

Anwendung von PSA-Methoden zur Sicherheitsbewertung

Übergreifende Einwirkungen
von außen

SR 2547



Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) mbH

Anwendung von PSA- Methoden zur Sicherheitsbewertung

Übergreifende Einwirkungen von
außen

Dr. G. Thuma

März 2008

Auftrags-Nr.: 857166

Anmerkung:

Das diesem Bericht zu Grunde liegende FE-Vorhaben SR 2547 wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Auftragnehmer.

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

Kurzfassung

Die Behandlung von Einwirkungen von außen im Rahmen der probabilistischen Sicherheitsanalyse (PSA) stellt einen relativ neuen Aspekt der Sicherheitsbewertung von Kernkraftwerken in Deutschland dar. Dementsprechend sollte im Rahmen des Vorhabens SR 2547 der internationale Stand von Wissenschaft und Technik hinsichtlich der Behandlung seismischer Einwirkungen und der Einwirkungen gefährlicher gasförmiger Stoffe im Rahmen der PSA ermittelt und während der Laufzeit des Vorhabens weiter verfolgt werden. Dies erfolgte im Wesentlichen durch die Teilnahme an internationalen Fachveranstaltungen und die Sichtung der relevanten Literatur zur probabilistischen Behandlung naturbedingter Einwirkungen von außen.

Die seismische PSA stellt eine weltweit verbreitete Methode zur Sicherheitsbewertung von Kernkraftwerken dar. Grundsätzlich entspricht auch die in Deutschland durch den PSA-Methodenband vorgegebene Vorgehensweise dem internationalen Stand von Wissenschaft und Technik. Um zu gewährleisten, dass die praktische Umsetzung der Vorgaben verlässlich und in nachvollziehbarer Form erfolgt, sind jedoch Präzisierungen und Ergänzungen der Beschreibung im PSA-Methodenband erforderlich. Dieser Überarbeitungsbedarf betrifft die vier Themengebiete

- Auswahl der detailliert zu analysierenden *Bauwerke, Systeme und Komponenten (BSK)*,
- Aufstellung der erdbebenspezifischen Ereignisbäume,
- Behandlung ähnlicher Komponenten unter gleicher seismischer Einwirkung (Korrelation) und
- Quantifizierung der Ereignisabläufe (Ermittlung der erdbebenbedingten Kernschadenshäufigkeiten).

Da die Durchführung der jeweils erforderlichen Entwicklungsarbeiten den Rahmen des Vorhabens weit überschritten hätte, wurden zwei Forschungsvorhaben initiiert. Während die Arbeiten zu dem ersten Punkt im Rahmen eines Arbeitspaketes des BMWi-Vorhabens RS 1180 stattfinden, wurde für die weiteren drei Themenbereiche ein eigenständiges, seitens des BMU betreutes Vorhaben (SR 2614) auf den Weg ge-

bracht. Erste Ergebnisse in beiden Vorhaben sind gemäß Arbeitsprogramm im Laufe des Jahres 2009 zu erwarten.

Im Gegensatz zu den seismischen Einwirkungen, deren Berücksichtigung im Rahmen der PSA internationaler Stand von Wissenschaft und Technik ist, existiert für die probabilistische Behandlung gasförmiger Stoffe bisher keine ausgereifte, international etablierte Methodik. In der Regel werden diese Einwirkungen aufgrund ihrer geringen Eintrittshäufigkeit nicht weiter analysiert. Vor diesem Hintergrund besteht derzeit auf nationaler Ebene kein akuter Handlungsbedarf hinsichtlich der Entwicklung einer entsprechenden probabilistischen Methodik.

Summary

The treatment of external hazards in the frame of probabilistic safety analyses (PSA) represents a relatively new aspect for the German nuclear regulatory process. This was the reason for performing a survey of the state of the art with respect to the treatment of earthquakes and the impact of hazardous (e.g. toxic) gases in the frame of PSA has been performed. This was mainly done by participating in international expert meetings in the respective fields. In addition, the literature available on the probabilistic assessment of external natural hazards has been studied.

In recent years, the seismic probabilistic safety analysis (SPSA) has become a widely used method for safety assessment of nuclear power plants around the world. In Germany, a SPSA procedure is described in the technical reference document on PSA methods supplementing the PSA Guideline, which is based on the safety margin factor assessment. This procedure basically is consistent to the existing international standards and guidelines.

Due to the concise representation, the instructions in the technical reference document permit a wide variety of practical realisations. To allow for a proper implementation of the SPSA some amendments of the description with respect to the details of the procedure are necessary. This is especially true for the four following aspects:

- Screening approach (selection of structures, systems, and components (SSC), for which seismic fragilities have to be calculated),
- Derivation of seismically induced event sequences,
- Treatment of potential correlations of components under seismic loads, and
- Quantification of hazard state and core damage frequencies.

The necessary methodological developments would have exceeded the available resources of this project. Therefore, two follow-up projects were launched. The first one, dealing with the process of screening, is incorporated into a comprehensive research

project (RS 1180) on behalf of the Federal Ministry of Economics and Technology (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, BMWi). For the remaining three topics a separate project (SR 2614) under the supervision of the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, BMU) has been initiated.

The results of these projects are intended to provide the scientific basis for the forthcoming amendment of the technical reference document on PSA methods.

In contrary to the assessment of seismic loads, in most countries, probabilistic methods are not applied to the analysis of the impact of hazardous gases on the safety of nuclear power plants. In such cases, where the impact of hazardous gases is included in the basic event lists of a PSA, this is usually screened out in an early stage of the analysis based on its low occurrence probability. Therefore, no internationally established procedures are available for considering the impact of hazardous gases probabilistically. Due to the aforementioned low occurrence probability, international PSA experts rate the necessity to develop specific probabilistic methods for the treatment of such impacts very low.

Based on these findings, there is no need for immediate actions to amend the German regulations with respect to the effects of hazardous gases. However, this is only true as long as the occurrence probability of such scenarios does not increase significantly. Therefore, it is necessary to track the development of the potential for e.g. industrial or transportation accidents in the vicinity of nuclear power plant sites.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung und Zielsetzung.....	1
2	Stand von Wissenschaft und Technik zu Beginn des Vorhabens.....	2
3	Methodik der seismischen PSA.....	4
3.1	Hintergrund.....	4
3.2	Vorgehensweise	7
3.3	Ergebnisse.....	8
3.3.1	Internationaler Stand der SPSA	8
3.3.2	Beschreibung der Vorgehensweise im Fachband zu PSA-Methoden des PSA-Leitfadens	19
4	Berücksichtigung der Einwirkung gefährlicher gasförmiger Stoffe in der PSA	26
4.1	Hintergrund.....	26
4.2	Vorgehensweise	26
4.3	Ergebnisse.....	27
5	Zusammenfassung und Ausblick.....	31
6	Literatur.....	35
7	Tabellenverzeichnis.....	43

1 Einführung und Zielsetzung

Die Behandlung von Einwirkungen von außen im Rahmen der probabilistischen Sicherheitsanalyse (PSA) stellt einen relativ neuen Aspekt der Sicherheitsbewertung von Kernkraftwerken in Deutschland dar. Daher sollte im Rahmen des Arbeitspunktes 1.4 der internationale Stand von Wissenschaft und Technik hinsichtlich der Behandlung seismischer Einwirkungen und der Einwirkung gefährlicher gasförmiger Stoffe im Rahmen der PSA ermittelt und während der Laufzeit des Vorhabens weiter verfolgt werden.

Aufgabe der Arbeiten zur Weiterentwicklung von Methoden für die probabilistische Behandlung der naturbedingten übergreifenden Einwirkung "Erdbeben" war es, die ermittelten Informationen mit der deutschen Methodik der Erdbeben-PSA (seismische PSA, SPSA) zu vergleichen und vorhandene Unterschiede zu identifizieren. Für eventuelle Defizite der deutschen Vorgehensweise sollten Vorschläge zur Anpassung an den internationalen Stand von Wissenschaft und Technik erarbeitet werden. Sofern mit vertretbarem Aufwand realisierbar, sollte die bestehende Methodik unmittelbar angepasst werden.

Im Hinblick auf die Berücksichtigung des Einflusses gefährlicher gasförmiger Stoffe in die PSA war aufgrund der bisher fehlenden Grundlagen für derartige Analysen zunächst eine einmalige Erfassung und Bewertung aller zu dieser Thematik verfügbaren Informationen vorgesehen. Ausgehend von den Ergebnissen dieser Bewertung sollte eine erste Einschätzung erfolgen, ob es fachlich für erforderlich gehalten wird, eine Einwirkung durch gefährliche gasförmige Stoffe zukünftig im Rahmen der PSA zu berücksichtigen oder ob auf eine quantitative Behandlung verzichtet werden kann.

2 Stand von Wissenschaft und Technik zu Beginn des Vorhabens

Der Stand von Wissenschaft und Technik in Deutschland hinsichtlich der probabilistischen Behandlung seismischer Einwirkungen ist in /FAK 05/ dokumentiert. Das dort beschriebene Vorgehen zur Durchführung einer probabilistischen Erdbebenanalyse (Sicherheitsreservfaktorverfahren) folgt im Wesentlichen den Untersuchungen in /HOF 96/, welche wiederum auf Entwicklungsarbeiten in den USA zur "Seismic Probabilistic Risk Analysis (SPRA)" /NRC 83/, /NRC 85/, /PLG 83/) basieren. Über aktuellere internationale Anwendungen und Bewertungen des Verfahrens wird beispielsweise in /NEA 98/, /KAN 00/ und /NIS 00/ berichtet. Auf der Basis der umfangreichen Erfahrungen wurde inzwischen in den USA eine Richtlinie zur Durchführung probabilistischer Analysen für EVA (Einwirkungen von außen)-Ereignisse entwickelt, der eine Anleitung zur Durchführung des Sicherheitsreservfaktorverfahrens beinhaltet /ANS 03/.

Das in /FAK 05/ beschriebene Sicherheitsreservfaktorverfahren gliedert sich in drei Teil-Schritte:

- Ermittlung der standortspezifischen Erdbebenhäufigkeiten zur Durchführung einer Erdbebengefährdungsanalyse des Standortes,
- Durchführung einer Versagensanalyse für Gebäudestrukturen, Komponenten und Systeme durch Ermittlung der Nachweismargen und der Wahrscheinlichkeit, dass sie erdbebenbedingt versagen,
- Erstellung der Ereignisbäume für die erdbebeninduzierten auslösenden Ereignisse und die Berechnung der Eintrittshäufigkeit von Gefährdungszuständen.

Dabei wird vorausgesetzt, dass die betrachtete Anlage gegen das am Standort gültige Bemessungserdbeben ausgelegt ist und dass dafür entsprechende Nachweise vorliegen. Es wird ferner davon ausgegangen, dass eine Erdbebengefährdungsanalyse vorhanden ist, d. h. dass z. B. eine SPSA gemäß /ROS 78/ vorliegt.

Ziel des Sicherheitsreservfaktorverfahrens ist es, die in den ursprünglichen Nachweisen aufgrund der gemachten Annahmen und Vereinfachungen insgesamt gegebene Nachweismarge festzustellen und auf dieser Basis Aussagen über die Versagens-

wahrscheinlichkeit von Systemen und Komponenten auch für Erdbeben höherer Intensität (und geringerer Eintrittshäufigkeit) zu machen.

Die Einwirkung von Gaswolken wird in der PSA bisher nur unter dem Aspekt möglicher Explosionsdruckwellen behandelt /FAK 97/. Bei deterministischen Untersuchungen werden darüber hinaus auch chemische und biologische Effekte gasförmiger Substanzen betrachtet. Die entsprechenden regulatorischen Anforderungen werden in den Sicherheitskriterien für Kernkraftwerke /SIK 83/ und in nachgeordneten Dokumenten unter dem Stichwort 'gefährliche Stoffe' geführt. Hierbei stehen die toxischen, korrosiven und sauerstoffverdrängenden Eigenschaften der Substanzen im Vordergrund. In der Deutschen Risikostudie Kernkraftwerke /GRS 80/ wurde zwar davon ausgegangen, dass derartige Einwirkungen keine signifikanten Risikobeiträge liefern, auf eine abschließende Bewertung wurde jedoch mangels gesicherter Forschungsergebnisse verzichtet. Eine systematische quantitative Ermittlung des Risikobeitrags liegt auch heute noch nicht vor.

3 Methodik der seismischen PSA

3.1 Hintergrund

In vielen Ländern, unter anderem auch in Deutschland, stellen Erdbeben eine der sicherheitstechnisch bedeutsamsten Einwirkungen von außen auf Kernkraftwerke dar. Aus diesem Grund werden seismische Einwirkungen im deutschen kerntechnischen Regelwerk ausführlich behandelt. Hierbei ist zwischen dem Regelwerk zur seismischen Auslegung und dem Regelwerk zur Überprüfung bestehender Anlagen¹ zu unterscheiden.

Für die Auslegung gegen seismische Einwirkungen sind die Teile 1 bis 6 der KTA 2201 /KTA 90/ maßgebend (siehe dazu auch **Tab. 3-1**). Im Teil 1 dieser Regel wird ein Bemessungserdbeben definiert, bei dessen Auftreten die Anlage sicher abgefahren werden können muss. Dieses Bemessungserdbeben wird bisher grundsätzlich auf deterministische Weise festgelegt. Probabilistische Methoden finden in der Praxis bereits unterstützend Anwendung und sollen in einer zukünftigen aktualisierten Version der Regel auch gefordert werden. (Die Überarbeitung findet derzeit statt, ein erster Entwurf soll Ende 2008 vorliegen.)

Nach der deterministischen Definition ist das Bemessungserdbeben das Erdbeben mit der größten anzunehmenden Intensität, das in einem Umkreis von ca. 200 km um den Standort auftreten kann. Dieses Erdbeben wird, wenn es in der tektonischen Einheit zu erwarten ist, in der der Standort liegt, in die unmittelbare Nähe des Standorts verschoben. Liegt es in einer anderen tektonischen Einheit wird es an den standortnächsten Punkt dieser Einheit verschoben. Zusätzlich kann ein wissenschaftlich begründeter Sicherheitszuschlag erfolgen (z. B. aufgrund unvollständiger Erdbebenkataloge oder Unsicherheiten bei der Bestimmung der Intensität der zur Ermittlung herangezogenen historischen Erdbeben).

¹ Leitfäden zur Durchführung von periodischen Sicherheitsüberprüfungen: Grundlagen zur Periodischen Sicherheitsüberprüfung, Leitfaden Sicherheitsstatusanalyse und Leitfaden Probabilistische Sicherheitsanalyse (einschließlich nachgeordneter Dokumente)

Die Details der ingenieurtechnischen Auslegung von Anlagenteilen und baulichen Anlagen sind in den Teilen 3 und 4 der KTA 2201 geregelt.

Tab. 3-1 Untergliederung der KTA-Regel 2201 /KTA 90/ zu Erdbeben

KTA 2201: Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen	
Teil 1	Grundsätze
Teil 2	Baugrund
Teil 3 (Entwurf)	Auslegung der baulichen Anlagen
Teil 4	Anforderungen an Verfahren zum Nachweis der Erdbebensicherheit für maschinen und elektrotechnische Anlagenteile
Teil 5	Seismische Instrumentierung
Teil 6	Maßnahmen nach Erdbeben

Die Bewertung der Erdbebenauslegung im Rahmen der (Periodischen) Sicherheitsüberprüfungen erfolgt auf deterministischer und probabilistischer Basis. Für die probabilistische Bewertung ist gemäß dem PSA-Methodenband /FAK 05/ ein gestaffeltes Verfahren vorgesehen (siehe **Tab. 3-2**).

Tab. 3-2 Gestaffeltes Vorgehen bei der probabilistischen Erdbebenanalyse

Intensität I	Gestaffelte Nachweisführung	Anmerkung
$I \leq 6$	Keine Analyse erforderlich	Entsprechend KTA 2201, Teil 3, Kap. 2.3
$6 < I \leq 7$	Zunächst ist eine Anlagenbegehung durchzuführen. Sollte diese Hinweise auf unzureichende Margen zur Abtragung von Erdbebenlasten ergeben, so sind diese auf der Grundlage vorliegender Nachweise zu bewerten. Gegebenenfalls sind weitere Untersuchungen oder Maßnahmen zur Sicherheitsverbesserung erforderlich.	
> 7	Erdbeben-Sicherheitsanalyse nach dem Sicherheitsreservefaktor-Verfahren	

Die vollständige Analyse nach dem Sicherheitsreservfaktorverfahren gliedert sich in drei Hauptschritte:

1. Durchführung einer Erdbebengefährdungsanalyse,
2. Durchführung einer Versagensanalyse für Gebäudestrukturen, Komponenten und Systeme durch Ermittlung der Nachweismargen und der Wahrscheinlichkeit, dass sie erdbebenbedingt versagen,
3. Erstellung der Ereignisbäume für die erdbebeninduzierten auslösenden Ereignisse und Berechnung der Eintrittshäufigkeit von Gefährdungszuständen.

Dabei wird vorausgesetzt, dass die betrachtete Anlage gegen das am Standort gültige Bemessungserdbeben ausgelegt ist und dass dafür entsprechende Nachweise vorliegen. Es wird ferner davon ausgegangen, dass eine aktuelle Erdbebengefährdungsanalyse vorhanden ist.

Ziel des Sicherheitsreservfaktorverfahrens ist es, die in den ursprünglichen Nachweisen aufgrund konservativer Annahmen und Vereinfachungen insgesamt gegebene Sicherheitsreserven zu ermitteln und auf dieser Basis Aussagen über die Versagenswahrscheinlichkeit von Systemen und Komponenten für Erdbeben höherer Intensität (und geringerer Eintrittshäufigkeit) als das Bemessungserdbeben zu machen.

Da die Anforderung, Einwirkungen von außen probabilistisch zu behandeln, erst im Jahr 2005 in den PSA-Leitfaden /BMU 05/ und den PSA-Methodenband /FAK 05/ aufgenommen wurde, liegen bis auf die Untersuchungen im Rahmen der Deutschen Risikostudie Kernkraftwerke, Phase B, /GRS 90/ bisher noch keine Erfahrungen mit derartigen Analysen vor². Aktuell werden jedoch in zwei deutschen Kernkraftwerken seismisch PSA durchgeführt, so dass in naher Zukunft mit ersten Erfahrungen aus der Praxis zu rechnen ist.

Das im PSA-Methodenband /FAK 05/ beschriebene Vorgehen zur Durchführung einer seismischen PSA nach dem Sicherheitsreservfaktorverfahren folgt im Wesentlichen den Untersuchungen in /HOF 96/, welche wiederum auf Entwicklungsarbeiten in den

USA (/NRC 83/, /NRC 85/, /PLG 83/) basieren. Über aktuellere internationale Methodik, Anwendungen und Bewertungen des Verfahrens wird beispielsweise in /BUD 98/, /NEA 98/, /NEA 99/, /KAN 00/ und /NIS 00/ berichtet. Auf der Basis der umfangreichen Erfahrungen wurde inzwischen in den USA ein Standard zur Durchführung probabilistischer Analysen für EVA (Einwirkungen von außen)-Ereignisse entwickelt, der eine Anleitung zur Durchführung des Sicherheitsreservefaktorverfahrens beinhaltet /ANS 03/.

3.2 Vorgehensweise

Bei der seismischen PSA handelt es sich zwar um eine etablierte und in vielen Ländern angewandte Vorgehensweise zur Bewertung der Sicherheit kerntechnischer Anlagen im Hinblick auf Erdbebeneinwirkungen /NEA 03/. Die Methodik an sich ist jedoch relativ jung und unterliegt daher einer ständigen Weiterentwicklung, so dass die in der Praxis zur Anwendung kommenden Verfahren im Allgemeinen erst mit einer gewissen Verzögerung Eingang in die relevanten Literaturquellen (speziell Regeln und Richtlinien) finden. Aus diesem Grund wurde der Teilnahme an Konferenzen und der Mitwirkung in entsprechenden Arbeitsgremien zur Ermittlung des aktuellen Standes von Wissenschaft und Technik auf dem Gebiet der SPSA gegenüber einer Literaturrecherche grundsätzlich der Vorzug gegeben. Die Fachliteratur wurde jedoch als ergänzende Informationsquelle herangezogen.

Als besonders nützlich für das Erreichen der gesetzten Ziele haben sich insbesondere die folgenden Veranstaltungen und damit verbundenen Arbeiten erwiesen:

- Sitzungen des Facharbeitskreises PSA (halbjährlich),
- Sitzungen des KTA Arbeitsgremiums zur Überarbeitung des ersten Teils der KTA-Regel 2201 (AG KTA 2201.1),
- Sitzungen der OECD/CSNI/IAGE Sub-Group on the Seismic Behaviour of Structures (jährlich),

² Die Arbeiten in /GRS 90/ stützten sich zwar auf probabilistische Methoden, jedoch würde die damalige Vorgehensweise heute nicht mehr den Ansprüchen an eine seismische PSA genügen. Daher wird auf diese Arbeiten im Weiteren nicht explizit eingegangen.

- Specialist Meeting on the Seismic Probabilistic Safety Assessment of Nuclear Facilities (OECD/NEA Workshop, November 2006 /NEA 06/),
- 19th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 19, August 2007)

Während im Rahmen der Veranstaltungen der OECD/NEA/CSNI verifiziert werden konnte, dass die deutsche Vorgehensweise zur SPSA grundsätzlich dem internationalen Stand von Wissenschaft und Technik entspricht, wurden durch die Diskussionen und Vorträge im Facharbeitskreis PSA vorhandene Defizite der Beschreibung der Vorgehensweise im PSA-Methodenband (insbesondere hinsichtlich des Detaillierungsgrades) offensichtlich.

3.3 Ergebnisse

Aus dem Abgleich der im PSA-Methodenband beschriebenen Vorgehensweise der SPSA mit der deutschen und internationalen Praxis hat sich ergeben, dass die Durchführung der SPSA gemäß dem PSA-Methodenband einerseits von der zugrunde liegenden Methodik her dem internationalen Stand von Wissenschaft und Technik entspricht, dass die Darstellung des Vorgehens im Methodenband zum PSA-Leitfaden /FAK 05/ jedoch nicht detailliert genug ist, um zu gewährleisten, dass dementsprechend durchgeführte Analysen den Anforderungen hinsichtlich Nachvollziehbarkeit und Vergleichbarkeit, vollständig genügen /THU 07/. Auf diese beiden Aspekte wird in den folgenden Abschnitten näher eingegangen.

3.3.1 Internationaler Stand der SPSA

Die SPSA wird international als ein probates Mittel zur Bewertung der Sicherheit von bestehender Kernkraftwerke im Hinblick auf seismische Einwirkungen betrachtet /NEA 03/. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf der Identifizierung von Schwachstellen und der wirtschaftlichen Planung von Verbesserungsmaßnahmen (z. B. /MUR 06/). Als Mittel der kerntechnischen Aufsicht findet die SPSA jedoch in den meisten Ländern höchstens als Ergänzung zu den bestehenden deterministischen Vorgehensweisen Anwendung (z. B. /MUR 06a/, /YON 06/).

Im Hinblick auf seismische Einwirkungen stellt das Vorgehen in Japan, als einem der am stärksten von Erdbeben betroffenen Länder, einen gewissen Referenzmaßstab dar. Aus diesem Grund wird im Folgenden zunächst kurz die Situation bezüglich der probabilistischen Behandlung seismischer Einwirkungen in Japan dargestellt:

Grundsätzlich basiert das japanische kerntechnische Regelwerk auf einem deterministischen Ansatz, der sich aus der "Defense-in-depth"-Philosophie ableitet und auf Bewertungen nach ingenieurtechnischen Kriterien stützt. Probabilistische Methoden sollen jedoch nach und nach als Ergänzung zu den deterministischen Regelungen Eingang in das bestehende Regelwerk finden /NSC 03/, wobei ein schrittweises Vorgehen geplant ist (zunächst in den Bereichen Betrieb und Instandsetzung sowie bei der seismischen Auslegung). Ziel dieser Einführung probabilistischer Methoden ist es, die Konsistenz und Nachvollziehbarkeit der sicherheitstechnischen Anforderungen zu erhöhen sowie die Effizienz der kerntechnischen Aufsicht durch eine Fokussierung der Ressourcen auf relevante Themengebiete zu steigern.

Obwohl der Bereich der Erdbebenauslegung einer der ersten sein soll, in welchem probabilistische Methoden zur Anwendung kommen, beschränken sich die diesbezüglichen Änderungen in der Überarbeitung des Regulatory Guide for Seismic Design /NSC 06/ darauf, eine Quantifizierung der Überschreitenswahrscheinlichkeit des Auslegungserdbebens (design-basis-earthquake-ground-motion, DBEGM) zu fordern, um zusätzliche Informationen über die Konservativität der Wahl der DBEGM zu erhalten /NSC 06a/. Eine (eingeschränkt) probabilistische Behandlung³ ist somit nur auf der Einwirkungsseite (seismische Gefährdungsanalyse) erforderlich. Die Behandlung der Widerstandsseite (Abtragung der Erdbebenlasten durch die Anlage) erfolgt weiterhin deterministisch, so dass auch die neue Fassung der Richtlinie insgesamt als deterministisch anzusehen ist.

³ Die Ermittlung einer Überschreitenswahrscheinlichkeit bzw. die Bezugnahme auf eine solche ist bei vielen Einwirkungen von außen üblich. Hierbei handelt es sich jedoch in der Regel nicht um probabilistische Analysen im eigentlichen Sinne sondern um "statistische" Analysen, d. h. die Extrapolation der Beobachtungsdaten hin zu Ereignissen geringerer Häufigkeit und größerer Intensität.

Während es in Japan von regulatorischer Seite somit keine Anforderungen bzw. Vorgaben zur Durchführung einer SPSA gibt, wurde von den Betreibern mittlerweile ein Leitfaden für die Durchführung probabilistischer Erdbebenanalysen erstellt /HIR 06/. Dieser ist bislang jedoch nur in Japanisch verfügbar, so dass sein Inhalt derzeit nicht weiter bewertet werden kann.

Als Beispiel für ein Land mit ähnlichen seismo-tektonischen Verhältnissen wie Deutschland, d. h. geringer, vorwiegend diffus verteilter seismischer Aktivität, kann Frankreich herangezogen werden. Auch hier ist das kerntechnische Regelwerk hinsichtlich der seismischen Auslegung und Bewertung grundsätzlich deterministisch. Insbesondere wird auch für die Bestimmung des Sicherheitserdbebens (Séismes Majorés de Sécurité, SMS)⁴ ein rein deterministischer Ansatz verfolgt /ASN 01/. Das Regelwerk zur Durchführung probabilistischer Sicherheitsanalysen lässt jedoch die Berücksichtigung seismischer Einwirkungen im Sinne einer "kann"-Formulierung zu /ASN 02/.

Neben den Ländern, in denen eine seismische PSA von regulatorischer Seite nicht gefordert wird, gibt es jedoch auch Staaten, die die SPSA bereits in ihr kerntechnisches Regelwerk integriert haben. Im Schweizer Regelwerk wird z. B. die Betrachtung anlagenexterner auslösender Ereignisse im Rahmen der PSA pauschal gefordert, so dass hier eine seismische PSA implizit eingeschlossen ist /HSK 01/. In diesem Zusammenhang ist die von 2001 bis 2004 für die Schweizer Kernkraftwerkstandorte durchgeführte seismische Gefährdungsanalyse von besonderem Interesse, da in der Fachwelt lange über die dort angewandte Methodik und die teilweise überraschenden Resultate diskutiert wurde bzw. immer noch diskutiert wird:

⁴ Das SMS wird deterministisch definiert als ein Erdbeben, das am Standort zu einer um eine Stufe höheren makroseismischen Intensität führt als das SMHV (Séismes Maximaux Historiquement Vraisemblables). Das SMHV wiederum wird analog der Vorgehensweise zur Bestimmung des Bemessungserdbebens gemäß /KTA 90/ ermittelt, wobei jedoch nur tatsächlich aufgetretene Erdbeben ohne Sicherheitszuschläge betrachtet werden.

Gegen Ende der 90er Jahre wurden die Betreiber der Schweizer Kernkraftwerke von der Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK) aufgefordert, seismische Standortgefährdungsanalysen durchzuführen, die den Anforderungen einer SSHAC (Senior Seismic Hazard Analysis Committee) Level 4 Studie⁵ /NRC 97a/ entsprechen. Mit der Planung, Organisation und Durchführung dieser PEGASOS (Probabilistische Erdbebengefährdungsanalyse für die KKW-Standorte in der Schweiz) genannten Studie /NAG 04/ wurde von den Betreibern die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA) beauftragt. Insgesamt waren an dem Projekt mehr als 20 Experten aus 7 europäischen Ländern und den USA beteiligt, die von weiteren 25 Beratern unterstützt wurden. Die Begutachtung der Gefährdungsanalyse durch die HSK erfolgte dabei projektbegleitend. Nach längeren Vorarbeiten (seit 1999) wurde das Projekt 2001 offiziell gestartet und konnte drei Jahre später abgeschlossen werden. /ZUI 06/

Die Vorgehensweise zur Ermittlung der seismischen Gefährdung im Rahmen der PEGASOS-Studie basiert auf einem Logic-Tree-Ansatz, mit dem alle nach wissenschaftlicher Einschätzung zu unterstellenden Möglichkeiten einschließlich der damit verbundenen Unsicherheiten erfasst werden sollen. Um das Projekt besser zu strukturieren, wurden vier Teilprojekte definiert:

- (SP1) seismische Quellen,
- (SP2) Bodenbewegung,
- (SP3) Standorteffekte und
- (SP4) Berechnung der seismischen Gefährdung.

⁵ Die vier Stufen der SSHAC-Methodologie zur Ermittlung der seismischen Standortgefährdung lassen sich in kurzen Stichworten wie folgt beschreiben:

- (1) Literaturrecherche durch einen sogenannten Technical Integrator (TI),
- (2) zusätzlich Gespräche des TI mit Seismologen und Geologen,
- (3) Veranstaltung von Workshops mit Seismologen und Geologen zur Unterstützung des TI,
- (4) Bewertung unmittelbar durch ein Panel aus Seismologen und Geologen.

Resultierend aus den unterschiedlichen Vorgehensweisen unterscheiden sich die vier Stufen erheblich hinsichtlich des erforderlichen organisatorischen und finanziellen Aufwands. In /NRC 97a/ wird daher darauf hingewiesen, dass entsprechend den Anforderungen an die seismische Gefährdungsanalyse eine angemessene Stufe auszuwählen ist.

Innerhalb der ersten drei Teilprojekte wurden von den Experten unabhängig voneinander Ereignisbäume aufgestellt. Diese sollten nicht die persönliche Meinung des jeweiligen Experten widerspiegeln, sondern seine Einschätzung der Meinung der Fachwelt. Anschließend wurden aus den Zweigen der verschiedenen Ereignisbäume nach statistischen Methoden die Gefährdungskurven (Bodenbeschleunigung - Überschreitungswahrscheinlichkeit) und Bodenantwortspektren (Bodenbeschleunigung - Frequenz) für die Standorte ermittelt.

Nach Abschluss der Arbeiten wurde die Plausibilität der ermittelten Standortgefährdungen, der grundsätzlichen Methodik und der praktischen Umsetzung im Rahmen von PEGASOS durch die Betreiber, die in die Abwicklung des Projekts nicht einbezogen waren, um eine Beeinflussung der Experten zu verhindern, bewertet und mit anderen SPSA verglichen. Die hieraus resultierende Kritik der Betreiber (vgl. /KLÜ 05/ und /KLÜ 05a/) führte zu den bereits angesprochenen lange anhaltenden Diskussionen in der Fachwelt sowie zur Initiierung eines Workshops durch die OECD/NEA, der sich mit der Problematik der Gefährdungsanalyse in Regionen mit geringer Seismizität befasst /NEA 06a/. Weiterhin war das Ergebnis der durchaus kontroversen Diskussionen, dass es ein Nachfolgeprojekt zu PEGASOS, das sogenannte PEGASOS Refinement Project, geben wird, in welchem die Unsicherheiten, die zu den unerwartet hohen Gefährdungswerten führten, durch zusätzliche Untersuchungen des Untergrundes an den Standorten und in deren Umgebung reduziert werden sollen (persönliche Information von M. Richner, NOK, und J.-U. Klügel, Kernkraftwerk Gösgen, im Rahmen des OECD/NEA Workshops 2006).

Die USA nehmen hinsichtlich der Nutzung probabilistischer Methoden zur Beurteilung der seismischen Auslegung eine Sonderstellung ein: Während das Regelwerk /NRC 08/ prinzipiell auch deterministische Analysen für seismische Fragestellungen zulässt, und somit die Durchführung von SPSA in den USA nicht zwingend erforderlich ist, stellen die NRC (Nuclear Regulatory Commission) mit den Richtlinien /NRC 97/ und /NRC 07/ sowie ANSI (American National Standard Institute) mit /ANS 03/ ausführliche Anleitungen zur Durchführung probabilistischer seismischer Gefährdungsanalysen bereit. Allerdings muss betont werden, dass in den Regulatory Guides /NRC 97/, /NRC 07/ nur die Einwirkungsseite behandelt wird; auf die Widerstandsseite, d. h. die Bewertung der Auslegung, geht nur /ANS 03/ ein. Die praktische Handhabung im U.S.-amerikanischen Aufsichtsverfahren stellt sich so dar, dass den Betreibern frei gestellt wird, zur Bewertung seismischer Fragestellungen deterministisch oder probabilistisch vorzugehen. Nur wenn eine probabilistische Vorgehensweise gewählt wird, sind die

entsprechenden Regulatory Guides für die Durchführung der Untersuchungen binden (Information von A. Murphy, NRC im Rahmen der SMiRT 19-Konferenz).

Insgesamt ist festzustellen, dass es sich hier um eine relativ junge Analysemethode, die noch nicht in vollem Umfang als ausgereift bezeichnet werden kann (Einschätzung auf Grundlage der Diskussionen im Rahmen des Specialists Meeting on Seismic Probabilistic Safety Assessment (SPSA) of Nuclear Facilities), obwohl in den letzten Jahren zahlreiche SPSA (mit sehr unterschiedlichem Detaillierungsgrad) durchgeführt wurden. Dies darf vermutlich auch als der Grund dafür angesehen werden, dass sie bisher nicht in allen Ländern Eingang in die nationalen Regelwerke gefunden hat.

Auch im Regelwerk der IAEA wird die seismische PSA nicht ausführlich behandelt. Grobe Vorgaben, wie eine SPSA grundsätzlich durchzuführen ist, finden sich in dem bisher nur als Entwurf vorliegendem Safety Guide "Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants" /IAE 08/.

Dort wird die PSA für Einwirkungen von außen generell in vier bis fünf Hauptschritte unterteilt:

- (1) Sammlung der verfügbaren Informationen zu Einwirkungen von innen und außen,
- (2) Ermittlung aller am Standort möglichen Einwirkungen einschließlich eventueller Einwirkungskombinationen,
- (3) qualitatives und quantitatives Auswahlverfahren (Screening) zur Identifizierung sicherheitstechnisch relevanter Einwirkungen,
- (4) Grobanalyse und/oder
- (5) detaillierte Untersuchungen.

Die ersten drei Schritte werden nur allgemein angesprochen, während die Grobanalyse bzw. die detaillierten Untersuchungen einwirkungsspezifisch behandelt werden.

Ziel der Grobanalyse ist es, den Aufwand der PSA für Einwirkungen von außen zu reduzieren. Hierzu ist für jede nach dem Screening verbliebene Einwirkung mit vereinfachten konservativen Methoden zu überprüfen, ob ihr Beitrag zum Kernschadensrisiko

gegenüber anderen Einwirkungen oder anlageninternen Ereignissen ggf. vernachlässigt werden kann. Im Einzelnen beinhaltet die Grobanalyse folgende Aspekte:

- Ermittlung der Häufigkeit der Einwirkung (mit dem jeweiligen Intensitätsniveau),
- Untersuchung der Auswirkungen auf die Anlage,
- Untersuchung der Widerstandsfähigkeit relevanter Anlagenteile,
- PSA Modell der Stufe 1 für anlageninterne Ereignisse.

Obwohl seismische Einwirkungen oft einen nennenswerten Beitrag zur Kernschadenshäufigkeit liefern und daher im Allgemeinen eine detaillierte Untersuchung erforderlich ist, wird explizit darauf hingewiesen, dass für Einwirkungen auf niedrigem Intensitätsniveau eine Grobanalyse ausreichend sein kann (vergleiche hierzu das in Abschnitt 3.1 beschriebene gestaffelte Vorgehen gemäß /FAK 05/).

Die Behandlung der konkreten Vorgehensweise bei der SPSA konzentriert sich auf die Parametrisierung der Erdbebeneinwirkung, die Ermittlung der Eintrittshäufigkeiten, die Versagensanalyse für Bauwerke und Komponenten, die Einbindung der SPSA in die PSA der Stufe 1 für anlageninterne Ereignisse und die Dokumentation.

Hinsichtlich der **Parametrisierung** wird darauf hingewiesen, dass sofern ein einzelner Parameter, wie beispielsweise die Bodenbeschleunigung, zur Charakterisierung der Erdbebeneinwirkung herangezogen wird, bei der Betrachtung möglicher individueller Auswirkungen auch andere Parameter (z. B. Frequenzinhalt der Bodenerschütterung oder geotechnische Auswirkungen wie Bodenverflüssigung) zu berücksichtigen sind, da diese sehr unterschiedliche Auswirkungen auf mögliche Ereignisabläufe haben können.

Für die Ermittlung der **Eintrittshäufigkeit** von Erdbeben unterschiedlicher Intensität ist eine standortspezifische probabilistische seismische Gefährdungsanalyse (Probabilistic Seismic Hazards Analysis, PSHA) auf der Grundlage aktueller Daten durchzuführen. (Der PSA-Methodenband /FAK 05/ setzt das Vorhandensein einer aktuellen seismischen Gefährdungsanalyse ebenfalls voraus.) Die einzelnen Vorgaben hinsichtlich der zu berücksichtigenden Daten und der Vorgehensweise bei der PSHA entsprechen im Wesentlichen dem in der Seismologie allgemein üblichen Standard (Information von

G. Leydecker, ehemals BGR, und G. Grünthal, GFZ Potsdam, im Rahmen der Sitzungen der AG KTA 220.1), wie er auch in zusammengefasster Form in der Neufassung der KTA2201 Teil 1 /KTA 08/ beschrieben wird.

Als erster Schritt der **Versagensanalyse für Bauwerke und Komponenten** wird eine Anleitung gegeben, welche Bauwerke und Komponenten mindestens berücksichtigt werden sollten. Hierbei wird von der Basiskomponentenliste der PSA der Stufe 1 für anlageninterne Ereignisse ausgegangen. Anschließend sind für alle relevanten Ausfallarten bzw. Versagensformen die Versagenswahrscheinlichkeiten auf der Basis zunächst anlagenspezifischer und zusätzlicher generischer Daten zu ermitteln. Hierbei sollen für besonders empfindliche Bauwerke und Komponenten vorzugsweise anlagenspezifische Daten verwendet werden bzw. nur solche generische Daten, die sorgfältig auf ihre Übertragbarkeit geprüft wurden.

Im Zusammenhang mit der Ermittlung der relevanten Ausfallarten und Versagenswahrscheinlichkeiten wird die Bedeutung von Anlagenbegehungen und der Berücksichtigung von Sekundäreffekten und Folgeereignissen (wie Überflutung oder Brand) sowie Wechselwirkungen zwischen den Bauwerken und Komponenten besonders herausgestellt.

Während des gesamten Prozesses der Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeiten sind die mit der seismischen Bodenbewegung sowie den Boden- und Bauwerkseigenschaften verbundenen Unsicherheiten angemessen zu berücksichtigen.

Die grundsätzlichen Anforderungen für die Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeiten von Bauwerken und Komponenten, wie sie hier kurz zusammengefasst wurden, finden sich grundsätzlich auch im Methodenband /FAK 05/ zum deutschen PSA-Leitfaden. Allerdings ist die Beschreibung der konkreten Vorgehensweise nicht detailliert genug, um unterschiedliche Interpretationen der Anforderungen durch den Anwender zu vermeiden. (Dies trifft auch für die Darstellung in /IAE 08/ zu.)

Große Bedeutung wird in /IAE 08/ auch der **Einbindung der SPSA in PSA der Stufe 1 (Level 1 PSA) für anlageninterne Ereignisse** beigemessen. Ausgangspunkt sind hier die Ereignisabläufe der Level 1 PSA für anlageninterne Ereignisse, die um erdbebenspezifische Zweige zu ergänzen und an die besonderen Bedingungen der SPSA anzupassen sind. Insbesondere sollen (erdbebenspezifische) auslösende Ereignisse berücksichtigt werden, die

- (i) zum Versagen großer Komponenten,
- (ii) zu Kühlmittelverluststörfällen jeglicher Art oder
- (iii) zu Transienten

führen. Zusätzlich sind die Ereignisbäume um weitere Komponenten und Fehlermoden zu ergänzen, die in der PSA sonst nicht betrachtet werden, wie beispielsweise das Versagen passiver Komponenten.

Eine weitere Besonderheit bei der SPSA ist, dass Bauwerksschäden Rückwirkungen auf Komponenten in dem betroffenen Gebäude haben können, die in den Ereignisabläufen entsprechend modelliert werden müssen. Darüber hinaus sind auch Personalhandlungen - insbesondere, wenn Notfallmaßnahmen erforderlich sind - entsprechend in das PSA-Modell zu integrieren. Hierbei ist insbesondere auf eine angemessene Berücksichtigung der Zugänglichkeit von Komponenten, des erhöhten Stressfaktors und fehlerhafter Anzeigen zu achten.

Bei der abschließenden Quantifizierung der Kernschadenzustände im Rahmen der SPSA sind wiederum die Unsicherheiten der Eingabeparameter (z. B. Überschreitungswahrscheinlichkeiten bestimmter Erdbebenintensitätsniveaus oder Versagenswahrscheinlichkeiten von Komponenten) und ihre Fortpflanzung in den einzelnen Zweigen des Ereignisbaums konsistent zu berücksichtigen.

Die Frage, wie der Tatsache, dass man im Falle einer SPSA nicht mit normalen Versagenskurven für Bauwerke, Systeme und Komponenten (BSK) konfrontiert ist wie bei der PSA der Stufe 1 für anlageninterne Ereignisse, sondern aufgrund der kontinuierlichen Intensitätsverteilung der zu unterstellenden Erdbeben mit Versagenskurvenscharen, Rechnung zu tragen ist, wird in /IAE 08/ genau so wenig behandelt wie in

/FAK 05/ (vgl. Abschnitt 3.3.2). Hieraus ergibt sich ein großer Spielraum für die praktische Umsetzung der Vorgaben. Da a priori nicht einzuschätzen ist, ob die Qualität einer SPSA von der Art der Umsetzung dieses Schrittes abhängt, stellt diese Lücke in der Beschreibung ein Defizit sowohl im deutschen als auch im Regelwerk der IAEA dar (vgl. dazu auch Abschnitt 3.3.2.4).

Als letzter Aspekt wird in /IAE 08/ die **Dokumentation** der PSA für Einwirkungen von außen erörtert. Dabei wird auf die Notwendigkeit der Bereitstellung der folgenden Informationen im Rahmen einer SPSA besonders hingewiesen:

- Methodik
 - Methoden zur Ermittlung der seismischen Einwirkung und relevante (Modell-)Annahmen,
 - Kriterien für die Auswahl der zu berücksichtigenden Bauwerke, Systeme und Komponenten,
 - Vorgehensweise der Anlagenbegehung einschließlich der Zusammensetzung des Teams und der Ergebnisse sowie Schlussfolgerungen aus der Anlagenbegehung,
 - Anpassungen des Modells der PSA der Stufe 1 für seismische Einwirkungen,
- Daten
 - Liste der berücksichtigten Bauwerke, Systeme und Komponenten,
 - Festigkeitswerte der BSK,
 - Schadenshäufigkeiten der BSK unter allen modellierten seismischen Einwirkungen,
 - dominante Ausfallarten bzw. Versagensformen der BSK,
 - Aufstellungsorte der BSK,
 - Wechselwirkungen zwischen den BSK.

Soweit die Ausführungen in /IAE 08/ zur SPSA.

Insgesamt ist festzustellen, dass in den zugänglichen Regelwerken anderer Länder und der IAEA die probabilistische Analyse der Widerstandsseite meist relativ allgemein und kurz behandelt wird, während der seismischen Gefährdungsanalyse (Einwirkungsseite) mehr Beachtung geschenkt wird. Insofern sollte man annehmen, dass in dieser Richtung weitere Entwicklungen stattfinden. Durch die Kontroversen um die Ergebnisse der Schweizer PEGASOS-Studie /NAG 04/ verhält es sich jedoch genau umgekehrt:

Die methodischen Fragen hinsichtlich der Behandlung der Widerstandsseite (Versagensanalyse der Bauwerke, Systeme und Komponenten sowie Aufstellung und Quantifizierung der erdbebenspezifischen Ereignisbäume) sind in der internationalen Diskussion derzeit eher in den Hintergrund getreten. Dies ist insofern verständlich und berechtigt, als die Ergebnisse der seismischen Gefährdungsanalyse aufgrund der großen Unsicherheiten /VIA 07/ nach den neusten Erkenntnissen zu so großen anzunehmenden Einwirkungen (nach früherem Sprachgebrauch: Lasten) führen, dass die Ergebnisse der SPSA eindeutig von der Gefährdungsanalyse dominiert werden (Information von M. Richner, NOK, im Rahmen der SMiRT 19-Konferenz). Ohne auf die seismologischen Details einzugehen sei angemerkt, dass Gefährdungsanalysen in Gebieten geringer seismischer Aktivität (wie z. B. der Schweiz, Frankreich oder Deutschland) mit besonders großen Unsicherheiten behaftet sind /VIA 07/, /KLÜ 05/.

Für die Behandlung der Widerstandsseite sind die Erkenntnisse im Bereich der Gefährdungsanalysen (insbesondere für Gebiete mit geringer Seismizität) insofern interessant, als sich in einigen Fällen nicht nur ein allgemein höheres Niveau der anzusetzenden Bodenbeschleunigung ergibt, sondern die spektrale Verteilung der Beschleunigung (Bodenantwortspektrum, Darstellung der Bodenbeschleunigung in Abhängigkeit von der Frequenz der Schwingung) aufgrund des dominanten Beitrags hypothetischer standortnaher Erdbeben auch zu höheren Frequenzen hin verschoben wird /SHE 03/.

Für den zweiten Schritt der SPSA (Versagensanalyse der Bauwerke, Systeme und Komponenten, vgl. Abschnitt 3.1) gibt es zwar unterschiedliche Ansätze, wie die relevanten Etagenantwortspektren berechnet (u. a. /NRC 78/) und die Versagenswahrscheinlichkeiten von BSK bestimmt werden (z. B. /EPR 94/), die zur Anwendung kommenden Verfahren werden jedoch meist auch im konventionellen Bereich eingesetzt und können somit als wohl erprobt und bewährt betrachtet werden (Beispiele für die Behandlung von Rohrleitungen finden sich beispielsweise in /STE 07/). Hinsichtlich der

Aufgabenstellung resultieren somit für diesen Schritt der SPSA keine relevanten neuen Erkenntnisse. Hiervon ausgenommen ist die vorgelagerte Auswahl der Komponenten, für welche erdbebenspezifische Versagenswahrscheinlichkeiten zu berechnen sind. Diesbezüglich weist die deutsche Vorgehensweise entsprechend dem Methodenband /FAK 05/ des PSA-Leitfadens zwar keine Defizite gegenüber den Vorgehensweisen in anderen Ländern auf, jedoch muss die Beschreibung im PSA-Methodenband, wie in Abschnitt 3.3.2.1 erläutert, konkretisiert werden.

Ähnlich stellt sich die Situation im Hinblick auf die Aufstellung und Quantifizierung von erdbebenspezifischen Ereignisbäumen (Schritt 3, vgl. Abschnitt 3.1) dar. Auch hier kommen international unterschiedliche Methoden zur Anwendung. Da die deutsche Vorgehensweise ihren Ursprung in dem Verfahren nach /NRC 89/ hat (siehe auch /FAK 05/), und dieses auch heute noch eine akzeptable Vorgehensweise darstellt /KAN 00/, ist auch hier kein grundsätzliches Defizit zu erkennen. Der in den Abschnitten 3.3.2.2, 1.1.1.1 und 3.3.2.4 angesprochene Entwicklungsbedarf hinsichtlich der Aufstellung und Quantifizierung erdbebenspezifischer Ereignisbäume und der Berücksichtigung seismischer Abhängigkeiten bezieht sich auf die konkrete Umsetzung im Rahmen der PSA.

3.3.2 Beschreibung der Vorgehensweise im Fachband zu PSA-Methoden des PSA-Leitfadens

Wie bereits in Abschnitt 3.1 angesprochen, ist die probabilistische Untersuchung der Auswirkungen von Erdbeben seit dem Jahr 2005 verbindlicher Bestandteil der (periodischen) Sicherheitsüberprüfung deutscher Kernkraftwerke /BMU 05/. Um einen qualitativen Mindeststandard hinsichtlich der Vergleichbarkeit und Nachvollziehbarkeit derartiger Analysen sicherzustellen wird im Fachband zu PSA-Methoden /FAK 05/ des PSA-Leitfadens ein Verfahren für die SPSA vorgegeben, das auf deutschen (/HOF 96/) und amerikanischen (/NRC 83/, /NRC 85/, /PLG 83/) Entwicklungsarbeiten zur Durchführung von Versagensanalysen für Bauwerke und Komponenten unter seismischer Belastung basiert.

Wie sich im Rahmen der Diskussionen im Facharbeitskreis PSA gezeigt hat, bei denen auch erste Zwischenergebnisse einer nach den Vorgaben des PSA-Methodenbandes durchgeführten SPSA präsentiert wurden /TIE 06/, reichen die Vorgaben in der jetzigen Form noch nicht aus, um insbesondere das erste Ziel, die Vergleichbarkeit unter-

schiedlicher SPSA, zu erreichen. Der Grund hierfür ist einerseits ein zu geringer Detaillierungsgrad der Beschreibung, was zu entsprechend großen Interpretationsspielräumen hinsichtlich der praktischen Umsetzung führt. Andererseits fehlen in Deutschland auch teilweise die methodischen Grundlagen für die konkrete Umsetzung der Anforderungen. Dies hat zur Folge, dass ausländische Firmen, die zwar Erfahrung mit der Durchführung seismischer PSA haben, aber mit den landesspezifischen Besonderheiten (z.B. Anforderungen hinsichtlich der Nachvollziehbarkeit) nicht genügend vertraut sind, beauftragt werden müssen, was zu unnötigen Komplikationen bei der Abwicklung des gesamten Prozesses (Durchführung der SPSA und deren Begutachtung) führt.

Um die Schwächen des PSA-Methodenbandes hinsichtlich der Vorgaben zur SPSA zu beheben, sind Weiterentwicklungen bzw. Präzisierungen der Beschreibung bezüglich der folgenden Arbeitsschritte der Erdbeben-PSA erforderlich:

- (1) Auswahl der detailliert zu analysierenden Bauwerke, Systeme und Komponenten,
- (2) Aufstellung der erdbebenspezifischen Ereignisbäume,
- (3) Behandlung ähnlicher Komponenten unter gleicher seismischer Einwirkung (Korrelation) und
- (4) Quantifizierung der Ereignisabläufe (Ermittlung der erdbebenbedingten Kernschadenshäufigkeiten).

Die Probleme in den einzelnen Themengebieten sowie mögliche Lösungsansätze und eingeleiteten Schritte zur Beseitigung der Defizite werden in den folgenden Abschnitten ausführlicher dargestellt.

3.3.2.1 Auswahlverfahren

Das Auswahlverfahren stellt insofern einen kritischen Schritt in der SPSA dar, als Erdbebenwirkungen einerseits die gesamte Anlage betreffen, es jedoch andererseits nicht möglich ist, für alle betroffenen Anlagenteile (Bauwerke, Systeme und Komponenten) eine vertiefte Versagensanalyse durchzuführen. Durch das Auswahlverfahren soll dementsprechend sichergestellt werden, dass sich der Aufwand einer SPSA in einem

praktikablen Rahmen hält und dennoch alle für eine Versagensanalyse relevanten Anlagenteile und die für das Versagen relevanten Ausfalleffekte berücksichtigt werden.

Die Beschreibung im PSA-Methodenband /FAK 05/ ist bisher nicht spezifisch genug, um die obigen Anforderungen bei der praktischen Umsetzung zu gewährleisten, da noch erhebliche Ermessensspielräume für den Nutzer verbleiben. Beispielsweise kann eine ungeeignete Reihenfolge bei der Betrachtung der seismischen Widerstandsfähigkeit einzelner Komponenten und deren Beziehung zu anderen Komponenten dazu führen, dass das Versagen einer bestimmten Komponente aufgrund ihrer Auslegung als gering eingeschätzt wird, während der (hier angenommene) sehr wahrscheinliche Ausfall aufgrund einer Sekundäreinwirkung (z. B. Überflutung aufgrund des Versagens eines Behälters im gleichen Raum) aber unberücksichtigt bleibt.

Da die Präzisierung der Vorgaben im PSA-Methodenband einen erheblichen Aufwand erfordert (theoretische Entwicklung einer geeigneten, nachvollziehbaren Vorgehensweise und Erprobung der praktischen Anwendbarkeit an einer Referenzanlage), konnten die dafür erforderlichen Arbeiten nicht im Rahmen dieses Vorhabens abgewickelt werden. Stattdessen wurde ein entsprechender Arbeitspunkt in ein Forschungs- und Entwicklungsvorhaben des BMWi zur Weiterentwicklung von PSA-Methoden (RS 1180) eingebracht /GRS 07/. Mit ersten Ergebnissen dieses Vorhabens zur Thematik der Erdbeben-PSA, die für die Fortschreibung des PSA-Methodenbandes genutzt werden können, ist im Laufe des Jahres 2009 zu rechnen.

Entsprechend dem derzeitigen Stand der Arbeiten im Vorhaben RS 1180 geht das zur Auswahl der relevanten BSK durchzuführende Verfahren zunächst von der Menge aller BSK im Kernkraftwerk aus. Diejenigen BSK, für die im Rahmen einer SPSA Versagenskurven benötigt werden, werden als "relevante BSK" bezeichnet.

In einem ersten Schritt wird die Gesamtmenge der BSK anhand geeigneter systematischer Auswahlkriterien eingeschränkt. Dabei werden nur diejenigen BSK in eine Datenbank übernommen, die bei ihrem Ausfall einen Beitrag zur Häufigkeit der Gefährdungszustände leisten. Diese Menge von BSK wird "BSK-Ausgangsmenge" genannt.

Folgende BSK leisten einen Beitrag zur Häufigkeit der Gefährdungszustände:

- BSK, deren Ausfall direkt oder indirekt dazu beiträgt, ein auslösendes Ereignis hervorzurufen sowie
- BSK, deren Ausfall direkt oder indirekt eine zur Beherrschung von auslösenden Ereignissen erforderliche Sicherheitsfunktion beeinträchtigt.

Eine indirekte Gefährdung kann zum Beispiel auch von BSK der Klasse II ausgehen, indem der Funktionsverlust dieser BSK durch seismische Einwirkung den Ausfall von BSK der Klasse I hervorruft (Klassifizierung der Anlagenteile entsprechend KTA 2201.1 /KTA 90/).

Bei der Auswahl der relevanten BSK ist immer zu berücksichtigen, dass das eigentlich Besondere von seismischen Einwirkungen in dem Potential, GVA oder abhängige Ereignisse hervorzurufen, besteht. Die Bedeutung von Sekundäreffekten ist bei der SPSA erheblich größer als bei einer PSA der Stufe 1 für interne Ereignisse.

Da der Umfang der BSK-Ausgangsmenge voraussichtlich immer noch verhältnismäßig groß ist, sind weitere Auswahlsschritte erforderlich. Diese erfolgen auf Grundlage der spezifischen Eigenschaften der BSK, die in der Datenbank hinterlegt sind. Erst nach dieser weiteren Reduzierung der detailliert zu betrachtenden BSK, können mit vertretbarem Aufwand seismische Versagenswahrscheinlichkeiten bestimmt werden.

3.3.2.2 Ereignisabläufe

Grundsätzlich sind im Rahmen einer SPSA alle Ereignisabläufe zu modellieren, die aufgrund eines Erdbebens in der Anlage auftreten können. Dabei müssen auch eventuelle erdbebenbedingte Folgeereignisse (z. B. Brände, anlageninterne Überflutungen und Lastabstürze) berücksichtigt werden. Im Unterschied zu anlageninternen Ereignissen bei einer PSA der Stufe 1 können bei einer SPSA in Abhängigkeit von der Intensität des Erdbebens jeweils unterschiedliche auslösende Ereignisse (Transienten, Leckstörfälle) auftreten, d. h. die Betrachtung mehrerer Erdbebenintensitäten ist unbedingt erforderlich. Bei der Modellierung der Ereignisabläufe ist zusätzlich, ebenfalls in Abhängigkeit von der Erdbebenintensität, zu berücksichtigen, dass durch Erdbebeneinwirkung die vorgesehenen Möglichkeiten zur Beherrschung auslösender Ereignisse reduziert werden können. Im Extremfall können sogar mehrere Redundanten eines zur

auslegungsgemäßen Beherrschung des Ereignisablaufs erforderlichen Systems durch ein Erdbeben ausfallen. Wie diese komplexe Situation in Fehler- und Ereignisbäume umzusetzen ist, wird im PSA-Methodenband /FAK 05/ nicht in dem erforderlichen Detaillierungsgrad beschrieben.

Da die Struktur der Ereignis- und Fehlerbäume (zusammen mit den Versagenswahrscheinlichkeiten der BSK) die Grundlage für die Quantifizierung der Eintrittshäufigkeit von Gefährdungszuständen bzw. des Kernschadensrisikos sind, hat die Vorgehensweise bei deren Aufstellung erheblichen Einfluss auf das Ergebnis der SPSA. Um eine Vergleichbarkeit unterschiedlicher Erdbeben-PSA zu gewährleisten sind klare Vorgaben für diesen Arbeitsschritt unbedingt erforderlich.

Da die Erarbeitung entsprechender Vorgaben im Rahmen des Vorhabens SR 2547 nicht realisierbar war, wurde hierfür ein separates Vorhaben beim BMU beantragt. In diesem Vorhaben (SR 2614) /GRS 07a/ werden neben der Thematik der Aufstellung der Ereignisbäume auch die in den nächsten beiden Abschnitten beschriebenen Probleme hinsichtlich der Berücksichtigung seismischer Abhängigkeiten und der Quantifizierung der Ereignisabläufe behandelt.

Im Rahmen des Vorhabens SR 2614 wird ein strukturiertes Vorgehen zur Aufstellung erdbebeninduzierter Ereignisabläufe erarbeitet. Dabei wird insbesondere beschrieben, inwieweit die Ergebnisse einer vorliegenden PSA der Stufe 1 für interne Ereignisse berücksichtigt werden können und wie Folgeereignisse (Brand, Überflutung und Lastabsturz) einzubinden sind. Auch die Möglichkeit der Nutzung vereinfachter erdbebenspezifischer Ereignisabläufe wird geprüft. Des Weiteren soll untersucht werden, inwieweit erdbebeninduzierte Ereignisabläufe von der Intensität des Erdbebens abhängen und wie diese Abhängigkeiten zu modellieren sind.

Erste Ergebnisse aus diesem Vorhaben sind im Laufe des Jahres 2009 zu erwarten.

3.3.2.3 Seismische Abhängigkeiten

International besteht bisher kein Konsens, in wie weit eine korreliertes Ausfallverhalten zu unterstellen ist, wenn bauähnliche Komponenten (z. B. identische Pumpen unterschiedlicher Redundanzen eines Systems) vergleichbaren seismischen Einwirkungen (z. B. Aufstellung auf derselben Höhe im Gebäude) ausgesetzt sind. Diese Problematik wird im PSA-Methodenband nicht genügend berücksichtigt. Um jedoch eine Vergleichbarkeit der SPSA in deutschen Kernkraftwerken zu ermöglichen, ist eine wissenschaftlich-technisch tragfähige Lösung für dieses Problem zu finden.

Im Vorhaben SR 2614 (vgl. Abschnitt 3.3.2.2) soll daher eine Methode zur Berücksichtigung von Korrelationen bezüglich des Ausfallverhaltens von Bauwerken, Systemen und Komponenten unter ähnlicher seismischer Einwirkung erarbeitet und in der Modellentwicklung zur Ableitung erdbebenbedingter Ereignisabläufe (vgl. Abschnitt 3.3.2.2) umgesetzt werden.

Ausgangspunkt der Herangehensweise wird sein, dass grundsätzlich die Versagenswahrscheinlichkeiten einer Gruppe von Anlagenteilen, die der gleichen seismischen Einwirkung unterliegen, als unabhängig (nicht korreliert) angenommen werden. Im Auswahlverfahren (vgl. Abschnitt 3.3.2.1) wird bei Begehungen aufgrund noch festzulegender einfacher Merkmale festgestellt, wann von dieser grundsätzlichen Annahme abzuweichen ist. In diesem Fall werden dann die unabhängigen Versagenswahrscheinlichkeiten mit einer zusätzlichen Versagenskurve überlagert, die für das Versagen aller Anlagenteile der Gruppe gilt. In einem solchen Fall sind die Strukturen der Fehlerbäume mit Komponenten der Abhängigkeitsgruppe entsprechend zu ändern.

Weiterhin soll untersucht werden, ob die Modellierung der seismischen Abhängigkeiten intensitätsabhängig durchzuführen ist. In neueren SPSA deutet sich nämlich an, dass Korrelationen zumindest bei großen Erdbebenintensitäten von untergeordneter Bedeutung sein könnten, da der Hauptbeitrag zur Kernschadenshäufigkeit unter diesen Bedingungen auf Bauwerkversagen zurückzuführen ist (u. a. /TIE 06/ und Information von M. Richner, NOK, im Rahmen der SMiRT 19-Konferenz). In diesem Fall wäre eine vollständige (100-%) Korrelation des Komponentenversagens a priori gegeben.

3.3.2.4 Quantifizierung

Durch die Notwendigkeit der Berücksichtigung unterschiedlicher Erdbebenintensitäten treten bei der Quantifizierung der Ereignisbäume (vgl. dazu Abschnitt 3.3.2.2) zusätzliche Schwierigkeiten auf. Anstelle der Versagenskurven (Punktwert + Unsicherheiten) für Komponenten müssten nun eigentlich Kurvenscharen (Spektrum der Erdbebenintensitäten * normale Versagenskurve) berücksichtigt werden. Dies stellte einen erheblichen methodischen Mehraufwand dar. Zudem kann derzeit noch nicht mit Sicherheit gesagt werden, ob die für die PSA der Stufe 1 für anlageninterne Ereignisse üblicherweise genutzte Software (i. A. RiskSpectrum® oder RISA®) in der Lage ist, mit Versagenskurvenscharen zu operieren.

Um eine methodischen Grundlagen für die Beschreibung einer geeigneten Vorgehensweise im Rahmen des PSA-Methodenbandes zu schaffen, wird im Vorhaben SR 2614 /GRS 07a/ untersucht, welche Möglichkeiten für die Quantifizierung grundsätzlich in Frage kommen. Dabei soll anhand eines umfassenden Beispiels überprüft werden, inwieweit die Versagenswahrscheinlichkeiten der BSK als Gesamtphänomen (Versagenskurvenscharen) in das Berechnungsmodell übernommen werden können bzw. ob es unter Berücksichtigung der erforderlichen Aussagesicherheit ausreicht, nur mit Punktwerten (normalen Versagenskurven) über verschiedenen Intensitätsbereichen zu rechnen. Die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Ansätze sollen schließlich bewertet werden, so dass für die Überarbeitung des PSA-Methodenbandes klare Empfehlungen ausgesprochen werden können.

4 Berücksichtigung der Einwirkung gefährlicher gasförmiger Stoffe in der PSA

4.1 Hintergrund

Die Einwirkung von Gaswolken wird in der PSA bisher nur unter dem Aspekt möglicher Explosionsdruckwellen behandelt /FAK 05/. Bei deterministischen Untersuchungen werden darüber hinaus auch chemische und biologische Effekte gasförmiger Substanzen betrachtet. Die entsprechenden regulatorischen Anforderungen werden in den Sicherheitskriterien für Kernkraftwerke /BMI 77/ und in nachgeordneten Dokumenten unter dem Stichwort 'gefährliche Stoffe' geführt. Hierbei stehen die toxischen, korrosiven und sauerstoffverdrängenden Eigenschaften der Substanzen im Vordergrund. In der Deutschen Risikostudie Kernkraftwerke /GRS 80/ wurde zwar davon ausgegangen, dass derartige Einwirkungen keine signifikanten Risikobeiträge liefern, auf eine abschließende Bewertung wurde jedoch mangels gesicherter Forschungsergebnisse verzichtet. Eine systematische quantitative Ermittlung des Risikobeitrags liegt auch bis heute noch nicht vor.

4.2 Vorgehensweise

Da zum Thema der probabilistischen Behandlung gefährlicher gasförmiger Stoffe in der Literatur nur wenige Informationen verfügbar sind, wurde auch hier der Schwerpunkt auf den persönlichen Erfahrungsaustausch mit internationalen Experten auf dem Gebiet der PSA, insbesondere der PSA für anlagenexterne Ereignisse, gelegt. Als ideales Forum für diesen Erfahrungsaustausch haben sich die Sitzungen der OECD/NEA/CSNI/WGRisk Arbeitsgruppe zur External Events PSA (EE PSA) herausgestellt, da in dieser Arbeitsgruppe spezifisch über die Behandlung von Einwirkungen von außen – mit Ausnahme von Erdbeben - in der PSA diskutiert wird. Die Arbeitsgruppe wurde Anfang des Jahres 2007 ins Leben gerufen. Ihre Aufgabe ist es, mit Hilfe eines Fragebogens /NEA 07/, der an die OECD-Mitgliedsländer verschickt wurde, den aktuellen internationalen Stand hinsichtlich der External Events PSA zu ermitteln. Die Ergebnisse und die Auswertung der Fragen zu den Themengebieten

- (i) regulatorische Anforderungen hinsichtlich der EE PSA,
- (ii) Definition des Umfangs der EE PSA,
- (iii) Analysemethoden und
- (iv) bisherigen Erfahrungen mit der praktischen Anwendung der EE PSA

soll anschließend in einem Report /NEA 08/ zusammengefasst werden.

Bisher fanden drei Sitzungen der Arbeitsgruppe statt, wobei eine deutsche Teilnahme nur bei zwei Sitzungen möglich war. (In der ersten Sitzung, an der nicht teilgenommen werden konnte, wurde im Wesentlichen nur der Fragebogen entwickelt und das allgemeine Vorgehen festgelegt. Insofern war der Zugang zu allen inhaltlichen Ergebnissen durch die Teilnahme an den folgenden Sitzungen gewährleistet.)

4.3 Ergebnisse

Aus der Auswertung der Fragebögen und den Diskussionen in der Arbeitsgruppe hat sich ergeben, dass die Behandlung von Einwirkungen von außen (ohne Erdbeben), insbesondere der in diesem Vorhaben zu betrachtenden Einwirkungen gefährlicher gasförmiger Stoffe im Rahmen der PSA, international nicht besonders weit entwickelt ist. Im Allgemeinen wird die Einwirkung gefährlicher gasförmiger Stoffe - sofern sie überhaupt Berücksichtigung findet - bereits im Rahmen des vorgelagerten Screenings aufgrund ihrer geringen Eintrittswahrscheinlichkeit verworfen.

Die geringe Beachtung, die dieses Thema international findet zeigt sich unter anderem darin, dass in den schriftlichen Antworten auf den Fragebogen nur von Deutschland und Frankreich das Thema der Einwirkung (gefährlicher) gasförmiger Stoffe explizit aufgegriffen wird, wobei sich die französische Darstellung auch nur auf die für neue Reaktoren gelten Auslegungsregeln und -richtlinien bezieht.

Auch im IAEA Regelwerk /IAE 08/ und anderen zugänglichen internationalen Regeln und Richtlinien (u. a. dem finnischen Regelwerk /YVL 96/, /YVL 00/, /YVL 03/ und Dokumenten der U.S. NRC /NRC 83/, /NRC 01/, /NRC 98/, /NRC 07a/, /NRC 07b/) fin-

den sich kaum einwirkungsspezifischen Vorgaben zur probabilistischen Behandlung gasförmiger Stoffe.

In /IAE 08/ werden gasförmige Stoffe als Teilaspekt der Einwirkungen von außen angesprochen. Sie werden dort im Zusammenhang mit der Freisetzung chemischer Stoffe bei Unfällen außerhalb des Anlagengeländes erwähnt. Konkrete einwirkungsspezifische Anforderungen für die probabilistische Untersuchung gefährlicher gasförmiger Stoffe finden sich dort jedoch nicht. Insofern könnte gegebenenfalls nur auf die allgemeinen Anforderungen für die Behandlung zivilisatorischer Einwirkungen zurückgegriffen werden. Folgt man der in /IAE 08/ verwendeten, bereits in Abschnitt 3.3.1 für die SPSA beschriebenen Einteilung der Themengebiete (Parametrisierung der Einwirkung, Ermittlung der Eintrittshäufigkeiten, Versagensanalyse für Bauwerke und Komponenten, Einbindung in die PSA der Stufe 1 für anlageninterne Ereignisse und Dokumentation), so lassen sich die einwirkungsspezifischen Anforderungen für die probabilistische Untersuchung zivilisatorischer Einwirkungen wie folgt zusammenfassen:

Die **Parametrisierung** des Gefährdungspotentials soll sich an den möglichen Schäden orientieren. Das heißt, dass für gasförmige Stoffe neben der Art des Stoffes die transportierte Menge (im Falle von Transportunfällen) und die Menge, die maximal freigesetzt werden kann (sowohl Transportunfälle als auch andere Industrieunfälle), maßgeblich sind. Für Szenarien, die das Versagen von Pipelines beinhalten, ist zusätzlich der Druck in der Leitung zu berücksichtigen.

Neben den Eigenschaften und der Menge des freigesetzten Materials selbst ist auch die Kombination mit anderen begleitenden Einwirkungen wie z. B. mechanische Belastungen (beispielsweise Trümmer oder Druckwelle), thermische Einwirkungen und Erschütterungen zu berücksichtigen. In einigen Fällen können auch zeitgleiche naturbedingte Einwirkungen relevant sein, z. B. wenn der Transport der gasförmigen Stoffe durch besondere Windverhältnisse beeinflusst wird.

Eine besondere Bedeutung im Zusammenhang mit der Einwirkung (gefährlicher) gasförmiger Stoffe kommt der Ermittlung der **Eintrittshäufigkeiten** entsprechender Szenarien zu: Wie bereits erwähnt, wird in den meisten Ländern, in denen PSA für Einwirkungen von außen durchgeführt werden, diese Art von Einwirkung aufgrund ihrer geringen Eintrittshäufigkeit nicht weiter untersucht. Als Grundlage für die realistische Ermittlung der Eintrittshäufigkeiten wird in /IAE 08/ die Erstellung einer Datenbank empfohlen, die mindestens die folgenden Informationen enthalten soll:

- qualitative und quantitative Informationen zu den am Standort und in seiner Umgebung gehandhabten Gefahrgütern (Dies schließt auch Informationen zu den Abständen sicherheitstechnisch relevanter Bauwerke zu Transportwegen und Lagern ein.),
- Informationen über militärische Einrichtungen und ggf. die Häufigkeit von Übungen,
- Informationen zur Häufigkeit und den möglichen Auswirkungen von Unfällen.

Die **Versagensanalyse für Bauwerke und Komponenten** (die für die Einwirkung gasförmiger Stoffe, sofern man deren Explosion nicht betrachtet, irrelevant ist), die **Einbindung in die PSA der Stufe 1 für anlageninterne Ereignisse** und die **Dokumentation** werden im Zusammenhang mit zivilisatorischen Einwirkungen nicht explizit behandelt. Hier verweist /IAE 08/ u. a. auf die entsprechenden Abschnitte für seismische Einwirkungen (vgl. Abschnitt 3.3.1).

Im Regelwerk der U.S. NRC werden allgemeine Anforderungen zur Untersuchung von Einwirkungen von außen insbesondere in /NRC 83/ und /NRC 98/ behandelt. Eine konkrete Darstellung der Vorgehensweise zur (teilweise probabilistischen) Analyse der Einwirkung gasförmiger Stoffe findet sich im Zusammenhang mit der Nutzbarkeit der Warte nach chemischen Freisetzungen im Umfeld der Anlage in /NRC 01/. Allerdings werden dort nur die Auswirkungen auf das Personal betrachtet. Mögliche Schäden an technischen Einrichtungen (z. B. durch korrosive Gase) sind nicht Gegenstand dieses Regulatory Guides.

Wie auch in anderen Regelwerken wird in den Dokumenten der U.S. NRC der Schwerpunkt bei den probabilistischen Analysen auf die Gefährdungsseite gelegt. Auch /NRC 01/ stellt in diesem Zusammenhang keine Ausnahme dar, da die Behandlung der Auswirkungen in der Anlage im Wesentlichen deterministisch erfolgt.

Zusammenfassend lässt sich somit sagen, dass es keine international etablierte Vorgehensweise zur durchgängigen (d. h. einschließlich anlagenseitiger Analyse) probabilistischen Behandlung der Einwirkung gasförmiger Stoffe gibt. Von den Experten der

OECD/NEA/CSNI/WGRisk Arbeitsgruppe zur External Events PSA⁶ wird diesbezüglich ebenfalls kein Handlungsbedarf gesehen, da der erwartete Beitrag zur Gesamtkernschadenshäufigkeit im Vergleich zu anderen Einwirkungen von außen und zu den Beiträgen anlageninterner Ereignisse als gering eingeschätzt wird. Diese Bewertung wird auch durch die bereits von der Arbeitsgruppe ausgewerteten Antworten zu dem Fragebogen gestützt /NEA 08/.

Vor diesem Hintergrund besteht derzeit keine Notwendigkeit, die Einwirkung gasförmige Stoffe im Rahmen der PSA detailliert zu betrachten. Da der Beitrag derartiger Einwirkungen zur Kernschadenshäufigkeit erheblich von der Eintrittswahrscheinlichkeit des zugrundeliegenden Ereignisses (z. B. Transportunfall) abhängt, ist jedoch die Entwicklung der Gefährdungssituation (z. B. Industrieanlagen oder Transportwege in der Nähe der Kernkraftwerke) standortspezifisch zu verfolgen. Sollten sich deutliche Änderungen hinsichtlich der Gefährdungssituation ergeben, ist gegebenenfalls eine Neubewertung des Sachverhalts erforderlich.

⁶ J. Sandberg und R. Virolainen (STUK, Finnland), C.-C. Chao und C.-K. Lo (INER, Taiwan), T.-M. Kao und J.-D. Lin (Taiwan), M. Fukuda (JNES, Japan), G. Georgescu (IRSN, Frankreich), R. Gheorghe (CNSC, Kanada), N. Siu (NRC, USA), G. Thuma (GRS, Germany), J.-E. Yang (KAERI, Korea)

5 Zusammenfassung und Ausblick

Durch die Teilnahme an internationalen Fachveranstaltungen und die Sichtung der relevanten Literatur wurde der Stand von Wissenschaft und Technik hinsichtlich der Behandlung seismischer Einwirkungen und der Einwirkung gasförmiger Stoffe im Rahmen der PSA ermittelt. Hierbei haben sich insbesondere die folgenden Veranstaltungen und die damit verbundenen Arbeiten als nützlich erwiesen:

- Sitzungen des Facharbeitskreises PSA (halbjährlich),
- Sitzungen des KTA Arbeitsgremiums zur Überarbeitung des ersten Teils der KTA-Regel 2201 (AG KTA 2201.1),
- Sitzungen der OECD/CSNI/IAGE Sub-Group on the Seismic Behaviour of Structures (jährlich),
- Specialist Meeting on the Seismic Probabilistic Safety Assessment of Nuclear Facilities (OECD Workshop, November 2006 /NEA 06/),
- 19th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 19, August 2007),
- Sitzungen der OECD/NEA/CSNI/WGRisk Arbeitsgruppe zur External Events PSA (EE PSA).

Für den Themenbereich der seismischen PSA hat sich aus dem Abgleich der in /FAK 05/ beschriebenen Vorgehensweise mit der deutschen und internationalen Praxis ergeben, dass die Durchführung der SPSA gemäß /FAK 05/ einerseits dem internationalen Stand von Wissenschaft und Technik entspricht, dass die Beschreibung andererseits jedoch nicht detailliert genug ist, um zu gewährleisten, dass die danach durchgeführten Analysen den Anforderungen hinsichtlich Vergleichbarkeit und Nachvollziehbarkeit vollständig genügen. Insbesondere bezüglich der folgenden Aspekte besteht noch Überarbeitungsbedarf:

- (1) Auswahl der detailliert zu analysierenden Bauwerke, Systeme und Komponenten (BSK),
- (2) Aufstellung der erdbebenspezifischen Ereignisbäume,
- (3) Behandlung ähnlicher Komponenten unter gleicher seismischer Einwirkung (Korrelation) und
- (4) Quantifizierung der Ereignisabläufe (Ermittlung der erdbebenbedingten Kernschadenshäufigkeiten).

Auf der Grundlage des identifizierten Überarbeitungsbedarfs bezüglich der in /FAK 05/ beschriebenen Vorgehensweise zur Durchführung einer SPSA wurde ein Konzept für die notwendigen methodischen Weiterentwicklungen erarbeitet und die Umsetzung dieses Konzepts im Rahmen zweier Forschungsvorhaben initiiert. Die Fragen zum Auswahlverfahren (1) werden in einem Arbeitspaket des Vorhabens RS 1180 behandelt, während die übrigen Aufgabenstellungen (2, 3 und 4) im Vorhaben SR 2614 bearbeitet werden:

- Für das **Auswahlverfahren (1)** soll im Vorhaben RS 1180 eine mehrstufige Vorgehensweise entwickelt werden, die es erlaubt, ausgehend von der Menge aller BSK eines Kernkraftwerks unter Berücksichtigung ihrer spezifischen Eigenschaften und möglicher sekundärer Einwirkungen nachvollziehbar jene BSK zu identifizieren, für die erdbebenbedingte Versagenswahrscheinlichkeiten berechnet werden müssen.
- Im Rahmen des Vorhabens SR 2614 ist ein strukturiertes Vorgehen zur Aufstellung **erdbebenspezifischer Ereignisbäume (2)** zu erarbeiten, wobei insbesondere beschrieben werden soll, inwieweit die Ergebnisse einer vorliegenden PSA der Stufe 1 für interne Ereignisse berücksichtigt werden können, wie Folgeereignisse (Brand, Überflutung und Lastabsturz) einzubinden sind und inwieweit erdbebeninduzierte Ereignisabläufe von der Intensität des Erdbebens abhängen.
- Ebenfalls in Vorhaben SR 2614 soll eine Methode zur Berücksichtigung von **Korrelationen (3)** bezüglich des Ausfallverhaltens von BSK unter ähnlicher seismischer Einwirkung erarbeitet werden, bei der zunächst

von unkorreliertem Ausfallverhalten ausgegangen wird und diese Annahme im Rahmen der Anlagenbegehungen unter Heranziehung festgelegter Kriterien überprüft und ggf. revidiert wird.

- Für die **Quantifizierung der Ereignisabläufe (4)** soll anhand eines umfassenden Beispiels überprüft werden, inwieweit die Versagenswahrscheinlichkeiten der BSK als Gesamtphänomen (Versagenskurvenscharen) in das Berechnungsmodell übernommen werden können bzw. ob es ausreicht, nur mit Punktwerten (normalen Versagenskurven) über verschiedenen Intensitätsbereichen zu rechnen. Die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Ansätze sollen schließlich bewertet werden.

Erste Ergebnisse in den Vorhaben RS 1180 und SR 2614, in denen diese Ansätze konkretisiert werden sollen, sind im Laufe des Jahres 2009 zu erwarten.

Hinsichtlich des Themenbereichs "Einwirkung gasförmiger Stoffe" ist festzustellen, dass die Behandlung von Einwirkungen von außen, insbesondere auch der Einwirkung gasförmiger Stoffe, international nicht sehr weit entwickelt ist. Im Allgemeinen wird die Einwirkung gasförmiger Stoffe bereits im Rahmen des vorgelagerten Screenings aufgrund ihrer geringen Eintrittswahrscheinlichkeit verworfen. Infolgedessen gibt es derzeit international keine etablierte Vorgehensweise zur probabilistischen Behandlung solcher Einwirkungen. Von den entsprechenden Experten wird diesbezüglich auch kein Handlungsbedarf gesehen, da der erwartete Beitrag zur Gesamtkernschadenshäufigkeit im Vergleich zu anderen Einwirkungen von außen und zu den Beiträgen anlageninterner Ereignisse als gering eingeschätzt wird.

Vor dem Hintergrund der beschriebenen internationalen Situation besteht derzeit keine Notwendigkeit, die Einwirkung gasförmige Stoffe im Rahmen der PSA detailliert zu betrachten. Da der Beitrag derartiger Einwirkungen zur Kernschadenshäufigkeit jedoch erheblich von der Eintrittswahrscheinlichkeit des Ereignisses selbst abhängt, ist die Entwicklung der Gefährdungssituation standortspezifisch zu verfolgen. Sollten sich hier deutliche Änderungen ergeben, ist gegebenenfalls eine Neubewertung des Sachverhalts erforderlich.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Vorhabensziele sowohl hinsichtlich der Ermittlung und Verfolgung des internationalen Standes von Wissenschaft und Technik als auch hinsichtlich der Identifizierung von Weiterentwicklungsbedarf mit den durchgeführten Arbeiten vollständig erreicht wurden.

6 Literatur

- /ANS 03/ American Nuclear Society (ANS)
American National Standard External-Events PRA Methodology,
ANSI/ANS-58.21-2003, December 2003
- /ASN 01/ Autorité de sûreté nucléaire (ASN)
Détermination du risque sismique pour la sûreté des installations nucléaires
de base, Règles fondamentales de sûreté relatives aux installations
nucléaires de base, Règle fondamentale de sûreté n°2001-01, Mai 2001
- /ASN 02/ Autorité de sûreté nucléaire (ASN)
Développement et utilisation des études probabilistes de sûreté, Règles
fondamentales de sûreté relatives aux installations nucléaires de base,
Règle fondamentale de sûreté n°2002-1, Décembre 2002
- /BMI 77/ Bundesministerium des Inneren (BMI)
Sicherheitskriterien für Kernkraftwerke, Bonn, Oktober 1977
- /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 98/ Budnitz, R.J.
Current status of methodologies for seismic probabilistic safety analysis,
Reliability Engineering and System Safety, Vol. 62, pp 71-88, 1998
- /EPR 94/ Electric Power Research Institute (EPRI)
Methodology for Developing Seismic Fragilities,
EPRI report, EPRI TR-103959, June 1994

- /FAK 97/ Facharbeitskreis (FAK) Probabilistische Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke
Methoden zur probabilistischen Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke
- Dezember 1996 - Bundesamt für Strahlenschutz, BfS-KT-16/97, Salzgitter, 1997
- /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 80/ Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH
Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke, Fachband 4, Einwirkungen von außen (einschließlich anlageninterner Brände), Verlag TÜV-Rheinland, Köln, ISBN 3-88585-015-X, 1980
- /GRS 90/ Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH
Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke, Phase B, Verlag TÜV-Rheinland, Köln, 1990
- /GRS 07/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH
Schreiben vom 13.02.2007, Weiterentwicklung und Erprobung von Methoden und Werkzeugen für probabilistische Sicherheitsanalysen,
Anlage A: Vorhabensbeschreibung, RS 1180, Köln, Februar 2007
- /GRS 07a/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH
Schreiben vom 14.12.2007, Bereitstellung und Erprobung von Methoden für eine seismische probabilistische Sicherheitsanalyse (SPSA),
Forschungsvorhaben SR 2614, Köln, Dezember 2007
- /HIR 06/ Hirano, M., T. Nakamura, K. Ebisawa
Outline of Seismic PSA Implementation standards on the Atomic Energy Society of Japan, in: Conference Proceedings of the Specialists Meeting on Seismic Probabilistic Safety Assessment (SPSA) of Nuclear Facilities, Seogwipo, Jeju Island, Korea, November 2006

- /HOF 96/ Hoffmann, H.H.
Vorgehensvorschlag zur Durchführung einer probabilistischen Sicherheitsanalyse für das externe störfallauslösende Ereignis "Erdbeben", Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz, BMU-1996-469, März 1996
- /HSK 01/ Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK)
Periodische Sicherheitsüberprüfung von Kernkraftwerken, Richtlinie für schweizerische Kernanlagen, HSK-R-48/d, November 2001
- /IAE 08/ International Atomic Energy Agency (IAEA)
Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants, Draft Safety Guide, DS 394, Stand: März 2008
- /KAN 00/ Kang, S.-K., B.-S. Lee
The Insights from Seismic Risk Analysis of Korean Nuclear Power Plants, in: Conference Proceedings of the 5th International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management, PSAM 5, Osaka, Japan, November 27 - December 1, 2000
- /KLÜ 05/ Klügel, J.-U.
Problems in the application of the SSHAC probability method for assessing earthquake hazards at Swiss nuclear power plants, Engineering Geology, Vol. 78, pp. 285-307, 2005
- /KLÜ 05a/ Klügel, J.-U.
On the Use of Probabilistic Seismic Hazard Analysis as an Input for Seismic PSA, in: Conference Proceedings of 18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 18), Beijing, China, August 2005
- /KTA 90/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA)
Sicherheitstechnische Regel des KTA: Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen - Teil 1: Grundsätze, KTA 2201, Teil 1, Juni 1990

- /KTA 08/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA)
Sicherheitstechnische Regel des KTA: Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen - Teil 1: Grundsätze, KTA 2201, Teil 1, Regeländerungsentwurfsvorschlag, Beratungsstand: April 2008
- /MUR 06/ Muramatsu, K., Q. Liu, K. Onizawa
Potential Uses of Seismic PSA for Risk Management of NPPs - A Review of Recent Studies at JAEA, in: Conference Proceedings of the Specialists Meeting on Seismic Probabilistic Safety Assessment (SPSA) of Nuclear Facilities, Seogwipo, Jeju Island, Korea, November 2006
- /MUR 06a/ Murphy, A., et al.
Development of a Risk-Informed Approach to Seismic Siting and Design, in: Conference Proceedings of the Specialists Meeting on Seismic Probabilistic Safety Assessment (SPSA) of Nuclear Facilities, Seogwipo, Jeju Island, Korea, November 2006
- /NAG 04/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA)
Probabilistic seismic hazard analysis for Swiss nuclear power plant sites (PEGASOS project), Final Report: Text (Volume 1); Results (Volume 2); Workshop summaries (Volume 3); Elicitation summaries: Seismic source characterisation (SP1) (Volume 4); Elicitation summaries: Ground motion characterisation (SP2) (Volume 5); Elicitation summaries: Site response characterisation (SP3) (Volume 6), 2004
- /NEA 98/ OECD Nuclear Energy Agency (NEA)
State-of-the-Art Report on the Current Status of Methodologies for Seismic PSA, NEA/CSNI/R(97)22; March 1998
- /NEA 99/ OECD Nuclear Energy Agency (NEA)
Proceedings of the OECD/NEA Workshop on Seismic Risk, NEA/CSNI/R(99)28; 10-12 August 1999
- /NEA 03/ OECD Nuclear Energy Agency (NEA)
CSNI Technical Opinion Papers, No. 1: Fire Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants, No. 2: Seismic Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Facilities, OECD Publications, 2003

- /NEA 06/ OECD Nuclear Energy Agency (NEA)
Conference Proceedings of Specialists Meeting on the Seismic PSA of Nuclear Facilities, Seogwipo, Jeju Island, Korea, 6. - 8. November 2006
- /NEA 06a/ OECD Nuclear Energy Agency (NEA)
Announcement of Workshop on Recent Findings and Developments in Probabilistic Seismic Hazards Analysis (PSHA) Methodologies and Applications, Lyon, France, <http://www.nea.fr/html/nsd/workshops/psha/>, 7. - 9. April 2008
- /NEA 07/ OECD Nuclear Energy Agency (NEA)
OECD/NEA CSNI WGRISK Task Group 2006-1, Probabilistic Safety Analysis (PSA) of Other Off-Site External Events than Earthquake - Questionnaire, June 2007
- /NEA 08/ OECD Nuclear Energy Agency (NEA)
OECD/NEA CSNI WGRISK Task Group 2006-1, Probabilistic Safety Analysis (PSA) of Other Off-Site External Events than Earthquake - Summary Report (draft), March 2008
- /NIS 00/ Nishihata, M., et al.
Evaluation of Component Fragility for Seismic PSA on Japanese LWRs, Proc. of the 5th International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management, PSAM 5, Osaka, Japan; Nov. 27 - Dec. 1, 2000
- /NRC 78/ United States Nuclear Regulatory Commission (NRC)
Development of Floor Design Response Spectra for Seismic Design of Floor-Supported Equipment or Components, Regulatory Guide 1.122, February 1978
- /NRC 83/ United States Nuclear Regulatory Commission (NRC)
PRA Procedures Guide, A Guide to the Performance of Probabilistic Risk Assessment for Nuclear Power Plants, NUREG/CR-2300, Vol. 2, January 1983
- /NRC 85/ United States Nuclear Regulatory Commission (NRC)
Probabilistic Safety Analysis, Procedures Guide, NUREG/CR-2815, Vol. 2, Rev. 1, August 1985

- /NRC 89/ United States Nuclear Regulatory Commission (NRC)
Severe Accident Risks: An Assessment for Five U.S. Nuclear Power
Plants, NUREG-1150, Vols. 1 and 2, May 1989
- /NRC 97/ United States Nuclear Regulatory Commission (NRC)
Identification and Characterization of Seismic Sources and Determination
of Safe Shutdown Earthquake Ground Motion, Regulatory Guide 1.165,
March 1997
- /NRC 97a/ United States Nuclear Regulatory Commission (NRC)
Recommendations for Probabilistic Seismic Hazard Analysis: Guidance on
Uncertainty and Use of Experts, Senior Seismic Hazard Analysis
Committee (SSHAC), NUREG/CR-6372, 1997
- /NRC 98/ United States Nuclear Regulatory Commission (NRC)
General Site Suitability Criteria for Nuclear Power Stations, Regulatory
Guide 4.7, April 1998
- /NRC 01/ United States Nuclear Regulatory Commission (NRC)
Evaluating the Habitability of a Nuclear Power Plant Control Room During
a Postulated Hazardous Chemical Release, Regulatory Guide 1.78,
December 2001
- /NRC 07/ United States Nuclear Regulatory Commission (NRC)
A Performance-Based Approach to Define the Site-Specific Earthquake
Ground Motion, Regulatory Guide 1.208, March 2007
- /NRC 07a/ United States Nuclear Regulatory Commission (NRC)
Identification of Potential Hazards in Site Vicinity Review Responsibilities,
Standard Review Plan, NUREG-0800, Sections 2.2.1 - 2.2.2, March 2007
- /NRC 07b/ United States Nuclear Regulatory Commission (NRC)
Evaluation of Potential Accidents, Standard Review Plan, NUREG-0800,
Section 2.2.3, March 2007

- /NRC 08/ United States Nuclear Regulatory Commission (NRC)
NRC Regulations Title 10, Code of Federal Regulations, 10 CFR,
Revision 2008
- /NSC 03/ Nuclear Safety Commission of Japan (NSC)
Basic Policy on Introducing Nuclear Safety Regulations Using Risk
Information (in Japanese), 2003
- /NSC 06/ Nuclear Safety Commission of Japan (NSC)
NSCRG L-DS-I.02, Regulatory Guide for Reviewing Seismic Design of
Nuclear Power Reactor Facilities, September 2006
- /NSC 06a/ Nuclear Safety Commission of Japan (NSC)
Revisions of Regulatory Guide for Reviewing Seismic Design for Nuclear
Power Plants, NSC Decision No. 59, September 2006
- /PLG 83/ Pickard-Lowe and Garrick (PLG) Inc.
Seabrook Station Probabilistic Safety Assessment, Main Report, Vol. 1 - 6
and Summary Report PB--89-186931, Irvine, California, USA,
December 1983
- /ROS 78/ Rosenhauer, W., L. Ahorner
Seismic Risk Map for the Western Part of Central Europe, Atomwirtschaft /
Atomtechnik, Vol. 23, Nr. 6; 1978
- /SHE 03/ El Sheikha, A., A. Ghobaraha, M. Elgoharyb
Effect of near-fault ground motion on the response of concrete structures,
in Conference Proceedings of International Symposium on Seismic
Evaluation of Existing Nuclear Facilities, Wien, Österreich, August 2003
- /STE 07/ Stevenson, J.D.
A Review of the Seismic Design and Analysis of Piping Ranging from
Conventional Building Code Static Analysis to Time-History Dynamic
Analysis, in: Conference Proceedings of 19th International Conference on
Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 19), Toronto, Ontario,
Canada, August 2007

- /THU 07/ Thuma, G., M. Türschmann, M. Krauß, and H.P. Berg
Application of Seismic PSA for Safety Reviews of German NPP -
Regulatory Guidance and Methodological Improvements, in: Conference
Proceedings of 19th International Conference on Structural Mechanics in
Reactor Technology (SMiRT 19), Toronto, Ontario, Canada, August 2007
- /TIE 06/ Tietsch, W.
Probabilistische Sicherheitsanalyse Erdbeben - Erfahrungsbericht zu
methodischen Aspekten, Vortrag im Rahmen der Sitzung des
Facharbeitskreises "Probabilistische Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke"
(FAK PSA) am 09.05.2006, Köln, Mai 2006
- /VIA 07/ Viallet, E., et al.
A Bayesian Updating Technique to Address Uncertainties In Probabilistic
Seismic Hazard Assessment, in: Conference Proceedings of 19th
International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology
(SMiRT 19), Toronto, Ontario, Canada, August 2007
- /YON 06/ Yonomoto, T., T. Nakatogawa, Y. Maeda
Revision of Examination Guideline for Seismic Design of Nuclear Power
Reactor Facilities of Japan, in: Conference Proceedings of the Specialists
Meeting on Seismic Probabilistic Safety Assessment (SPSA) of Nuclear
Facilities, Seogwipo, Jeju Island, Korea, November 2006
- /YVL 96/ Finnish Centre for Radiation and Nuclear Safety (STUK)
Safety criteria for design of nuclear power plants, YVL 1.0, March 1996
- /YVL 00/ Finnish Centre for Radiation and Nuclear Safety (STUK)
Safety criteria for siting a nuclear power plant, YVL 1.10, July 2000
- /YVL 03/ Finnish Centre for Radiation and Nuclear Safety (STUK)
Probabilistic safety analysis in safety management of nuclear power plants,
YVL 2.8, May 2003
- /ZUI 06/ Zuidema, P.
PEGASOS: A PSHA for the Swiss nuclear power plants – Some comments
from the managerial point of view NAGRA, National Cooperative for the
Disposal of Radioactive Waste, 2006

7 Tabellenverzeichnis

Tab. 3-1	Untergliederung der KTA-Regel 2201 /KTA 90/ zu Erdbeben	5
Tab. 3-2	Gestaffeltes Vorgehen bei der probabilistischen Erdbebenanalyse.....	5

VERTEILER

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

AG RS I 3 2x

Bundesamt für Strahlenschutz

SK 2 2x

SK 3, Herr Dr. Rehs 3x

CD ROM 5x

GRS

Geschäftsführer (hah, stj) je 1x

Bereichsleiter (erv, lim, prg, rot, tes, zir) je 1x

Abteilungsleiter (mem) 1x

Projektleitung (row) 2x

Projektcontrolling (hab, vet) je 1x

Bibliothek (hog) 1x

TECDO (rop) 1x

Autoren (thu) 5x

Gesamtauflage:

27 Exemplare

5 CD ROM