiskSpectrum®-Projekts (Schritt 3)

- Nach *OK* werden die Links zu allen von RiskSpectrum® zur Verfügung gestellten Tabellen in die Datenbank aufgenommen. Die Tabellen sind in der linken Spalte aufgelistet (Abb. 4-16).



**Abb. 4-16:** Erzeugung der MS ACCESS®-Datenbank eines RiskSpectrum®-Projekts (Schritt 4)

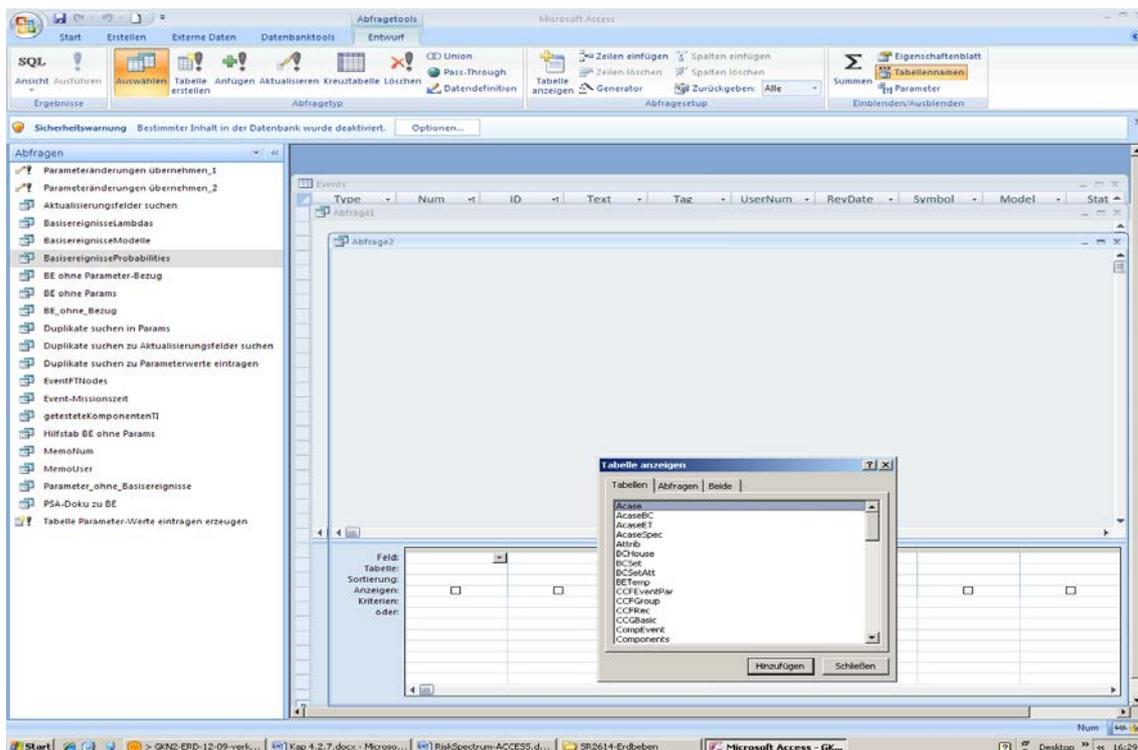
Nach Anklicken einer Tabelle wird die entsprechende RiskSpectrum®-Tabelle geöffnet.



**Abb. 4-17:** Erzeugung der MS ACCESS®-Datenbank eines RiskSpectrum®-Projekts (Schritt 5)

Es können in jeder der Tabellen in der verknüpften *accdb*-Datei Daten editiert werden. Allerdings enthalten die Tabellen nicht immer alle für eine Datenänderung erforderliche Felder (Spalten). Die Daten müssten also in unterschiedlichen Tabellen eingegeben werden, wobei die Beziehungen zwischen den Tabellenfeldern zu berücksichtigen wären. Es werden deshalb entsprechende Abfragen und Tabellen in der verknüpften *accdb*-Datei erstellt, die eine Daten-Aktualisierung in einer einzigen Tabelle ermöglichen.

Über *Erstellen* und *Andere* wird die Schaltfläche *Abfrageentwurf* geöffnet.



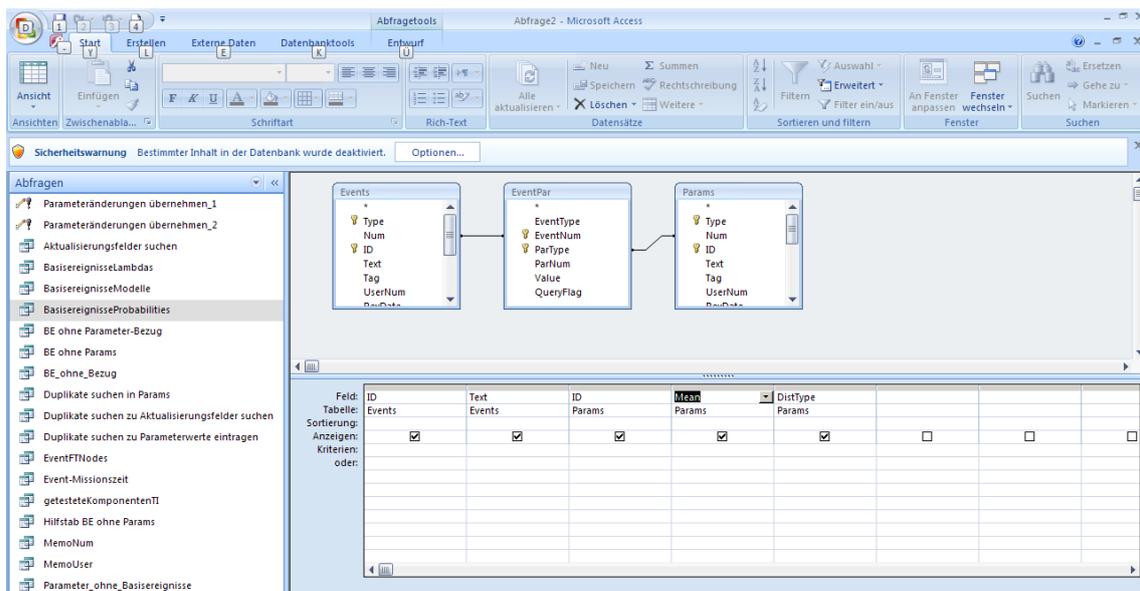
**Abb. 4-18:** Erzeugung der MS ACCESS<sup>®</sup>-Datenbank eines RiskSpectrum<sup>®</sup>-Projekts (Schritt 6)

Aus dem Schaltfeld *Tabelle anzeigen* können die für die Abfrage zu verknüpfenden Tabellen ausgewählt werden. Im vorliegenden Beispiel wären das die Tabellen *Events*, *Eventparm* und *Params*. Im oberen Teil der Abfragetabelle werden die Beziehungen der Tabellen untereinander festgelegt. Über die Tabelle *EventParm* werden die zugehörigen Nummern der Events mit den zugehörigen Nummern der Parameter verknüpft. Im unteren Teil der Abfrage werden die angezeigten Spalten der Abfragetabelle definiert. Im vorliegenden Beispiel wären das:

- Basisereignis ID,

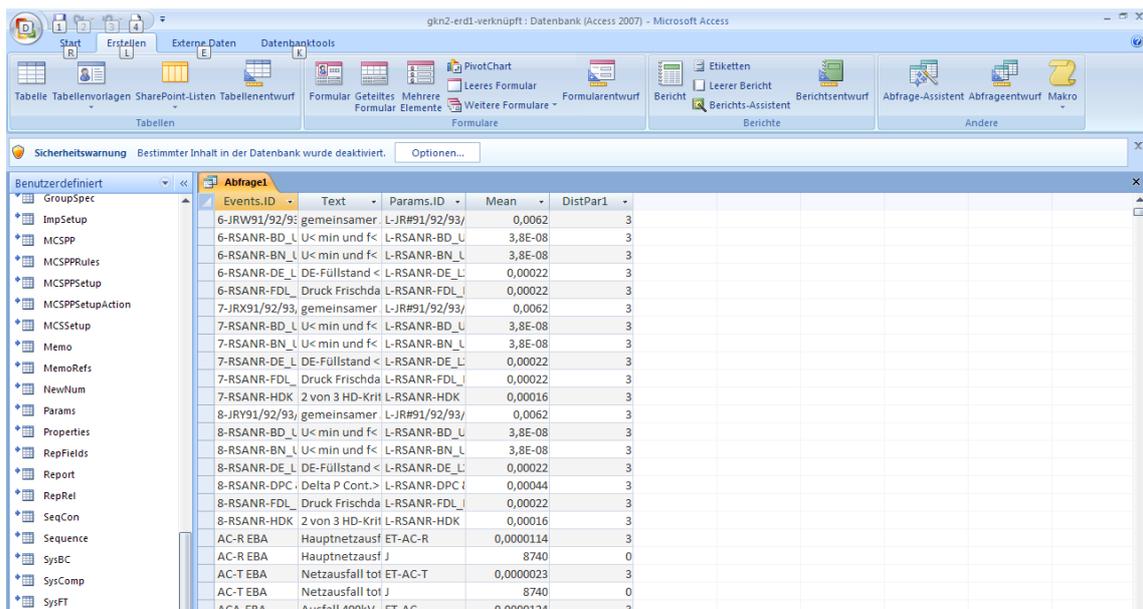
- Basisereignis-Text,
- Parameter ID,
- Erwartungswert und
- Verteilung.

Unten stehendes Bild zeigt die Abfragetabelle im Entwurfsmodus.



**Abb. 4-19:** Erzeugung der MS ACCESS<sup>®</sup>-Datenbank eines RiskSpectrum<sup>®</sup>-Projekts (Schritt 7)

Es ergibt sich in der Tabellenansicht das folgende Bild (Abb. 4-20).



**Abb. 4-20:** Erzeugung der MS ACCESS®-Datenbank eines RiskSpectrum®-Projekts (Schritt 8)

Da die Dateneingabe in MS EXCEL® deutlich komfortabler ist als in MS ACCESS® wird die Abfragetabelle nach MS EXCEL® exportiert und dort bearbeitet. Hierzu wird unter *externe Daten* und *exportieren* die Schaltfläche *EXCEL* angeklickt. In MS EXCEL® werden die Daten modifiziert und erneut in MS ACCESS® importiert.

Es hat sich als praktikabel erwiesen, für jede angenommene Intensität ein eigenes RiskSpectrum Projekt zu erzeugen und separat auszuwerten.

#### 4.2.7 Quantifizierung der Kernschadenshäufigkeit mit RiskSpectrum®

Für den seismisch bedingten Notstromfall (siehe den Ereignisablauf in Abb. 4-6) werden sowohl die Häufigkeiten der einzelnen Pfade als auch die Häufigkeit des Gefährdungszustandes berechnet. Die Berechnungen in diesem Vorhaben haben einzig das Ziel, den gesamten Quantifizierungsprozess durchgängig zu erproben. Die Frage, inwieweit die Parameterwahl (Intensitäten, Fragilities, Abhängigkeiten) Einfluss auf das Ergebnis hat, bleibt einem Folgevorhaben vorbehalten /GRS 03/.

Es wurden insgesamt zehn Beispielfälle gerechnet (1L, 1H bis 5L, 5H):

- Es wurden fünf Intensitäten unterschieden, d. h. es werden für die Intensitäten {6; 7; 8; 8,5; 9} Rechnungen durchgeführt. Diesen Intensitäten werden die in Kap. 4.2.5.1 bestimmten Überschreitenshäufigkeiten zugeordnet (siehe auch Tab. 4-16).
- Es werden 2 stark vereinfachte Fragility-Datensätze - genannt HCLPFL und HCLPFH (weiter unten auch kurz mit L und H bezeichnet) - betrachtet. Bei jedem Fragility-Datensatz wird angenommen, dass jede seismische Komponente in den Fehlerbäumen nach der gleichen Wahrscheinlichkeitsverteilung unabhängig ausfällt. HCLPFL oder auch L bezeichnet ein Verteilungsgesetz mit kleinem HCLPF-Wert; HCLPFH oder auch H ein Verteilungsgesetz mit großem HCLPF-Wert (siehe auch Tab. 4-11). Umso größer der HCLPF-Wert ist, desto kleiner ist die seismische Versagenswahrscheinlichkeit einer Komponente.

Es zeigt sich, dass bei großen seismischen Versagenswahrscheinlichkeiten (hier: Nutzung von HCLPFL) eine Berechnung der Ausfallhäufigkeiten durch das Programm RiskSpectrum<sup>®</sup> nicht möglich ist. Der Grund liegt unseres Erachtens darin, dass der Algorithmus, der das Ende der Berechnung einleitet, für große Wahrscheinlichkeiten (im Beispiel > 0,25) in Verbindung mit einer hohen Anzahl an minimalen Schnittmengen, deren Teilschnittmengen den Wert 1 ergeben, nicht geeignet ist. Diese Aussage gilt für jene Rechnungen, bei denen die Eintrittshäufigkeit des Erdbebens zu 1 gesetzt wird. Mit Änderungen von einigen Grundwerten in der RiskSpectrum<sup>®</sup> zugehörigen Parameter-Datei (RSApps.ini) ist es zumindest möglich, die meisten Rechenfälle mit einem brauchbaren Ergebnis, also mit Ausweisung einer Häufigkeit und minimalen Schnittmengen, zu beenden. Für Rechenfälle, bei denen die erdbebenbedingten Ausfallwahrscheinlichkeiten nahe 1 liegen, ist eine Berechnung z. Z. mit RiskSpectrum<sup>®</sup> nicht möglich.

Als Alternative bietet sich eine Berechnung auf simulativer Basis an, was anhand einiger Testläufe durchgeführt wurde. Es wurde dazu das Programm CRAVEX verwendet.

In Tab. 4-16 sind die Ergebnisse für die zehn Rechenfälle angezeigt, dabei steht in:

- Spalte 1 die Bezeichnung des Rechenfalls (1L bis 5L und 1H bis 5H);
- Spalte 2 die angenommene Eintrittshäufigkeit  $[1/a]$  des Erdbebens;
- Spalte 3 die bedingte Wahrscheinlichkeit, dass aufgrund des Erdbebens ein

Notstromfall entsteht;

Spalte 4 die Häufigkeit eines Gefährdungszustands;

Spalte 5 der Wahrscheinlichkeitswerts des erdbebenbedingten Ausfalls einer Komponente (siehe auch Tab. 4-13). Diese Angabe macht hier natürlich nur Sinn, weil angenommen wurde, dass sämtliche seismisch relevanten Komponenten dieselbe Ausfallwahrscheinlichkeit haben.

Spalte 6 Anmerkungen

**Tab. 4-16:** Ergebnisse für die untersuchten Erdbebenfälle in Abhängigkeit von verschiedenen Intensitäten

Fall	2	3	4	5	Anmerkungen
1H	1,00E-03	1,80 E-35	n. a.	7,01 E-13	kein Programmende
1L		7,50 E-05	4,30 E-11	1,11 E-02	
2H	1,00E-05	5,92 E-22	2,90 E-31	2,25 E-08	
2L		8,94 E-01	1,00 E-5	2,51 E-01	
3H	1,00E-08	7,00 E-12	5,60 E-25	5,24 E-05	
3L		1,00	1,00 E-8	8,21 E-01	Anzahl der ermittelten Schnittmengen ist 0 ?
4H	5,00E-09	6,22 E-08	2,00 E-20	1,06 E-03	
4L		1,00	5,00 E-09	9,58 E-01	
5H	1,00E-09	7,95 E-05	1,40 E-18	1,13 E-02	
5L		1,00	1,00 E-09	9,94 E-01	

Die Ausfallkombinationen, die die Häufigkeiten der Gefährdungszustände bestimmen, ergeben sich aus:

- den Eintrittshäufigkeiten des Erdbebens,
- den Ausfallkombinationen, die den Übergang von einem Erdbeben zu einem Notstromfall beschreiben und somit die Übergangswahrscheinlichkeiten bestimmen, die in Spalte 3 ausgewiesen sind,
- die Ausfallkombinationen, die zum Ausfall der notwendigen Systemfunktionen beim erdbebenbedingten Notstromfall führen.

Letztere können aus folgenden Gruppen von Ausfallkombinationen bestehen:

- Kombinationen aus erdbebenbedingten Ausfällen und Zufallsausfällen (Einzelausfälle oder GVA),
- Kombinationen aus Zufallsausfällen (Einzelausfälle oder GVA).

Die Ergebnisse zeigen, dass bei erdbebeninduzierten Ausfallwahrscheinlichkeiten, die größer als 0,1 sind, die Häufigkeit des Gefährdungszustandes gleich der Eintrittshäufigkeit des Erdbebens ist. Das heißt, dass die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Notstromfalls und des Ausfalls der zur Beherrschung der erforderlichen Systemfunktionen den Wert 1 hat. RiskSpectrum<sup>®</sup> liefert bei diesen Wertekonstellationen das richtige Endergebnis. Die Aussage in der Ergebnisdatei, dass für das Endergebnis keine minimalen Schnittmengen ausgewertet wurden (Anzahl von MCS = 0), ist jedoch nicht nachvollziehbar. Eine Klärung dieses Umstandes mit dem Softwarehersteller hat ergeben, dass die Parameter 'AbslimitMCS' und 'AbslimitMCSEvents' in der Datei RSApps.ini anzupassen sind. Allerdings erhöhen sich die Rechenzeiten dadurch teilweise erheblich.

Die Ergebnisse lassen auf Basis der Modellierung und der Daten für das Beispiel 2 folgende Interpretationen zu:

- Sind die Erdbebenintensitäten hoch und damit auch die Wahrscheinlichkeiten  $x$  für die erdbebenbedingten Ausfälle sehr groß ( $0,5 < x < 1$ ), so sind die Übergangswahrscheinlichkeiten von einem Erdbeben zu einem nicht beherrschten Notstromfall nahezu bzw. gleich 1. Es empfiehlt sich das Ergebnis auf Basis einer simulativen Rechnung abzusichern.
- Sind die Erdbebenintensitäten klein, so ist schon die Wahrscheinlichkeit, dass eine erdbebenbedingter Notstromfall auftritt aufgrund der niedrigen erdbebenbedingten Ausfallwahrscheinlichkeiten der Komponenten sehr klein, so dass die Ergebnisse daraus praktisch vernachlässigbar sind.
- Von Bedeutung sind also die mittleren Intensitäten, die aufgrund ihrer erdbebenbedingten Ausfallwahrscheinlichkeiten für die Komponenten Beiträge zum Risiko liefern.

Aufgrund des Rechenverhaltens von RiskSpectrum<sup>®</sup> soll überlegt bzw. auch erprobt werden, ob es notwendig ist für jede einzelne Komponente ein Basisereignis zu modellieren, das den erdbebenbedingten Ausfall repräsentiert. Es könnte sinnvoller sein, jeweils ein Erdbeben-Basisereignis an geeigneter Stelle im Fehlerbaum, z.B. an einem übergeordneten ODER-Gatter einzufügen. Dies allerdings unter der Voraussetzung, dass tatsächlich die Wahrscheinlichkeiten für den erdbebenbedingten Ausfall für jede Komponente gleich sind.

Des Weiteren besteht ein Potential für die Erhöhung der Häufigkeit des Gefährdungszustandes darin, dass das unabhängige Eintreten von Notstromfall und Erdbeben näher untersucht wird.

Es sind dabei folgende Kombinationen denkbar:

- Das Erdbeben tritt zeitlich nach Eintritt des Notstromfalls auf, aber noch während der Dauer des Notstromfalls.
- Das Erdbeben liegt zeitlich vor dem Notstromfall. Das Erdbeben hinterlässt ein Schadensbild, was ein manuelles Abfahren veranlasst. Anschließend tritt ein Notstromfall unabhängig vom Erdbeben auf.

Die zweite Konstellation ist besonders interessant, weil durch das manuelle Abfahren der Anlage der Hauptgenerator als Energiequelle nicht mehr zur Verfügung steht. Der Ausfall der Netzeinspeisungen prägt somit den Eintritt eines nachfolgenden Notstromfalls. Wären zum Beispiel darüberhinaus auch Notstromdieselaggregate aufgrund des Erdbebens geschädigt, würde dies die Beherrschung eines nachfolgenden Notstromfalls erheblich einschränken. Beim normalen Abfahren ohne Notstromfall nach einem Erdbeben werden die Notstromdiesel grundsätzlich nicht benötigt.

## 5 Zusammenfassung

Eine seismische PSA (SPSA) umfasst drei Hauptarbeitsschritte:

- Durchführung einer seismischen Gefährdungsanalyse zur Ermittlung standort-spezifischer Häufigkeiten von Erdbebenwirkungen,
- Ermittlung von erdbebenbedingten Versagenswahrscheinlichkeiten für Bauwerke, Systeme und Komponenten (BSK),
- Berechnung erdbebenbedingter Gefährdungs- und Kernschadenzustände.

Im Forschungs- und Entwicklungsvorhaben RS1180 /TUE 10/ wurde ein Verfahren zur Klassifizierung von Bauwerken, Systemen und Komponenten (BSK) im Hinblick auf ihre Risikorelevanz bei seismischen Einwirkungen entwickelt. Dabei wurde eine Vorgehensweise zur Identifikation seismisch relevanter BSK erarbeitet. Das sind BSK für die anlagenspezifisch erdbebenbedingte Versagenswahrscheinlichkeiten abgeleitet werden müssen. Das Auswahlverfahren ist dem Hauptarbeitsschritt zur Ermittlung von BSK-Versagenswahrscheinlichkeiten zuzuordnen. Die Ergebnisse sind detailliert in /TUE 10/ dokumentiert.

Die methodischen Weiterentwicklungen im vorliegenden Vorhaben betreffen die optimale Struktur des Anlagenmodells zur Berechnung der seismischen Gefährdungshäufigkeit. Im Mittelpunkt stehen dabei die Berücksichtigung seismischer Abhängigkeiten von BSK-Ausfällen und die Frage der Abhängigkeit des Ergebnisses einer SPSA von der tatsächlichen Stärke eines Erdbebens. Diese Fragestellungen beziehen sich vor allem auf den dritten Hauptarbeitsschritt zur Berechnung der Häufigkeit erdbebenbedingter Gefährdungs- und Kernschadenzustände. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind im vorliegenden Bericht dokumentiert und werden nachfolgend kurz zusammengefasst, siehe Kap. 5.1.

Die Ergebnisse der Vorhaben RS1180 und 3607R02614 bilden die Grundlage zur Durchführung eines Projekts zur Erstellung einer generischen Informations- und Datenbasis für SPSA, siehe dazu Kap. 5.2.2.

## 5.1 Ergebnisse

Die Durchführung einer SPSA bedeutet die Bestimmung der jährlichen Häufigkeit von seismisch induzierten Gefährdungs- und Kernschadenszuständen  $KSH$  eines Kernkraftwerks. Rein formal erhält man  $KSH$  mit folgender Formel (siehe auch Kap. 3.1):

$$KSH = \int_0^{\infty} H(F) \left( \frac{dW(F)}{dF} \right) dF$$

Dabei ist  $F$  der makroseismische Parameter mit dem die Stärke des Erdbebens beschrieben wird (meist wird die maximale Freifeldbeschleunigung genutzt),  $H(F)$  die jährliche Überschreitenshäufigkeit von  $F$  und schließlich  $W(F)$  die bedingte Wahrscheinlichkeit für einen Kernschaden bei einem Erdbeben mit dem Parameter  $F$ . Die Funktion  $W(F)$ , formuliert in Ereignis- und Fehlerbäumen, bezeichnet man auch als Anlagenmodell. In das Anlagenmodell gehen die Wahrscheinlichkeiten der seismisch induzierten störfallauslösenden Ereignisse und die Nichtverfügbarkeiten der Systemfunktionen ein. Insbesondere sind im Anlagenmodell die Abhängigkeiten im seismischen Ausfallverhalten von technischen Einrichtungen zu beschreiben.

### 5.1.1 Aufstellung des seismischen Anlagenmodells

Die Aufstellung des seismischen Anlagenmodells erfolgt durch Zurückführung des auslösenden Ereignisses Erdbeben auf bereits untersuchte auslösende Ereignisse für PSA der Stufe 1 entsprechend den Referenzlisten im Leitfaden /FAK 05/ (siehe dazu die Diskussionen in Kap. 3.1).

Dazu werden generische Fehlerbäume aufgestellt, die die Einleitung dieser störfallauslösenden Ereignisse beschreiben. Für die Modellierung des Ausfalls der Beherrschung dieser auslösenden Ereignisse wird dann in gewohnter Weise auf die vorhandenen Ereignis- und Fehlerbäume der PSA der Stufe 1 für Zustände des Leistungsbetriebs zurückgegriffen. Da bei einem Erdbeben zu erwarten ist, dass sich mehrere auslösende Ereignisse überlagern (z.B. Offenbleiben eines Druckhalter-Abblaseventils und Notstromfall), wird diese Überlagerung in einem Ereignisbaum analysiert. Für sich überlagernde auslösende Ereignisse müssen die Ereignisbäume für den Ausfall der Beherrschung dieser auslösenden Ereignisse neu modelliert werden, da diese in der PSA für den Leistungsbetrieb nicht modelliert wurden. Die Modellierung und die numerische

Bewertung von Ereignis- und Fehlerbäumen wird mit Hilfe des Programms RiskSpectrum<sup>®</sup> durchgeführt.

Die Fehlerbäume müssen um solche Basisereignisse erweitert werden, die den seismischen Ausfall von relevanten BSK beschreiben. Dabei sollte auf die mit dem Auswahlverfahren erzeugte seismische Ausrüstungsliste zurück gegriffen werden (Vorgehen siehe /TUE 10/). Weiterhin sind alle relevanten seismischen Abhängigkeiten im Anlagenmodell umzusetzen.

An einem ausgewählten Beispiel (seismisch ausgelöster Notstromfall, siehe Kap. 4.2) wurden einige Testmodellierungen durchgeführt. Aufgrund der Ressourcenbeschränkungen in diesem Vorhaben konnte insbesondere das Abhängigkeitsmodell nicht erprobt werden.

### **5.1.2 Modellierung von Abhängigkeiten bei seismischen BSK-Ausfällen**

Zur Beschreibung des seismischen Ausfallverhaltens einer Komponente im Fehlerbaummodell einer Systemfunktion wird standardmäßig von einem unabhängigen seismischen Ausfall und von der Möglichkeit abhängiger Ausfälle mit seismischen Ursachen ausgegangen. Die abhängigen Ausfälle werden charakterisiert durch Mengen von BSK, durch die Art der Abhängigkeit des Ausfalls und durch eine die Stärke der Abhängigkeit beschreibende Funktion (siehe dazu die Ausführungen und Beispiele in Kap. 3.2).

Mit dem abgeleiteten Modell zur Beschreibung von Abhängigkeiten beim seismischen Ausfall von Komponenten konnte eine Vorschrift erarbeitet werden wie Abhängigkeiten beliebiger Art in die Fehlerbaummodelle zu integrieren sind. Ein kleines Beispiel (Kap. 4.1) ist zur Veranschaulichung der Vorgehensweise angegeben.

### **5.1.3 Berechnungsvorschrift**

Die Berechnungsvorschrift ist detailliert in Kap. 3.3 beschrieben, hier folgt nur eine kurze Zusammenfassung.

Es wird angenommen, dass eine seismische Gefährdungsanalyse des Kernkraftwerk-Standorts durchgeführt wurde und ein seismisches RiskSpectrum<sup>®</sup>-Anlagenmodell vor-

liegt, d. h. auch, dass sämtliche Basisereignisse seismischer Art (auch die abhängigen) im Anlagenmodell berücksichtigt sind. Zur Berechnung der summarischen seismischen Kernschadenshäufigkeit KSH wird folgendermaßen vorgegangen:

- Bereitstellung von Fragilities

Für alle seismisch relevanten BSK im Anlagenmodell sind seismische Ausfallwahrscheinlichkeiten (Fragilities) bereitzustellen. Dazu existiert eine Datenbank generischer und anlagenspezifischer Fragilities.

- Bereitstellung der seismischen Gefährungsdaten

Es werden die seismischen Intensitäten festgelegt, für die eine bedingte seismische Kernschadenswahrscheinlichkeit berechnet werden soll (siehe Kap. 7). Aus der Gefährungsanalyse sind die den Intensitäten zugeordneten Überschreitungshäufigkeiten bekannt.

- Bereitstellung von Datensätzen zur Berechnung der  $KSW_i$  für die festgelegten seismischen Intensitäten
- Durchführung RiskSpectrum<sup>®</sup>-Rechnungen für jede festgelegte seismische Intensität

Man erhält als Ergebnis der RiskSpectrum<sup>®</sup>-Rechnungen folgenden Vektor von Werten  $\{KSW_1, KSW_2, \dots, KSW_n\}$ .  $KSW_i$  ist die bedingte Wahrscheinlichkeit, dass bei einem Erdbeben der Intensität  $INT_i$  ein Kernschaden eintritt.

- Zusammenfassung der Ergebnisse

Eine obere und untere Grenze für  $KSH_{\text{seismisch}}$  ergibt sich aus (Formel 3-10) und (Formel 3-11) oder Nutzung der Rechenvorschrift in Tab. 3-7.

- Überprüfung der Ergebnisse

Werden keine Unsicherheiten betrachtet, sollte die obere Abschätzung als Ergebnis der seismischen Analyse genutzt werden. Ist die Differenz  $\Sigma_{\text{obere}} - \Sigma_{\text{untere}}$  zu groß, ist die Anzahl  $n$  der zu berechnenden Intervalle zu vergrößern.

## **5.2            Ausblick**

Auf der Grundlage der Ergebnisse in /TUE 10/ und der in diesem Bericht abgeleiteten Ergebnisse ergeben sich für ein Folgeprojekt zur Durchführung von SPSA die nachfolgend aufgeführten Ziele.

### **5.2.1            Internationale Zusammenarbeit**

Die Recherchen zum Stand von Wissenschaft und Technik auf dem Gebiet von SPSA sollten fortgeführt werden. Neben der Teilnahme an Konferenzen und Seminaren zu SPSA wird insbesondere ein aktiver internationaler Erfahrungsaustausch zur Modellbildung für SPSA angeregt. Dieser Erfahrungsaustausch sollte bevorzugt mit Fachorganisationen in Ländern mit Kernkraftwerks-Standorten erhöhter seismischer Aktivität erfolgen.

Die Methoden zur Beschreibung von korrelierten Ausfällen in den Ereignis- und Fehlerbaummodellen sind aus den Untersuchungen zur Einbeziehung von Fehlern aus gemeinsamer Ursache in probabilistischen Analysen bekannt. Im Grundsatz geht es bei den weiteren Untersuchungen zu korrelierten seismischen Ausfällen hauptsächlich darum, die Wahrscheinlichkeiten für den Ausfall beliebiger Teilmengen von Komponenten (bzw. BSK in einer SPSA) aus einer Abhängigkeitsmenge zu bestimmen. Die Daten- und Informationsbasis zur Durchführung und Ableitung derartiger Quantifizierungen ist in vielen Fällen nicht umfangreich. Meist muss auf Expertenschätzungen zurückgegriffen werden. Dabei wird oft sehr konservativ vorgegangen, indem zum einen von einer vollständigen Korrelation aller BSK der Abhängigkeitsmenge ausgegangen wird und anschließend unabhängig von der Intensität des Erdbebens prozentual abgeschätzt wird, wann es zu einem vollständigen Ausfall der Abhängigkeitsmenge kommt. Zumindest in Deutschland gibt es keine empirischen Daten, die als Grundlage zur Bestimmung dieser Wahrscheinlichkeiten dienen könnten. Bei dem Erfahrungsaustausch ist insbesondere zu erkunden, ob bei realen seismischen Einwirkungen an Standorten von Kernkraftwerk Wirkungsmechanismen beim Auftreten abhängiger Ausfälle erkennbar sind.

### 5.2.2 Spezifikation einer SPSA-Datenbasis

Die Datenbasis für eine SPSA umfasst neben der Menge aller Bauwerke, Systeme und Komponenten (BSK) des zu untersuchenden Kernkraftwerks und ihren Eigenschaften (anlagenspezifische Daten) auch umfangreiche generische Informationen, die bei konkreten Analysen standardisiert zur Entscheidungsfindung zur Verfügung stehen. Alle Daten sind zu spezifizieren und geeignet miteinander in Beziehung zu setzen.

### 5.2.3 Anwendung der SPSA-Datenbasis bei Erstellung, Auswertung, Nutzung und Begutachtung einer SPSA

Es sollte eine umfassende Anwendungsbeschreibung der SPSA-Datenbank erstellt werden. Alle Anwendungen bei der Erstellung, Auswertung, Nutzung und Begutachtung einer SPSA werden dabei durch Datenbank-Prozeduren unterstützt.

Die Untersuchungen zur Ableitung und Quantifizierung des seismischen Anlagenmodells sollen fortgesetzt werden. Dabei sollen die Ergebnisse sofort in Datenbankroutinen umgesetzt werden, das betrifft vor allem folgende Arbeitsgebiete:

- Weiterentwicklung des Auswahlverfahrens  
Methodik eines standardisierten Vorgehens zur Aufstellung einer seismischen Ausrüstungsliste (SAL) unter Einbeziehung des PSA-Modells für interne auslösende Ereignisse, umfassender allgemeiner Kenntnisse zu räumlichen und funktionalen Abhängigkeiten im Ausfallverhalten von BSK und der Behebungsergebnisse zur Beschreibung des aktuellen Anlagenstandes in Bezug auf die seismische Auslegung.
- Weiterentwicklung des allgemeinen Modells der seismischen Abhängigkeiten  
Das seismische Abhängigkeitsmodell ist so weiterzuentwickeln, dass es grundsätzlich möglich wird, für jede Teilmenge einer Menge  $M$  von abhängigen BSK bezüglich einer die Abhängigkeit beschreibenden Eigenschaft  $A$  die Ausfallwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von einem makroseismischen Parameter anzugeben.
- Vergleichende Analysen zur Quantifizierung von seismischen Abhängigkeiten  
In Abhängigkeit von den für die SPSA getroffenen Annahmen und den zur Verfügung stehenden Daten und Informationen sind verschiedene Ansätze zur Berechnung der Wahrscheinlichkeiten für abhängige Ausfälle zu vergleichen. Bei den

Ansätzen soll auch auf die bekannten Quantifizierungsmodelle für GVA bei der Bewertung von abhängigen Ausfällen in PSA der Stufe 1 zurückgegriffen werden.

- Aufstellung und Quantifizierung von seismischen Auslöserfehlerbäumen
- Aufstellung des seismischen Anlagenmodells auf der Grundlage der Ergebnisse des Auswahlverfahrens, der seismischen Abhängigkeitsanalyse und der Auslöserbestimmung
- Quantifizierung des seismischen Anlagenmodells  
Erarbeitung einer Quantifizierungsvorschrift (unter anderem: automatische Parameterübergabe zur Bestimmung der seismischen Kernschadenshäufigkeit für verschiedene Intensitäten, Festlegung von Anzahl und Lage der Stützstellen zur Berechnung der Kernschadenshäufigkeit auf der Intensitätsskala u.a.)

#### **5.2.4 Aufbau einer SPSA-Datenbasis für eine Referenzanlage**

Die zuvor strukturell erstellte Datenbank soll für ein Referenzkernkraftwerk vollständig mit den erforderlichen anlagenspezifischen Daten gefüllt werden. Das Anlagenmodell zur Beschreibung und Quantifizierung des seismischen Risikos wird als RiskSpectrum<sup>®</sup>-Projekt aufbereitet, d.h. auch, dass die Informationen aus der SPSA-Datenbank zur seismischen Ausrüstungsliste und zu den seismischen Abhängigkeiten sich im Anlagenmodell widerspiegeln müssen.

#### **5.2.5 Datenbank generischer Versagenswahrscheinlichkeiten**

Eine BSK versagt in Abhängigkeit von der Stärke eines Erdbebens. Zur Quantifizierung werden seismische Versagenswahrscheinlichkeiten genutzt. Unter einer seismischen Versagenswahrscheinlichkeit einer BSK wird die Wahrscheinlichkeit des Ausfalls bzw. Funktionsverlustes einer BSK als Funktion der Stärke des Erdbebens verstanden. Die entsprechende Funktion wird seismische Versagenskurve der BSK genannt.

Es wird auf der Grundlage bekannter SPSA und sonstiger internationaler Studien eine Datenbank generischer Versagenswahrscheinlichkeiten aufgebaut und in die seismische Informations- und Datenbasis integriert.

Darüber hinaus verbleibt aber die Notwendigkeit, im Rahmen einer SPSA auch anlagenspezifische Versagenswahrscheinlichkeiten für bestimmte BSK zu ermitteln und in die Datenbank einzubringen. Die betrifft insbesondere Anlagegegebenheiten, wo generische Daten nicht übertragbar sind, oder spezielle anlagenspezifische Versagenswahrscheinlichkeiten.

## 6 Grundbegriffe, Bezeichnungen und Definitionen

Tab. 6-1 Bezeichnungen, Definitionen, Erläuterungen

Begriff, Bezeichnung, Abkürzung	Erläuterung
Abhängigkeitsmodell $\{A, M, \kappa\}$	Jede Art seismischer Abhängigkeit wird durch ein Wertetripel $\{A, M, \kappa\}$ beschrieben. <b>A</b> beschreibt die Ursache für den seismisch bedingten korrelierten Ausfall von BSK aus <b>M</b> und $\kappa$ das Ausmaß der Korrelation.
Bemessungs- erdbeben	Als Bemessungserdbeben ist das Erdbeben mit der für den Standort größten Intensität anzunehmen, das unter Berücksichtigung einer größeren Umgebung des Standortes (bis etwa 200 km vom Standort) nach wissenschaftlichen Erkenntnissen auftreten kann /KTA 90/.
Bemessungsspektrum	Antwortspektrum, das der Erdbebenauslegung für das (→) Bemessungserdbeben zugrunde gelegt wird. → RRS
BSK	<u>B</u> auwerke, <u>S</u> ysteme, <u>K</u> omponenten In einer SPSA 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. BSK entspricht in der englischsprachigen Fachliteratur SCC (structures, systems, components).
BSK, relevante	Ergebnis des Auswahlverfahrens Aus der SAL werden mit Hilfe eines systematischen Auswahlverfahrens die BSK bestimmt, für die im Rahmen einer seismischen PSA Versagenskurven benötigt werden. Diese BSK werden relevante BSK genannt.
F	Freifeldbeschleunigung (im Bericht meist mit → Maßeinheit g)
$F_{0,50}$	Median von → $W(F)$ ; bei einem Erdbeben der Stärke $F_{0,50}$ beträgt die Versagenswahrscheinlichkeit der entsprechenden BSK 0,5
$F_{HCLPF}$	$F_{HCLPF}$ ist die Freifeldbeschleunigung, bei der es mit hohem Vertrauensgrad (95%) sehr unwahrscheinlich ist (0,05), dass die entsprechende BSK versagt.
Fragility	erbebenbedingte Versagenswahrscheinlichkeit einer BSK (abhängig von der Stärke des Bebens, hier meist in → F), siehe auch → $W(F)$
generisches Spektrum einer BSK	siehe → GERS

Begriff, Bezeichnung, Abkürzung	Erläuterung
GERS	Generic Equipment Ruggedness Spectrum (siehe z.B. /EPR 91/, Seite 2-1) Das generische Spektrum charakterisiert eine BSK, indem für die entsprechende BSK-Klasse auf der Basis von Tests gezeigt werden konnte, dass sie bei gegebener Freifeldbeschleunigung ihre Funktion hinreichend robust erfüllt.
GVA	gemeinsam verursachter Ausfall
H(F), H(I)	Funktion der standortspezifischen seismischen Überschreitenshäufigkeiten in Abhängigkeit von einem makroseismische Parameter, hier z.B. → F und I auch: seismic hazard curve
HCLPF	Der HCLPF-Wert einer BSK gibt die Freifeldbeschleunigung → F 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 Komponente gegenüber Erdbeben.
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, siehe z.B. /CHE 91/
KKS	Kraftwerkkenzeichensystem
$KSH_{seismisch}$	summarische Häufigkeit von erdbebenbedingten Kernschadenzuständen
Maßeinheit g	Erdbeschleunigung, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
MCS	minimal cut set (minimale Schnittmenge)
PGA	peak ground acceleration, Freifeldbeschleunigung → F
RLE	review level earthquake
RRS	required Response Spectrum (aus: /ANC 91/) → Bemessungsspektrum
SAL	seismische Ausrüstungsliste Ausgangspunkt für das Auswahlverfahren ist eine umfassende Liste von BSK, deren Fehlfunktion bei seismischer Einwirkung einen Beitrag zur Häufigkeit der Gefährdungszustände liefern kann.
SSC	Structures, Systems and Components → BSK
SEL	Seismic Equipment List (siehe → SAL)
SMA	Seismic Margin Assessment (Methode zur Einschätzung seismischer Sicherheitsreserven)
SPSA	seismische PSA

Begriff, Bezeichnung, Abkürzung	Erläuterung
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.
Standsicherheit	Unter Standsicherheit 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). Standsicherheit schließt die erforderliche Festigkeit und Stabilität von Stützkonstruktionen ein.
TRS	Test Response Spectrum (aus: /ANC 91/)
W(F)	Versagenswahrscheinlichkeit ( $\rightarrow$ Fragility) einer BSK bei gegebenem ( $\rightarrow$ ) seismischen Parameter F (meist Freifeldbeschleunigung)
$W_A(F)$	Wirksamkeitsfunktion der Eigenschaft <b>A</b> im ( $\rightarrow$ ) Abhängigkeitsmodell $\{A, M, \kappa\}$ . Es ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass die Eigenschaft <b>A</b> bei gegebenen seismischen Parameter <b>F</b> zu abhängigen Ausfällen von BSK aus <b>M</b> führen kann.

## 7 Literatur, Dateien und Rechenmodell

### 7.1 Referenzen

Für die markierten\* Literaturstellen wurde eine kurze Inhaltsangabe speziell zur Modellierung und Quantifizierung seismischer Ereignisabläufe erstellt (siehe Kap. 2.1)

/ANC 91/ ANCO Engineers

Generic Seismic Ruggedness of Power Plant Equipment (Revision 1)  
EPRI NP-5223-M, Final Report, August 1991

/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, Juni 2005

/BEN 91/ Benjam in, J-R., et al.

A Methodology for assessment of Nuclear Power Plant Seismic Margin (Revision 1), EPRI NP-6041-M, Final Report, August 1991

/BLO 09/\* Bloem, T., R. Obenland

Experience from a Seismic Probabilistic Safety Assessment of a German PWR, in: Proceedings of SMiRT20, Espoo, Finland, August 2009

/BMU 05/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)

Sicherheitsüberprüfung für Kernkraftwerke gemäß §19a des Atomgesetzes - Leitfaden Probabilistische Sicherheitsanalyse, 31. Januar 2005, Bekanntmachung vom 30. August 2005, Bundesanzeiger, Jahrgang 57, Nummer 207a, ISSN 0720-6100, 3. November 2005

/BUD 91/\* Budnitz, R. J.

Current state of methodologies for seismic probabilistic safety analyses  
Reliability Engineering and System Safety 62, 1998, pp. 71-88

- /CHE 91/\* Chen, J. T., et al.  
Procedural and Submittal Guidance for the Individual Plant Examination of External Events (IPEEE) for Severe Accident Vulnerabilities, Final Report, NUREG-1407, 1991
- /CHO 09/\* Choi, I.-K.; M. Kim, J.-H. Park  
Component Degradation Effect on Seismic Risk of NPP, in: Proceedings of SMiRT20, Espoo, Finland, August 2009
- /FAK 05/\* Facharbeitskreis (FAK) Probabilistische Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke  
Methoden zur probabilistischen Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke, Stand: August 2005, BfS-SCHR-37/05, Wirtschaftsverlag NW / Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Salzgitter ISSN 0937-4469, ISBN 3-86509-414-7, Oktober 2005
- /GRS 02/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH  
Vorhaben SR2614; Bereitstellung und Erprobung von Methoden für eine seismische probabilistische Sicherheitsanalyse (SPSA), Angebot AG-Nr. 2799, Köln, 14.12.2007
- /GRS 03/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH  
Vorhaben 3610R01343: Erstellung einer Datenbasis zur Durchführung seismischer probabilistischer Sicherheitsanalysen, Angebot AG-Nr. 3139, Köln, 31.05.2010
- /GRS 90/\* Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH  
Deutsche Risikostudie Phase B, Verlag TÜV Rheinland, Köln, 1989
- /GRS 93/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH:  
SWR Sicherheitsanalyse, Abschlussbericht, Teil 1, GRS-102/1, ISBN 3-923875-52-5; 1993
- /GRU 98/ Grünthal, G. (ed.): European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98). Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie 15, Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Luxembourg, 99 pp., 1998.

- /HEN 09/\* Henkel, F.-O., M. Schalk  
Auslegung der Anlagenteile von Kernkraftwerken – Stand und Tendenzen  
atw 54, Heft 12, Dezember 2009
- /HOF 96/\* Hoffmann, H. H.  
Vorgehensvorschlag zur Durchführung einer probabilistischen  
Sicherheitsanalyse für das externe störfallauslösende Ereignis Erdbeben,  
ABB, März 1996
- /IAEA 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)  
mit: Ravindra, M.K. (Annex I), Seismic probabilistic safety assessment of  
NPP
- /IAEA 93/\* International Atomic Energy Agency (IAEA)  
Probabilistic Safety Assessment for Seismic Events, IAEA-TECDOC-724,  
Wien, Oktober 1993,  
[http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te\\_724\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_724_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,  
Dezember 2003
- /JON 05/ Jonczyk, J., G. Thuma  
Naturbedingte übergreifende Einwirkungen, Teilaspekt: Erdbeben,  
Bestandsaufnahme des Standes von Wissenschaft und Technik,  
Technische Notiz, Vorhaben SR2668, Gesellschaft für Anlagen- und  
Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, November 2005
- /KAS 99/\* Kassawara, R. P., et al.  
Seismic IPEEE, Industry Insights, in: Proceedings of SMiRT15, Seoul, Ko-  
rea, August 1999

- /KAT 08/\* Kato, M.  
A seismic-induced fire at the Kashiwazaki-Kariwa NPP,  
GRS-JNES Meeting, Köln, Februar 2008
- /KLA 08/\* Klapp, U., A. Strohm; M. K. Ravindra  
Seismische PSA für GKN I  
in: /TUV 08/
- /KLU 09/\* Klügel, J.-U.  
On the Treatment of Dependency of Seismically Induced Component  
Failures in Seismic PRA  
in: Proceedings of SMiRT20, Espoo, Finnland, August 2009
- /KOZ 04/\* Kozloduy Nuclear Power Plant  
Erdbeben-PSA Kozloduy, Block 5 und 6, 2004,  
siehe [hier](#):  
C:\Dokumente und Einstellungen\TUE\  
Eigene Dateien\Erdbeben>Allgemeines\Literatur\SPSA Kozloduj
- /KTA 90/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA)  
Sicherheitstechnische Regel des KTA: KTA 2201, Auslegung von  
Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen, Juni 1990  
Teil 1: Grundsätze, Fassung 06/90  
Teil 2: Baugrund, Fassung 06/90  
Teil 3: Auslegung der baulichen Anlagen (Entwurf), Fassung 06/90  
Teil 4: Anforderung an Verfahren zum Nachweis der Erdbebensicherheit für  
maschinen- und elektrotechnische Anlagenteile, Fassung 06/90  
Teil 5: Seismische Instrumentierung, Fassung 06/96
- /MAT 08/\* Matsuoka, T.; K. Ogura  
Development of Risk Assessment Method for Fires caused by Earthquake,  
PSAM9, Hong Kong, China, 18-23 May 2008
- /MIT 06/\* Mitomo, N., et al.  
Development of risk assessment method for fire caused by earthquake,  
in: Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on PSA and  
Management, May 14-18, 2006; New Orleans, 2006

- /MUR 77/ Murphy, J. R., L. J. O'Brien  
The correlation of peak ground acceleration amplitude with seismic intensity and other physical parameters, Bulletin of seismological Society of America, Vol. 67, No. 3, Juni 1977
- /OBE 08/\* Obenland, R., et al.  
Using Safety Margins for a German Seismic PRA, Science and Technology of Nuclear Installations, 2008
- /RIC 09/\* Richner, M. et al.  
Insights gained from the Beznau Seismic PSA, in: Proceedings of SMiRT20, Espoo, Finnland, August 2009
- /SPE 09/ Sperbeck, S. T.  
Seismic Risk Assessment of Mansory Walls and Risk Reduction by Means of Prestressing, Doctoral Thesis, Braunschweig – Florence, ISBN 978-3-89288-192-6, 2009
- /TRI 75/ Trifunac, M. D., A. G. Brady  
On the correlation of seismic intensity scales with the peaks of recorded strong motions, Bulletin of seismological Society of America, Vol. 65, No. 1, Februar 1975
- /TUE 10/ Türschmann, M., et al.  
Verfahren zur Klassifizierung von Bauwerken, Systemen und Komponenten in Hinblick auf ihre sicherheitstechnische Bedeutung bei seismischen Einwirkungen, Technischer Fachbericht, GRS-A-3472, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln/Berlin, Juni 2010
- /TUV 06/ Probabilistische Sicherheitsanalysen in der Kerntechnik, Aktuelle Entwicklungen, Erfahrungen, Perspektiven, TÜV-PSA-Symposium, München, 23.-24. November 2006
- /TUV 08/ Probabilistische Sicherheitsanalysen in der Kerntechnik, Erfahrungen, Erkenntnisse, Entwicklungen, TÜV-PSA-Symposium, Mannheim, 17.-18. April 2008

/VAR 96/\* Varpasuo, P.,J. Puttonen, M. K. Ravindra  
Seismic probabilistic safety analysis of unit 1 of the Loviisa nuclear power  
plant, Nuclear Engineering and Design 160, 1996

/WBI 06/ Wölfel Beratende Ingenieure (WBI)  
Erdbeben und andere EVA-Lasten, Seminarunterlagen, Würzburg, 2006

## **7.2 Dateien, Datenbanken und Rechenmodelle**

Zum Bericht wurde eine CD (erhältlich bei der Projektleitung, Freigabe nur mit Zustimmung des Referenzkraftwerks) erstellt. Auf dieser CD ist vor allem der Entwurf der Datenbank <DB SPSA GKN2> enthalten.

- Datenbank <DB SPSA GKN2>  
Der Stand dieser Datenbank geht insbesondere bez. der enthaltenen generischen Versagenswahrscheinlichkeiten über die Datenbank in /TUE 10/ hinaus.
- Originalliste der Basisereignisse der PSA der Stufe 1
- Datenübergabe Beispiel 2 <Seismische Eingabeparameter.xlsx>
- RiskSpectrum©-Anlagenmodell Beispiel 2

## 8            **Abbildungsverzeichnis**

Abb. 2-1	Ereignisablaufdiagramm einer Transiente infolge Erdbeben .....	12
Abb. 2-2	Überschreitensraten für den Standort der Risikostudie .....	14
Abb. 2-3	Überschreitensraten für den Standort der SWR-Studie.....	15
Abb. 2-4	Seismische Übertragungskette .....	16
Abb. 2-5	Anlagenspezifische Antwortspektren (aus /BLO 09/) .....	27
Abb. 2-6	Seismische Gefährdungskurven für die Standorte Beznau (Schweiz, alte Studie, PEGASOS) und Paks (Ungarn) .....	27
Abb. 3-1	Ereignisbaum für die Berechnung der Eintrittshäufigkeit von verschiedenen auslösenden Ereignissen bzw. Kombination durch Erdbeben .....	43
Abb. 3-2	Erweiterung des Anlagenmodells in einer Seismik-PSA für eine Komponente K .....	49
Abb. 3-3	Standardfehlerbaum für den seismischen Ausfall einer BSK mit abhängigen Ausfällen wegen einer Eigenschaft A.....	52
Abb. 3-4	BSK-Ausfall bei Gebäude- oder Raumversagen .....	53
Abb. 3-5	Einfluss von BSK der Klasse II.....	53
Abb. 3-6	Fehlerbaum bei technologischen Abhängigkeiten.....	54
Abb. 3-7	Modellierung von seismischen Abhängigkeiten.....	55
Abb. 3-8	Diagramm der Versagenswahrscheinlichkeiten (Daten: Flutbehälter aus Tab. 3-2) .....	65
Abb. 3-9	Seismische Gefährungsdaten Standort GKN (aus /WBI 06/) (rot – Werte aus Tab. 3-5, Gefährungsdaten für Aachen) .....	70
Abb. 3-10	Annahmen zu den seismischen Gefährungsdaten für die Beispiele in Kap. 4 .....	71
Abb. 3-11	Schranken von $W(F)$ , 3 Stützstellen.....	73
Abb. 3-12	Ablaufschema zur Berechnung der Häufigkeit eines erdbebenbedingten Kernschadens.....	78
Abb. 4-1	Beispiel 1: Festlegungen.....	79
Abb. 4-2	Beispiel 1: Ereignis und Fehlerbäume zum Beispielsystem (ohne Betrachtung seismischer Einwirkungen) .....	80
Abb. 4-3	Beispiel 1: Fehlerbaum für System 1 im Erdbebenfall.....	85
Abb. 4-4	Beispiel 1: Fehlerbaum für System 2 im Erdbebenfall.....	86

Abb. 4-5	Beispiel 1: Überschreitenshäufigkeiten und Wahrscheinlichkeiten für den Systemausfall .....	88
Abb. 4-6	Ereignisbaum für den erdbebeninduzierten Notstromfall.....	93
Abb. 4-7	Top-Fehlerbaum für das erdbebeninduzierte Ereignis Notstromfall.....	98
Abb. 4-8	Teilfehlerbaum für den erdbebeninduzierten Ausfall der Eigenbedarfsschiene BBA .....	99
Abb. 4-9	Teilfehlerbaum für den Ausfall der Einspeisung für BBA aus Hauptnetz bzw. Hauptgenerator.....	100
Abb. 4-10	Ausfall von Hauptanschluss und Generator durch Erdbeben .....	101
Abb. 4-11	Ausfall der Einspeisung aus dem Reservenetz durch Erdbeben .....	101
Abb. 4-12	Datenbankformular zur Anzeige von Versagenswahrscheinlichkeiten....	106
Abb. 4-13:	Erzeugung der MS ACCESS©-Datenbank eines RiskSpectrum©-Projekts (Schritt 1) .....	111
Abb. 4-14:	Erzeugung der MS ACCESS©-Datenbank eines RiskSpectrum©-Projekts (Schritt 2) .....	111
Abb. 4-15:	Erzeugung der MS ACCESS©-Datenbank eines RiskSpectrum©-Projekts (Schritt 3) .....	112
Abb. 4-16:	Erzeugung der MS ACCESS©-Datenbank eines RiskSpectrum©-Projekts (Schritt 4) .....	113
Abb. 4-17:	Erzeugung der MS ACCESS©-Datenbank eines RiskSpectrum©-Projekts (Schritt 5) .....	113
Abb. 4-18:	Erzeugung der MS ACCESS©-Datenbank eines RiskSpectrum©-Projekts (Schritt 6) .....	114
Abb. 4-19:	Erzeugung der MS ACCESS©-Datenbank eines RiskSpectrum©-Projekts (Schritt 7) .....	115
Abb. 4-20:	Erzeugung der MS ACCESS©-Datenbank eines RiskSpectrum©-Projekts (Schritt 8) .....	116

## 9 Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1	Seismisch relevante BSK in den SPSA der IPEEE (nach /KAS 99/)	20
Tab. 2-2	Seismische Brandkapazitäten für ausgewählte BSK nach /MAT 08/	22
Tab. 2-3	Ergebnisse SPSA Kozloduj, Block 5/6 /KOZ 04/, Table T2/8-1	24
Tab. 2-4	Überschreitungshäufigkeiten Standort GKN (Gefährdungsanalyse 2001)	25
Tab. 2-5:	Ergebnisse von SPSA	30
Tab. 3-1	Abhängige Ausfälle bei seismischen Einwirkungen	56
Tab. 3-2	Ausgewählte seismische Widerstandfähigkeiten SPSA GKN-1 (aus /KLA 08/)	63
Tab. 3-3:	Erdbebenskalen	67
Tab. 3-4	Zusammenhang zwischen Intensität und maximaler Freifeldbeschleunigung bei einem Erdbeben	68
Tab. 3-5	Seismische Gefährdungsdaten für die Region Aachen /SPE 09/	69
Tab. 3-6:	Berechnungsvorschrift – verwendete Abkürzungen	75
Tab. 3-7:	Rechenvorschrift zur Berechnung einer unteren und oberen Abschätzung für die summarische seismische Kernschadenshäufigkeit	77
Tab. 4-1	Beispiel 1: Bezeichnungen der Basisereignisse im RiskSpectrum©-Modell	82
Tab. 4-2	Beispiel 1: Fragility-Kurven	83
Tab. 4-3	Beispiel 1: Festlegung der Ausfalldaten für die Komponenten	83
Tab. 4-4	Beispiel 1: Intensitäten, zugeordnete Bodenbeschleunigungen und Überschreitenshäufigkeiten	84
Tab. 4-5	Beispiel 1: Erwartungswerte des seismischen Ausfalls für die Fragility-Kurven; Fall 1 bis Fall 3 und Wert von pXB für zu berechnenden Intensitäten	84
Tab. 4-6	Beispiel 1: Wahrscheinlichkeit eines Systemausfalls bei Anforderung (Bedingung: Erdbeben gegebener Intensität tritt ein)	86
Tab. 4-7	Beispiel 1: Ergebnisse - Systemschadenshäufigkeiten	87
Tab. 4-8	Beispiel 1: Berechnung des Gesamtrisikos	87
Tab. 4-9	Berechnungsintervalle und zugehörige Überschreitenshäufigkeiten	104
Tab. 4-10	Liste der seismischen Basisereignisse (Auszug)	105
Tab. 4-11:	Verwendete Versagenskurven in Beispiel 2 ( $\square_U = 0,3$ ; $\square_R = 0,2$ )	106

Tab. 4-12	Zuordnung von Fragilities zu den seismisch induzierten Basisereignissen (Auszug) .....	107
Tab. 4-13	Versagenswahrscheinlichkeiten bei verschiedenen Intensitäten (Auszug) .....	108
Tab. 4-14	Fall 1 - Ergebnisse .....	108
Tab. 4-15	Fall 2 - Ergebnisse .....	109
Tab. 4-16:	Ergebnisse für die untersuchten Erdbebenfälle in Abhängigkeit von verschiedenen Intensitäten .....	118
Tab. 6-1	Bezeichnungen, Definitionen, Erläuterungen .....	129



## Verteiler

### BMU, BfS

AG RS I3, Frau Neveling		3 x
Dr. M. Krauß, BfS		2 x

### GRS

Geschäftsführung	(H.P. Weiß, J. Steinhauer)	je 1 x
Bereichsleiter	(erv, paa, prg, rot, stc, ver, zir)	je 1 x
Abteilungsleiter	(mem)	1 x
Projektleitung	(tue)	3 x
Projektbetreuung	(roo)	1 x
Informationsverarbeitung	(nit)	1 x
Bibliothek	(Berlin, Garching, Köln)	je 1 x
Autoren	(fry, mag, thu, tue)	je 1 x
<b>Gesamtauflage</b>	<b>27 Exemplare</b>	

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

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

Forschungszentrum  
**85748 Garching b. München**  
Telefon +49 89 32004-0  
Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200  
**10719 Berlin**  
Telefon +49 30 88589-0  
Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4  
**38122 Braunschweig**  
Telefon +49 531 8012-0  
Telefax +49 531 8012-200

**[www.grs.de](http://www.grs.de)**