

 <p> Schweizerische Eidgenossenschaft Confédération suisse Confederazione Svizzera Confederaziun svizra </p> <p> Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI Inspection fédérale de la sécurité nucléaire IFSN Ispettorato federale della sicurezza nucleare IFSN Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate ENSI </p> <p> Industriestrasse 19 5200 Brugg Tel.: 056 / 460 84 00 Fax: 056 / 460 84 99 </p>		AN-Nummer ENSI 11/1562
	Datum 7. Juli 2012	Aktenzeichen 10KEX.APFUKU1
	Typ/Charakter Aktennotiz	Klassifikation öffentlich
	Bearbeiter Projektteam Erdbebennachweis KKM	
Projekt, Thema, Gegenstand (Schlagwörter) KKM, Verfügung Fukushima, deterministischer Nachweis 10'000-jährliches Erdbeben	Seiten 58	Beilagen Zeichnungen

**Stellungnahme des ENSI zum deterministischen Nachweis des KKM
 zur Beherrschung des 10'000-jährlichen Erdbebens**

Verteiler:

ENSI: REDACTED
KKM: REDACTED



Inhaltsverzeichnis

1 Anlass	3
1.1 Ausgangslage	3
1.2 Gegenstand und gesetzliche Grundlage der Beurteilung	5
2 Bewertung der Gefährdungsannahmen	8
2.1 Erdbebengefährdung	8
2.2 Gefährdung Erdbeben in Kombination mit Hochwasser	10
3 Methodik zur Überprüfung der Erdbebenauslegung	12
3.1 Methodische Vorgaben	12
3.2 Prüfverfahren des ENSI	13
3.3 Nachweisführung durch die Betreiber	15
4 Erdbebennachweis für die Kernkühlung	20
4.1 Erforderliche Bauwerke und Systeme	20
4.2 Erdbebengefährdung für die Bauwerke und Ausrüstungen	22
4.3 Erdbebenfestigkeit der erforderlichen Bauwerke und Ausrüstungen	25
4.3.1 Bauwerke	25
4.3.2 Mechanische und elektrische Ausrüstungen	30
4.4 Radiologische Auswirkungen	33
5 Erdbebennachweis für die Brennelementbeckenkühlung	35
5.1 Erforderliche Bauwerke und Systeme	35
5.2 Erdbebenfestigkeit für die erforderlichen Bauwerke und Ausrüstungen	37
5.2.1 Bauwerke	37
5.2.2 Mechanische und elektrische Ausrüstungen	38
5.3 Radiologische Auswirkungen	39
6 Nachweis Kombination von Erdbeben und Hochwasser	41
6.1 Überprüfung der Stauanlagen im Einflussbereich des KKM	41
6.2 Radiologische Auswirkungen	47
7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	48
7.1 Zusammenfassung	48
7.2 Schlussfolgerungen	50
8 Referenzen	51



1 Anlass

1.1 Ausgangslage

Am 11. März 2011 führte das Tohoku-Chihou-Taiheiyou-Oki-Erdbeben und der daraus resultierende Tsunami zu schweren Unfällen mit Kernschmelzen in drei Kernkraftwerksblöcken am Standort Fukushima Dai-ichi (Fukushima I) in Japan. Aufgrund dieser Ereignisse hat das ENSI am 18. März 2011 unter anderem verfügt, dass die Auslegung der Kernkraftwerke in der Schweiz bezüglich Erdbeben und Überflutung unverzüglich zu überprüfen ist /105/, gestützt auf Art. 2 Abs. 1 Bst. d der Verordnung des UVEK über die Methodik und die Randbedingungen zur Überprüfung der Kriterien für die vorläufige Ausserbetriebnahme von Kernkraftwerken (SR 732.114.5 /122/).

In seiner zweiten Verfügung vom 1. April 2011 /106/ hat das ENSI die Randbedingungen und Termine für die Überprüfung der Auslegung bezüglich Erdbeben und Überflutung sowie den Nachweis zur Einhaltung der Dosisgrenzwerte nach Art. 3 der Ausserbetriebnahmeverordnung /122/ festgelegt.

Die Grundlagen für den deterministischen Nachweis zur Beherrschung des 10'000-jährlichen Erdbebens wurden folgendermassen definiert:

„Die seismischen Gefährdungsannahmen sind auf der Grundlage des neuen Erdbebenkataloges des SED und der im Rahmen des PRP erhobenen Standortdaten neu zu ermitteln. Für die Berechnung sind die aktuellen Resultate der Abminderungsmodellierung zu verwenden.“

Bis zum 30. November 2011 sind die Erdbebenfestigkeitsnachweise (Fragilities) für die zur Beherrschung des 10 000-jährliches Erdbebens relevanten Ausrüstungen und Strukturen aufgrund der neuen seismischen Gefährdungsannahmen sowie der aktuell verfügbaren Erkenntnisse aus Japan zu überprüfen und einzureichen.

Der deterministische Nachweis der Beherrschung des 10'000-jährlichen Erdbebens ist mit Hilfe der neu bestimmten Erdbebenfestigkeitsnachweise bis zum 31. März 2012 neu zu führen. Dafür gelten folgende Randbedingungen:

- *Für den Nachweis der Beherrschung des 10'000-jährlichen Erdbebens sind nur jene Ausrüstungen und Strukturen zu kreditieren, deren Festigkeit für die neuen seismischen Gefährdungsannahmen nachgewiesen wurde.*
- *Es ist der Ausfall der externen Stromversorgung zu unterstellen.*
- *Es ist nachzuweisen, dass die Anlage in einen sicheren Zustand überführt werden kann und dieser Zustand ohne Zuhilfenahme externer Notfallschutzmittel während mindestens 3 Tagen stabil gehalten werden kann.*
- *Interne Notfallschutzmassnahmen können nur kreditiert werden, wenn sie vorbereitet sind, genügend grosse Zeitfenster zur Durchführung vorhanden sind und die dafür erforderlichen Hilfsmittel auch nach einem 10'000-jährlichen Erdbeben zur Verfügung stehen.*
- *Die Berechnung der aus dem Störfall resultierenden Dosis erfolgt aufgrund der während des Analysezeitraums emittierten radioaktiven Stoffe und richtet sich nach Richtlinie ENSI-G14.*

Nach Abschluss des Projekts PRP und Überprüfung der Ergebnisse durch das ENSI wird das ENSI die Erdbebengefährdungsannahmen neu festlegen. Auf dieser Grundlage sind dann die Erdbebenfestigkeitsnachweise zu aktualisieren und der deterministische Nachweis zur Beherrschung des 10'000-jährlichen Erdbebens zu erbringen.“



In der Verfügung vom 1. April 2011 /106/ hat das ENSI ausserdem gefordert, dass zusätzlich zu den Hochwasser- und Erdbebennachweisen auch die Kombination von Erdbeben mit Hochwasser zu betrachten sei, wobei das Hochwasser ausgelöst wird durch ein erbebenbedingtes Versagen von Stauanlagen im Einflussbereich des Kernkraftwerks. Folgende Randbedingungen sind für diesen Nachweis festgelegt worden:

„Die Beherrschung der Kombination von Erdbeben und dem durch das Erdbeben ausgelöste Versagen der Stauanlagen im Einflussbereich des Kernkraftwerks ist bis zum 31. März 2012 nachzuweisen. Der Nachweis kann auf zwei verschiedene Arten geführt werden.

Variante 1

Für alle Stauanlagen, welche die Kernkraftwerke potenziell gefährden können, ist deterministisch nachzuweisen, dass bei einem 10'000-jährlichen Erdbeben eine unkontrollierte Wasserabgabe ausgeschlossen werden kann. Der deterministische Erdbebennachweis ist gemäss der BWG-Richtlinie (heute Bundesamt für Energie) zur Sicherheit von Stauanlagen zu führen. In Abweichung von der BWG-Richtlinie sind die seismischen Gefährdungsannahmen auf der Grundlage des neuen Erdbebenkataloges des SED zu ermitteln. Für die Berechnung der Gefährdung auf Felsniveau sind die aktuellen Resultate der Abminderungsmodellierung zu verwenden. Die Resultate auf Felsniveau sind an die lokalen geologischen Standortverhältnisse anzupassen.

Variante 2

Falls bei einem 10'000-jährlichen Erdbeben ein unkontrollierter Wasserabfluss deterministisch nicht ausgeschlossen werden kann, ist der deterministische Nachweis für die Beherrschung der Kombination von Erdbeben und Versagen der Stauanlagen im Einflussbereich des Kernkraftwerks zu führen. Dafür gelten folgende Randbedingungen:

- *Für den Nachweis des Störfalles sind nur jene Ausrüstungen und Strukturen zu kreditieren, deren Festigkeit für die neuen seismischen und hydrologischen Gefährdungsannahmen nachgewiesen wurde.*
- *Es ist das instantane, vollständige Versagen der Stauanlagen zu unterstellen.*
- *Es ist der Ausfall der von der Flutwelle betroffenen Kühlwasserfassungen zu unterstellen.*
- *Es ist der Ausfall der externen Stromversorgung zu unterstellen.*
- *Es ist nachzuweisen, dass die Anlage in einen sicheren Zustand überführt werden kann und dieser Zustand ohne Zuhilfenahme externer Notfallschutzmittel während mindestens 3 Tagen stabil gehalten werden kann.*
- *Interne Notfallschutzmassnahmen können nur kreditiert werden, wenn sie vorbereitet sind, genügend grosse Zeitfenster zur Durchführung vorhanden sind und die dafür erforderlichen Hilfsmittel auch nach der Kombination von Erdbeben und Versagen der Stauanlagen zur Verfügung stehen.*
- *Die Berechnung der aus dem Störfall resultierenden Dosis erfolgt aufgrund der während des Analysezeitraums emittierten radioaktiven Stoffe und richtet sich nach Richtlinie ENSI-G14.“*

Die Art. 2 und 3 der Verordnung zur vorläufigen Ausserbetriebnahme /122/ beziehen sich auf die Kernkühlbarkeit einschliesslich Integrität des Primärkreislaufs und des Containments. Nicht Gegenstand der Ausserbetriebnahmeverordnung /122/ ist der Erdbebennachweis für die Brennelementlagerbecken, weshalb das ENSI in seiner dritten Verfügung vom 5. Mai 2011 /107/ unter anderem gefordert hat, dass das Kernkraftwerk Mühleberg (KKM) bis zum 31. März 2012 gemäss den Verfahrensvorgaben der Verfügung vom 1. April 2011/106/ zusätzlich die Auslegung der Brennelementlagerbecken, -gebäude und –kühlsysteme zu überprüfen hat. Der Prüfumfang wurde wie folgt spezifiziert:



- *Es sind alle Brennelementbeckenanschlüsse und -Verbindungen unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Betriebszustände zu identifizieren, deren Versagen zu einem Füllstandsabfall im Brennelementlagerbecken führen kann, und es sind die Auswirkungen der einzelnen Leckagepfade zu bewerten. Darauf basierend ist festzulegen, für welche Brennelementbeckenanschlüsse und -Verbindungen eine seismische Requalifikation zu erbringen ist.*
- *Es ist aufzuzeigen, dass allfällige Leckagen in der Beckenauskleidung aufgrund deren Konstruktion unter Zugrundelegen der neuen seismischen Gefährdungsannahmen so begrenzt bleiben, dass der daraus resultierende Füllstandsabfall durch die vorhandenen Einspeisesysteme kompensiert werden kann.*

Aus der Überprüfung der Erdbebensicherheit des KKM im Rahmen des EU-Stresstests resultierte zusätzlicher Klärungsbedarf. Mit der Verfügung vom 10. Januar 2012 /205/ forderte das ENSI vom KKM unter den Punkten 3.3 und 3.4 weitere Nachweise:

- *3.3 Seismische Robustheit der Abschaltfunktion*

Das ENSI fordert das KKM auf, die ausgewiesene Erdbebenfestigkeit der Abschaltfunktion des Steuerstabanztriebsystems (CRD SCRAM-Funktion) zu überprüfen und dem ENSI die Ergebnisse bis zum 31. Januar 2012 einzureichen.

- *3.4 Erdbebenfestigkeitsnachweis für das Wasserkraftwerk Mühleberg*

Das ENSI fordert das KKM auf, den Standsicherheitsnachweis (insbesondere den Nachweis der lokalen und globalen Stabilität) für das Wasserkraftwerk Mühleberg gemäss BWG-Richtlinie (heute Bundesamt für Energie) zur Sicherheit von Stauanlagen bis zum 31. Januar 2012 einzureichen. In Abweichung von der BWG-Richtlinie sind seismische Gefährdungsannahmen gemäss der Verfügung vom 1. April 2011 anzusetzen.

1.2 Gegenstand und gesetzliche Grundlage der Beurteilung

Gegenstand dieser Stellungnahme sind die Nachweise des KKM, dass die Kernkühlung und die Sicherheit der Brennelementlagerbecken unter Einwirkung eines 10'000-jährlichen Erdbebens und der Kombination von Erdbeben mit erdbebenbedingtem Hochwasser einzelfehlersicher gewährleistet bleiben und dass die Dosislimite von 100 mSv bei diesen Störfällen eingehalten wird. Es sei angemerkt, dass für die Erdbebengefährdung der Mittelwert heranzuziehen ist. Würde der Medianwert verwendet (wie international nicht unüblich), so entspräche die hier betrachtete Gefährdung eher einem 100'000-jährlichen Erdbeben.

Das ENSI bezieht sich in seinen Verfügung vom 18. März 2011 /105/ und vom 1. April 2011 /106/ auf den Art. 2 Abs 1 Bst. d der Ausserbetriebnahmeverordnung /122/, wonach der Bewilligungsnehmer die Auslegung des Kernkraftwerks unverzüglich zu überprüfen hat, wenn dies die Behörde anordnet. Die Überprüfung der Auslegung beschränkt sich gemäss Art. 2 Abs.1 Bst. a auf die Kernkühlbarkeit sowie die Integrität des Primärkreislaufs und des Containments. Nach Art. 3 der Ausserbetriebnahmeverordnung /122/ hat der Bewilligungsnehmer das Kraftwerk unverzüglich vorläufig ausser Betrieb zu nehmen, wenn die Überprüfung der Auslegung nach Art. 2 zeigt, dass die Dosisgrenzwerte nach Art. 94 und 96 der Strahlenschutzverordnung /124/ nicht eingehalten werden. Da sich die Verfügung vom 1. April 2011 /106/ auf 10'000-jährliche Störfälle und somit nach Art. 1 Bst. a der Verordnung über die Gefährdungsannahmen /123/ auf Störfälle der Kategorie 3 beziehen, ist in diesem Fall nachzuweisen, dass nach Art. 94 Abs. 5 der Strahlenschutzverordnung /124/ die Dosislimite von 100 mSv nicht überschritten wird. Gemäss Ausserbetriebnahmeverordnung /122/ hat das KKM konkret nachzuweisen, dass die Kernkühlsysteme, im Fall von KKM ist dies das Notfallkühlsystem, und die Reaktorschneellabschaltung während und nach

einem 10'000-jährlichen Erdbeben auch in Kombination mit erdbebenbedingtem Hochwasser funktionstüchtig bleiben und dass die Dosislimite von 100 mSv unter Berücksichtigung von allfälligen Leckagen im Primärkreis und im Containment eingehalten wird.

Nicht Gegenstand der Ausserbetriebnahmeverordnung /122/ ist der in der Verfügung vom 5. Mai 2011 /107/ geforderte Sicherheitsnachweis für das Brennelementlagerbecken und die zugehörigen Gebäude und Kühlsysteme. Verschärfend gegenüber dem Art. 3 der Ausserbetriebnahmeverordnung /122/ besagt der Art. 94 Abs. 5 der Strahlenschutzverordnung /124/ jedoch, dass die Dosislimite von 100 mSv unter Berücksichtigung eines einzelnen Störfalls eingehalten werden muss. Da es sich beim Erdbeben um einen einzelnen Störfall handelt, ist die zu berücksichtigende Freisetzung von Radioaktivität somit nicht nur auf den Reaktorkern gemäss der Ausserbetriebnahmeverordnung /122/ beschränkt, sondern schliesst die Freisetzung aus dem Brennelementlagerbecken mit ein. Die durch allfällige Leckagen in den Umschliessungen des Reaktorkerns und des Brennelementlagerbeckens bedingten Freisetzungen sind somit nicht einzeln, sondern in der Summe zu betrachten.

Nach Art. 8 Abs. 4 der Kernenergieverordnung /125/ ist zusätzlich zum auslösenden Erdbeben ein unabhängiger Einzelfehler zu unterstellen. Die technischen Kriterien nach Art. 11 der Verordnung über die Gefährdungsannahmen /123/ sind bei Störfällen der Kategorie 3 einzuhalten, d.h. die Unterkritikalität und der Wärmeübergang von den Brennstab-Hüllrohren zum Kühlmittel dürfen höchstens kurzfristig nicht gewährleistet resp. beeinträchtigt sein und die Integrität von mindestens einer der Barrieren Brennstab-Hüllrohr, Reaktorkühlkreislauf und Primär-Containment muss jederzeit gewährleistet sein.

Neben den gesetzlichen Grundlagen stützt sich das ENSI bei der Überprüfung des Erdbeben-nachweises auch auf internationale Richtlinien, Richtlinien des ENSI sowie fachspezifische Normen.

Grundsätze zur Überprüfung der Erdbebenauslegung von nuklearen Anlagen sind im IAEA Safety-Guide „Evaluation of Seismic Safety for Existing Nuclear Installations“ /127/ definiert.

Die Anforderungen an die deterministische Störfallanalyse richten sich nach der Richtlinie ENSI-A01 /128/ Bestimmungen zur Quelltermanalyse sind in der Richtlinie ENSI-A08 /130/ enthalten, die Berechnung der Strahlenexposition ist in der Richtlinie G14 /131/ definiert.

Bei der Beurteilung der Tragsicherheit von Bauwerken stützt sich das ENSI auf die Normen des SIA. Für die Beurteilung der Auslegung von maschinentechnischen Komponenten sind die ASME-Codes /145/ massgebend. Die Anforderungen an die Rütteltischversuche von elektrotechnischen Komponenten sind in der KTA2201.4 /146/ und im IEEE 344 /147/ geregelt. Bei der Beurteilung von probabilistischen Erdbebenfestigkeitsnachweisen (Fragilities) richtet sich das ENSI nach den EPRI-Guides /133/ bis /136/.

Mit Brief vom 27.11.2011 /1/ reichte das KKM gemäss Kapitel 3.1 der ENSI-Verfügung vom 1. April 2011 /106/ die Erdbebenfestigkeitsnachweise (Fragilities) für die zur Beherrschung des 10'000-jährlichen Erdbebens erforderlichen Bauwerke, Systeme und Komponenten fristgerecht ein. Die Dokumentation umfasst den am 8.12.2012 revidierten, zusammenfassenden Bericht /13/ sowie folgende referenzierte Berichte:

- 24 Berichte von Simpson Gumpertz & Heger (SGH) mit Fragilityanalysen von Gebäuden und Komponenten /54/ bis /77/.
- 3 Berichte von ARES Corporation mit Fragilityanalysen von diversen Leitungen /94/ bis /96/
- Diverse Berichte zu Erdbebeneinwirkungen und zu den lokalen Baugrundeigenschaften /28/, /29/, /30/, /36/, /109/, /137/, /143/.
- Diverse Berichte zur Methodik und Vorgehensweise /134/, /135/, /137/.



- Diverse Berichte zur dynamischen Analyse und Bestimmung von Antwortspektren /32/, /33/, /34/, /144/.
- Sicherheitsberichte /31/, /44/, /50/.

Mit Verfügung vom 10. Januar 2012 /110/ forderte das ENSI vom Betreiber zusätzlich den Erdbebenfestigkeitsnachweis für das Wasserkraftwerk Mühleberg. Mit Brief vom 31.01.2012 /5/ reichte das KKM eine entsprechende Stellungnahme /21/ fristgerecht ein.

Mit Brief vom 28. März 2012 /3/ reichte das KKM als Antwort auf die ENSI Forderung 4 in der Verfügung vom 5. Mai 2011 /107/ ein Bericht /15/ zur Überprüfung der Auslegung der Brennelementlagerbecken, -gebäude und –kühlsysteme mit dazugehörigen Berechnungen /16/ fristgerecht ein.

Mit Brief vom 29.03.2012 /4/ reichte das KKM als Antwort auf die ENSI Forderung 3.3 in der Verfügung vom 1. April 2011 /106/ den Nachweis zur Beherrschung der Kombination von Erdbeben und dem durch das Erdbeben ausgelösten Versagen der Stauanlagen im Einflussbereich des Kernkraftwerkes fristgerecht ein. Die Dokumentation umfasste eine zusammenfassende Aktennotiz /10/ und drei dazugehörigen Berechnungsberichte zu den einzelnen Stauanlagen Wohlensee /22/ Schiffenen /26/ und Rossens /27/.

Mit Brief vom 30. März 2012 /3/ reichte das KKM als Antwort auf die ENSI Forderung 3.1 in der Verfügung vom 1. April 2011 /105/ den deterministischen Nachweis des Beherrschung des 10'000-jährlichen Erdbebens für das KKM fristgerecht ein. Die Dokumentation umfasste eine zusammenfassende Aktennotiz /6/, die teilweise aktualisierten Erdbebenfestigkeitsnachweise sowie weitere Berichte. Einer der beigelegten Berichte /87/ beschreibt die endgültige Bestimmung der Erdbebenfestigkeiten für die vom ENSI in der Verfügung vom 1. April 2011 /106/ festgelegte Erdbebeneinwirkung mit Hilfe der Skalierungsfaktoren.

In Anbetracht der zentralen sicherheitstechnischen Bedeutung der Abschaltfunktion hat das ENSI das KKM mit Forderung vom 10.01.2012 /110/ und der darauffolgenden Erläuterung vom 24.01.2012 /111/ aufgefordert zu diesem Thema Stellung zu nehmen. Dementsprechend hat das KKM dem ENSI mit dem Brief vom 27.01.2012 /7/ eine Stellungnahme zur seismischen Robustheit der Abschaltfunktion /8/ eingereicht.

Zusätzlich übermittelte das KKM dem ENSI auf Anfrage die elektronischen Dateien der Finite-Elemente-Modelle der betrachteten Bauten sowie numerischen Daten der Zeitverläufe und Berechnungsspektren.

Am 25. Mai 2012 hat das ENSI eine am 11. Mai 2012 angekündigte /112/ Inspektion zum deterministischen Nachweis des 10'000-jährlichen Erdbebens im Kernkraftwerk Mühleberg durchgeführt. Die Inspektion bestand aus einem Fachgespräch, in dem der Umfang der im Nachweis einbezogenen Systeme und Komponenten abgeklärt wurde, und einer Anlagebegehung.



2 Bewertung der Gefährdungsannahmen

2.1 Erdbebengefährdung

Ausgangslage: Projekte PEGASOS und PRP

In Anbetracht der fortwährenden Entwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik verlangte das ENSI im Jahre 1999 von den Kernkraftwerksbetreibern, die Erdbebengefährdung nach dem aktuellen Stand der methodischen Grundlagen neu zu berechnen. Zur Umsetzung der Forderung des ENSI gaben die Kernkraftwerkbetreiber das Projekt PEGASOS (Probabilistische Erdbebengefährdungsanalyse für die KKW-Standorte in der Schweiz) in Auftrag. In Anlehnung an eine in den USA neu entwickelte Methode wurde in diesem Projekt die Erdbebengefährdung unter umfassender Berücksichtigung des Kenntnisstandes der internationalen Fachwelt ermittelt. Dazu wurden Fachleute von erdwissenschaftlichen und unabhängigen fachtechnischen Organisationen aus dem In- und Ausland beigezogen. Mit dem Projekt PEGASOS hat die Schweiz Neuland betreten. Es ist die erste und bisher einzige Studie dieser Art in Europa.

Das Projekt wurde vom ENSI von Anfang an mit einem Expertenteam überprüft. Das ENSI kam zum Schluss, dass mit dem Projekt PEGASOS die methodischen Vorgaben erfüllt wurden und dass hinsichtlich verschiedener Aspekte (Qualitätssicherung, Erweiterung der Methode auf die Charakterisierung der Standorteinflüsse) sogar ein neuer Stand der Technik erzielt wurde. Doch stellte das ENSI auch fest, dass die in den PEGASOS-Ergebnissen ausgewiesene Bandbreite der Unsicherheiten recht gross ist und durch weitere Untersuchungen verkleinert werden könnte.

Mit dem Ziel, die Unschärfe der PEGASOS-Ergebnisse zu reduzieren, starteten die Kernkraftwerkbetreiber im Jahr 2008 das von der swissnuclear geleitete „PEGASOS Refinement Project“ (PRP). Mitte 2009 wurde das PRP auf die damals neu vorgesehenen Kernkraftwerkstandorte erweitert. Die Hauptthemenkreise des Projekts sind wie bereits bei PEGASOS die Charakterisierung der Erdbebenherde, der Wellenausbreitung und der dynamischen Bodeneigenschaften an den Standorten der Kernkraftwerke. Das PRP berücksichtigt die seit dem Abschluss von PEGASOS neu vorliegenden Erkenntnisse aus der Erdbebenforschung und die Resultate aus den neu durchgeführten Messungen der Bodenkennwerte an den Kernkraftwerkstandorten. Voraussichtlich wird das PRP auf Ende 2012 abgeschlossen werden können. Wie das PEGASOS Projekt wird auch das PRP vom ENSI mit einem Expertenteam begleitend überprüft.

Angaben des Betreibers

Der Betreiber bestimmte die Erdbebengefährdung am Standort KKM in zwei Schritten, zuerst für den Felsuntergrund und dann daraus abgeleitet für verschiedene oberflächennahe Niveaus im Lockergestein bis zur Terrainoberfläche.

Für Referenzfelsbedingungen, wie sie für den Standort Mühleberg für eine Tiefe von 44 m festgelegt wurden, berechnete die swissnuclear im Auftrag des Betreibers die Erdbebengefährdung neu /37/. Diese Neuberechnung gründete auf den aktuellen per Mai 2011 aus dem PEGASOS Refinement Project (PRP) verfügbaren qualitätsgesicherten Daten, Expertenmodellen und Praktiken. Da einige Untersuchungen im Rahmen des PRP noch nicht abgeschlossen waren, sind bei der Bestimmung der neuen, PRP Intermediate Hazard (PRP-IH) genannter Gefährdung einige vereinfachende Annahmen gemacht worden. Dabei wurden diese Annahmen bewusst vorsichtig getroffen, um die erwartete endgültige PRP Gefährdung nicht zu unterschätzen.

Die aktuellen Zwischenresultate zur Erdbebengefährdung auf Felsniveau wurden von der Swissnuclear mit Bericht /37/ vom 27.6.2011 dokumentiert und den Schweizer Kernkraftwerken als Grundlage zur Verfügung gestellt. Im Auftrag des Betreibers führte die Interoil AG /38/ Standort-

analysen durch, welche die Ausbreitung der am Fels eingegebenen Erdbebenanregung bis zur Terrainoberfläche abbilden /38/. Dazu wurden die Bodenprofile, welche im Projekt PRP aus den Baugrunduntersuchungen neu erarbeitet wurden verwendet. Das in dieser vorläufigen Auswertung ermittelte Gefährdungsspektrum auf Reaktorgebädefundamentniveau für ein 10'000-jährliches Erdbeben ist durch eine maximale Bodenbeschleunigung (Peak Ground Acceleration, PGA) auf Reaktorgebädefundamentniveau (-14 m) von 0.24 g charakterisiert. Dieser Wert bildet eine Referenz für die vom ENSI geforderten Erdbebenfestigkeitsnachweise.

Der Betreiber vergleicht die PEGASOS Erdbebengefährdung /35/ (UHS, 1E-04/Jahr, mean, 5% Dämpfung) auf Kote Fundamentniveau Reaktorgebäude (-14m) mit der entsprechenden PRP-IH Gefährdung /38/ und gelangt zum Schluss, dass die Spektrenformen im relevanten Frequenzbereich 2 - 20 Hz nicht grundverschieden sind. Basierend darauf entscheidet der Betreiber, dass die Erdbebenfestigkeiten aus der aktuellen probabilistischen Sicherheitsanalyse des KKM MUSA2010 /44/ vorerst verwendet werden, und die Änderung der Spektrenform erst beim definitiven Erdbebenfestigkeitsnachweis durch eine Skalierung der Resultate berücksichtigt wird. Damit wurden die Ende November 2011 mit der Aktennotiz /13/ eingereichten Erdbebenfestigkeiten auf der Grundlage der Spektrenform der PEGASOS Erdbebengefährdung aus der MUSA2010 /44/ bestimmt. Für die Analyse der Bauwerke hat KKM im Projekt MUSA2010 horizontale und vertikale Beschleunigungszeitverläufe hergeleitet, deren Frequenzinhalt den vorgegebenen Spektrenformen entspricht. Diese Zeitverläufe wurden auch für die neuen Erdbebenanalysen verwendet.

Bild 1 zeigt den Vergleich der PEGASOS und PRP-IH Gefährdungsspektren. Die maximale horizontale Bodenbeschleunigung (PGA) entspricht im Bild dem Beschleunigungswert bei der Frequenz von 100 Hertz. Sie ist bei PRP-IH Spektrum mit 0.24 g deutlich kleiner als bei PEGASOS Spektrum mit 0.39 g. Die vertikale Bodenbeschleunigung wird vom Betreiber vereinfachend zu 2/3 der horizontalen Beschleunigung eingesetzt /87/.

Die Bestimmung der Erdbebengefährdung für die im Einflussbereich des KKM liegenden Stauanlagen wird im Kapitel 6 behandelt.

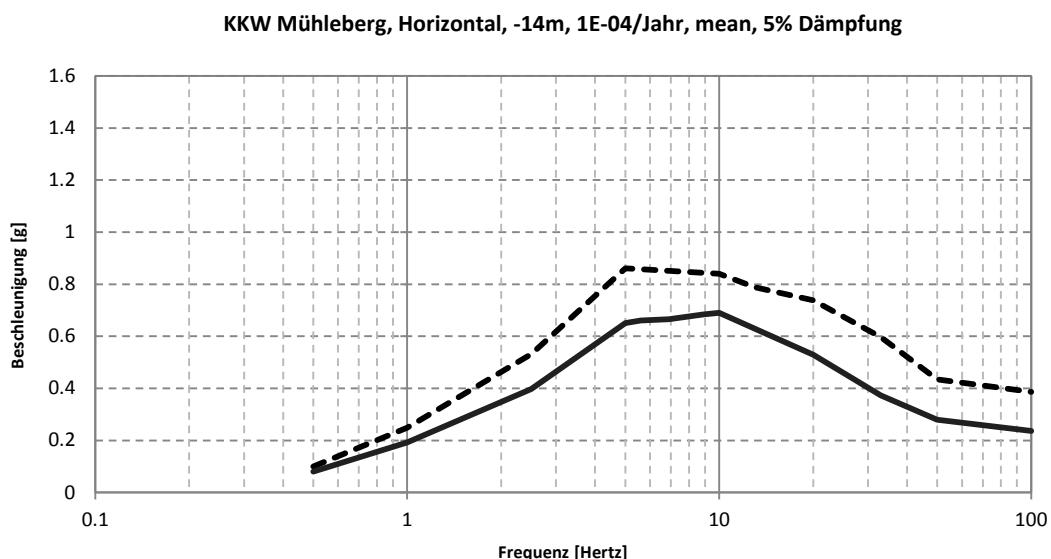


Bild 1: Vergleich der horizontalen Gefährdungsspektren auf Niveau des Reaktorgebädefundaments KKM: PEGASOS (oben) – PRP-IH (unten).



Beurteilung des ENSI

Mit der Verfügung vom 1. April 2011 /106/ forderte das ENSI die Betreiber auf, die seismischen Gefährdungsannahmen neu zu ermitteln. In der vom Betreiber eingereichten Neuberechnung der Erdbebengefährdung auf Referenzfelsniveau /38/ ist dokumentiert, dass diese Berechnung, wie vom ENSI verlangt, auf dem neuen Erdbebenkatalog des Schweizerischen Erdbebendienstes und den aktuellen Resultaten der Abminderungsmodellierung basiert.

Unter Berücksichtigung der bei Bestimmung der PRP-IH Gefährdung getroffenen Annahmen und Vereinfachungen akzeptiert das ENSI die neue Gefährdung als Grundlage für die Erbringung der gemäss Verfügung vom 1. April 2011 /201/ geforderten Nachweise. Es ist jedoch anzumerken, dass die Anwendbarkeit des PRP-IH Gefährdung zeitlich begrenzt wird. Nach Abschluss des PRP wird das ENSI neue Erdbebengefährdungsannahmen festlegen. Auf dieser Grundlage werden die Erdbebensicherheitsnachweise erneut von den Betreibern zu erbringen und vom ENSI zu prüfen sein.

Die PRP-IH Gefährdung mit der maximalen Bodenbeschleunigung (PGA) auf Fundamentniveau von 0.24 g liegt zwischen PEGASOS Gefährdung (PGA von 0.39 g) und der bisher geltenden Gefährdung (PGA von 0.15 g). Das ENSI betrachtet diese Werte als plausibel. Es deutet sich damit an, dass der mit dem PRP angestrebte Abbau der in den PEGASOS-Ergebnissen enthaltenen Unsicherheiten tendenziell zu einer Reduktion des ausgewiesenen Gefährdungsniveaus führt. Anderseits zeigt die deutliche Erhöhung der Gefährdungsniveaus verglichen mit der ursprünglichen Auslegung, dass die von ENSI unterstützten Projekte (PEGASOS und PRP) sinnvoll waren und nach ihrem Abschluss eine verbesserte Grundlage der Beurteilung der Erdbebensicherheit darstellen werden.

Das ENSI hat die beiden standortspezifischen Erdbebengefährdungen (PEGASOS und PRP-IH) vergleichend gegenübergestellt. Betrachtet wurden die Spektren der Bodenbeschleunigung an der Terrainoberfläche und auf dem Fundamentniveau. Die Spektrenform der PRP-IH Gefährdung zeigt eine grössere Amplifikation (auf PGA bezogen) im Bereich der für die Bauwerke und Komponenten relevanten Frequenzen 2-20 Hz als die PEGASOS Gefährdung.

Das ENSI stellt fest, dass der Betreiber die Erdbebengefährdung grundsätzlich in allen vom ENSI überprüften seismischen Berechnungen in Übereinstimmung mit den im Jahre 2010 verfügbaren Ergebnissen der PEGASOS-Studie /37/ festgelegt hat. Das ENSI stellt weiter fest, dass bei der Berechnung der Erdbebenfestigkeiten (siehe Kap. 3.1) nur die Form des Spektrums eine Rolle spielt. Aus diesem Grund ist die vom Betreiber vorgeschlagene Berechnung der Erdbebenfestigkeiten mit der PEGASOS Gefährdung und nachträgliche Umrechnung auf PRP-IH Spektralform mit frequenzabhängigen Skalierungsfaktoren zulässig. Das ENSI hat diese Skalierungsfaktoren geprüft und beurteilt deren Verwendung – im Sinne einer interimistischen Lösung bis die definitive PRP Gefährdung vorliegt – als akzeptabel (siehe Kapitel 4.1).

2.2 Gefährdung Erdbeben in Kombination mit Hochwasser

Angaben des Betreibers

Der Betreiber hat die Beherrschung der Kombination von Erdbeben und dem durch das Erdbeben ausgelösten Versagen der Stauanlagen gemäss der Variante 1 (siehe ENSI Verfügung vom 1. April 2011 /106/) nachgewiesen. Mit diesem Nachweis kann bei einem 10 000-jährlichen Erdbeben eine unkontrollierte Wasserabgabe ausgeschlossen werden.



Beurteilung des ENSI

Gemäss der Verfügung vom 1. April 2011 /106/ ist es nicht erforderlich, den deterministischen Nachweis für die Beherrschung der Kombination von Erdbeben und Versagen der Stauanlagen im Einflussbereich des Kernkraftwerks zu führen, wenn für diese Stauanlagen deterministisch nachgewiesen ist, dass bei einem 10'000-jährlichen Erdbeben eine unkontrollierte Wasserabgabe ausgeschlossen werden kann. Da KKM mit den Bericht /10/ nachweist, dass eine unkontrollierte Wasserabgabe ausgeschlossen ist, sind keine Angaben zur Gefährdung durch Erdbeben in Kombination mit Hochwasser erforderlich.

Beurteilungen des ENSI und des BFE zum Nachweis der Erdbebensicherheit der Stauanlagen im Einflussbereich des Kernkraftwerks findet man im Kap. 6 dieser Stellungnahme.

3 Methodik zur Überprüfung der Erdbebenauslegung

3.1 Methodische Vorgaben

Bei einem deterministischen regelwerksbasierten Erdbebennachweis wird die Erdbebeneinwirkung in der Regel in Form der Trägheitskräfte in Kombination mit anderen möglichen Einwirkungen auf die zu betrachtenden Strukturen, Systemen und Komponenten (SSK) aufgebracht. Die Trägheitskräfte infolge Erdbeben werden mit Hilfe der Bemessungsspektren bestimmt, wobei für die Bauwerke die Spektren der Bodenbeschleunigung und für Systeme und Komponenten die Stockwerksspektren zur Anwendung kommen. Anstelle von Bemessungsspektren werden alternativ auch daraus abgeleitete Erdbebenzeitverläufe als Anregung verwendet.

Die Nachweise der Erdbebensicherheit werden nach den Bestimmungen der entsprechenden Normen und Richtlinien geführt. Um Unsicherheiten bezüglich der Einwirkungen, der Modellierung oder der Materialkennwerte abzudecken, werden Konservativitäten im Nachweis eingebaut, indem die zulässigen Spannungen reduziert und allenfalls die Einwirkungen mit Lastbeiwerten erhöht werden. In der Regel erfolgt der Nachweis eines SSK durch Vergleich der Auswirkung (Beanspruchung, Verschiebung) mit dem durch die Sicherheitsbeiwerte verminderten rechnerischen Widerstand oder Kapazität. Gegebenenfalls sind weitere Nachweise (bruchmechanisch, Standsicherheit, Knicken, Beulen etc.) zu führen. Der deterministische Nachweis ist erbracht, wenn die mit reduzierten Spannungen berechnete Festigkeit einer Struktur grösser ist als die in der Struktur wirkende Summe aller Einwirkungen.

Mit der Verfügung vom 1. April 2011 /106/ wurden auch Nachweise mit Hilfe der seismischen Erdbebenfestigkeiten (Fragilities) wie sie für die probabilistische Erdbebensicherheitsanalyse verwendet werden, zugelassen.

Eine Fragility beschreibt die seismisch bedingte Versagenswahrscheinlichkeit eines Anlagenteils in Abhängigkeit der Bodenerschütterung. Fragilities werden für die relevanten SSK ermittelt. Dabei wird in einem ersten Schritt die Mediankapazität A_m eines SSK bestimmt. Die Mediankapazität entspricht dem 50%-Fraktil der Versagenswahrscheinlichkeit der SSK. In einem zweiten Schritt wird die zweidimensionale Unsicherheitsverteilung der Tragfähigkeit der SSK ermittelt. Diese berücksichtigt sowohl die Unsicherheiten aufgrund der Modellierung (epistemische Unsicherheit β_U) als auch zufällige Variationen der Parameter (aleatorische Unsicherheit β_R).

Aus den so ermittelten Fragility-Kurven werden die sogenannten HCLPF-Tragfähigkeitswerte (High Confidence of Low Probability of Failure) abgeleitet. Der HCLPF-Wert repräsentiert die maximale Bodenbeschleunigung im Referenzpunkt (z.B. Fundamentniveau des Reaktorgebäudes), bei der für die betrachtete SSK eine ca. 1%-ige Versagenswahrscheinlichkeit besteht. Der HCLPF Wert wird mit der Formel

$$HCLPF = A_m e^{-1.65(\beta_R + \beta_U)}$$

berechnet, wobei A_m der Median der Beschleunigungskapazität ist und die Parameter β_R und β_U den logarithmischen Standardverteilungen den aleatorischen und epistemischen Streuungen der Kapazität entsprechen. Anhand der HCLPF-Werte werden schlussendlich für den deterministischen Erdbebensicherheitsnachweis die Sicherheitsmargen beim 10'000-jährlichen Erdbeben ausgewiesen.

Die Methodik zur Ermittlung von Fragilities richtet sich nach den Electric Power Research Institute (EPRI)-Guides /134/ bis /136/. Deterministische Nachweise für druckführende maschinentechni-



nische Komponenten werden nach den Vorgaben des ASME-Codes /145/ geführt. Analog gelten für Stahlbetonbauwerke die Vorgaben aus der Norm SIA 261, wobei für die Erdbebenüberprüfung von bestehenden Bauwerken die Normen SIA 269 und insbesondere das Merkblatt SIA 2018 zur Anwendung kommen. Die Durchführung von Rütteltischversuchen an elektro- oder maschinentechnischen Komponenten richtet sich nach der KTA2201.4 /146/ sowie der IEEE /147/.

3.2 Prüfverfahren des ENSI

Um die Aussagen des Betreibers zum deterministischen Nachweis des Betreibers zur Beherrschung des 10'000-jährlichen Erdbebens beurteilen zu können, prüfe das ENSI ausgehend von den im Kapitel 2 dargelegten Gefährdungsannahmen die drei Analyseschritte des Erdbeben-nachweises wie folgt.

Prüfung der Auswahl der relevanten Sicherheitssysteme und der dazugehörigen Komponenten

Das ENSI hat geprüft, ob unter den in der Verfügung vom 1. April /106/ festgelegten Randbedingungen (s. Kapitel 1.1 und Kapitel 3.1) die zur Beherrschung des 10'000-jährlichen Erdbebens erforderlichen Sicherheitsfunktionen und Sicherheitssysteme (einschliesslich deren Hilfssysteme) vom Betreiber identifiziert wurden.

Um die geforderte Kernkühlung zu gewährleisten bedarf es folgender Sicherheitsfunktionen /132/:

- Abschaltssicherheit,
- Kühlmitteleinspeisung in den Reaktordruckbehälter (RDB),
- Wärmeabfuhr aus dem RDB und dem Containment,
- Bereitstellung und Erhalt des Kühlmittels.

Sofern der Betreiber mehr als einen Pfad zum Abfahren der Anlage in einen sicheren Zustand beim Erdbeben-nachweis kreditiert hat, konzentriert sich die Prüfung auf den seismisch robustesten Abfahrtspfad. Als sicherer Zustand gilt, wenn die Anlage mindestens in den Zustand „Heiss-Abgestellt“ gebracht wird und dort längerfristig (mindestens 72 Stunden) gehalten werden kann.

Des Weiteren wurde geprüft, ob alle Bauwerke und Ausrüstungen identifiziert wurden, die für die einzelfehlersichere Funktion der Sicherheitssysteme erforderlich sind. In diesem Zusammenhang wurden auch Anlagenbegehungen durchgeführt, um zu prüfen, inwieweit diese Bauwerke und Ausrüstungen durch das erdbebenbedingte Versagen anderer, nicht zur Störfallbeherrschung erforderlicher Bauwerke und Ausrüstungen (sogenannte indirekte Auswirkungen) gefährdet werden können. Die Ergebnisse der Prüfung sind in Kapitel 4.1 dargestellt.

Entsprechend den Ausführungen in Kapitel 1.1 wurde auch noch geprüft, ob unter den in der Verfügung vom 1. April 2011 festgelegten Randbedingungen die Brennelementbeckenkühlung sichergestellt ist. Hierzu bedarf es der Wärmeabfuhr aus den BE-Lagerbecken und des Erhalts der Integrität der BE-Lagerbecken. Die Ergebnisse der Prüfung sind in Kapitel 5.1 dargestellt.

Prüfung der Erdbebengefährdung für die Bauwerke, Systeme und Komponenten

Das ENSI hat die Erdbebenberechnungen von KKM nachvollzogen. Es hat Stichproben und Resultatvergleiche für die drei Berechnungsschritte Bestimmung der Erdbebenanregung, Boden-Bauwerks-Interaktionsanalyse und Strukturanalyse durchgeführt, um die Qualität der Nachweise und die Plausibilität der Resultate zu beurteilen.

Die als Erdbebenanregung in die seismischen Gebäudeanalysen eingegebenen Gefährdungsannahmen wurden durch Vergleiche der verwendeten Uniform Hazard Spektren (UHS) mit den



aus dem Pegasos Refinement Project als Zwischenresultate (PRP-IH) bestimmten UHS und durch die Kontrolle der verwendeten Skalierungsfaktoren geprüft. Im Weiteren hat das ENSI mit eigenen Berechnungen geprüft, ob die aus den UHS hergeleiteten Beschleunigungszeitverläufe den Frequenzgehalt der Erdbebenanregung korrekt repräsentieren.

Für die Boden-Bauwerks-Interaktionsanalysen hat das ENSI die Bodenprofile und mit Stichproben die Eingabedaten der Gebäudemodelle geprüft. Es beurteilt die modellierte Gebäudegeometrie und die mit den Modellen repräsentierten Eigenfrequenzen und Schwingungsformen aufgrund von Plausibilitätskontrollen.

Prüfung der Erdbebenfestigkeiten

Bei der Prüfung der Erdbebenfestigkeiten von Bauwerken, Systemen und Komponenten durch das ENSI werden die Fragilities im Hinblick auf ihre Verwendung für den deterministischen Erdbebensicherheitsnachweis bewertet. Die Prüfung des ENSI umfasst folgende Schritte:

- Die Prüfung der zur Herleitung der probabilistischen Fragilities verwendeten Methodik,
- die Überprüfung von stichprobenartig ausgewählten Bauten und Komponenten auf der Basis von Auslegungsberechnungen oder vergleichbaren regelwerksbasierten Analysen oder Versuchen sowie
- die Überprüfung der unterstellten Versagensmechanismen.

Das ENSI hat die Fragilities auf Plausibilität hinsichtlich der Verwendung für den deterministischen Erdbebensicherheitsnachweis geprüft. Mit der Plausibilitätsprüfung begutachtete das ENSI die Fragilities und HCLPF-Werte der relevanten Gebäude und Komponenten. Die Plausibilitätsprüfung erfolgte auf qualitativer Basis. Einige Fragility-Analysen wurden einer vertieften Überprüfung unterzogen. Dabei wurden einzelne Berechnungsschritte nachvollzogen und insbesondere beurteilt, ob einzelne Variablen der Fragility-Berechnung, wie Dämpfung, Eigenfrequenz oder Festigkeit glaubwürdig hergeleitet und kreditiert wurden.

Zudem wurde auch eine Plausibilisierung der HCLPF mit deterministischen Methoden vorgenommen. So wurden insbesondere Fragility-Berechnungen aller relevanten Bauwerke vertieft geprüft. Das ENSI hat zu diesem Zweck unabhängige Vergleichsrechnungen, Plausibilitätsbe trachtungen und Vergleiche mit vorgängig geprüften Berechnungen durchgeführt. Es hat dabei auch die für die Bauwerke angenommenen Versagensarten hinterfragt.

Die deterministische Überprüfung der Fragility-Berechnungen von mechanischen Komponenten erfolgte auf der Basis von Auslegungsberechnungen oder vergleichbaren regelwerksbasierten Analysen. Durch Vergleich der ursprünglichen angesetzten Lasten und der vorhandenen Sicherheitsmargen der Spannungsnachweise mit den aus der neuen Gefährdungsannahme abgeleiteten Werten, lassen sich die HCLPF-Werte unabhängig plausibilisieren.

Für die unabhängige Überprüfung der seismischen Festigkeit von elektrischen Ausrüstungen wurde auf die vor der Montage durchgeführten Schwingungstests zurückgegriffen. Der Plausibilitätsnachweis basiert auf dem Vergleich der damals angesetzten und somit ausgewiesenen Prüf beschleunigungswerte mit den entsprechenden Werten aus den verwendeten Etagenspektren.

Prüfung der radiologischen Nachweise

Mit Hilfe radiologischer Analysen wird nachgewiesen, dass für alle während der Lebensdauer einer Anlage zu erwartenden und für alle nach menschlichem Ermessen nicht auszuschliessenden Störfälle die Anlage so ausgelegt ist, dass dabei keine für die Umgebung unzulässigen Dosen auftreten. Generell umfassen die für die Bestimmung der radiologischen Auswirkungen notwendigen Analysen:

- den Aufbau des Aktivitätsinventars im Brennstab und im Reaktorkühlmittel;
- den Transport radioaktiver Stoffe innerhalb der Anlage bis zur Freisetzung in die Umgebung (Bestimmung des Quellterms);
- die Ausbreitung der freigesetzten radioaktiven Stoffe in der Atmosphäre und Ablagerung auf dem Boden;
- die Strahlenbelastung der Bevölkerung.

Es entspricht der internationalen Praxis, für den Nachweis der Einhaltung von Dosiswerten konservative Berechnungsergebnisse zu verlangen. Damit wird sichergestellt, dass die ausgewiesenen Dosen einen oberen Wert der zu erwartenden radiologischen Auswirkungen darstellen.

Das ENSI hat die eingereichten Rechenmodelle sowie deren Annahmen und Eingabeparameter auf Nachvollziehbarkeit und Plausibilität überprüft. Punktuell wurden Quelltermbeiträge auch nachgerechnet und auf Übereinstimmung mit Anforderungen der ENSI-A08 /130/ überprüft. Für die grössten Dosisbeiträge hat das ENSI gemäss ENSI-G14 /131/ die Auswirkungen in der Umgebung nachgerechnet und mit den Ergebnissen von KKM verglichen.

3.3 Nachweisführung durch die Betreiber

Angaben des Betreibers

Der vom KKM eingereichte deterministische Nachweis zur Beherrschung des 10'000-jährlichen Erdbebens umfasst ausgehend von den im Kapitel 2 dargelegten Gefährdungsannahmen folgende Analyseschritte:

- Identifikation der zur einzelfehlersicheren Beherrschung des Erdbebens (Kern- und Brennelementbeckenkühlung) erforderlichen Bauwerke, Systeme und Komponenten (SSK).
- Ermittlung der Erdbebengefährdung für die SSK
- Ermittlung der Erdbebenfestigkeiten der erforderlichen Bauwerke, Systeme und Ausrüstungen und Nachweis der Erdbebensicherheit.
- Ermittlung der radiologischen Konsequenzen des Erdbebens.

Auswahl der relevanten SSK

Das KKM führt den Nachweis, dass die Anlage nach einem 10'000-jährlichen Erdbeben mit Sicherheitsfunktionen, die automatisch vom Notstandssystem SUSAN ausgelöst werden, in einen sicheren Zustand überführt und für mindestens drei Tage stabil gehalten werden kann /6/. Als Folge des Erdbebens unterstellt das KKM den Ausfall der externen Stromversorgung. Des Weiteren wird als vom Erdbeben unabhängiger Einzelfehler angenommen, dass eine Division des zweisträngigen Notstandssystems SUSAN zur Sicherstellung der Kernkühlung nicht verfügbar ist. Generell wird von der Nichtverfügbarkeit aller Systeme ausgegangen, deren Erdbebenfestigkeit nicht untersucht wurde oder die keine ausreichende Erdbebenfestigkeit aufweisen. Es wird analysiert, welche der für den Erdbeben nachweis erforderlichen Systeme während drei Tagen betrieben werden müssen und in welchem Umfang Betriebsmittel benötigt werden. Begrenzend für die Einsatzdauer des Notstandssystems ist die Verfügbarkeit der Betriebsmittel für die SUSAN-Dieselgeneratoren. Aufgrund der auf der Anlage verfügbaren Kraftstoffvorräte können diese über 72 Stunden betrieben werden.

Für die Wärmeabfuhr aus dem Brennelementlagerbecken wird das bestehende Kühl- und Reinigungssystem nicht kreditiert. Die Wärmeabfuhr erfolgt passiv über Verdunstung des Wasserdampfes innerhalb des Reaktorgebäudes. Zur Aufrechterhaltung des Wasserinventars im Brennelementlagerbecken werden innerhalb der ersten 72 Stunden Notfallschutzmassnahmen berücksichtigt, für die entsprechende Störfallanweisungen vorliegen und die unter ausschliesslicher

Verwendung auf dem Anlagengelände vorhandener und durch das Erdbeben nicht betroffener Ausrüstungen durchgeführt werden können. Die Auswirkungen eines Versagens der Brennlementlagerbeckenanschlüsse hinsichtlich eines unzulässigen Füllstandsabfalls in den Brennlementlagerbecken werden analysiert /15/.

Das KKM zeigt auf, dass die Integrität und Standfestigkeit der Stauanlagen Mühleberg, Rossens und Schiffenen beim 10'000-jährlichen Erdbeben gewährleistet ist und somit keine unkontrollierte Wasserabgabe zu erwarten ist, die die Anlagensicherheit gefährden könnte /10/.

Ermittlung der Erdbebengefährdung für die SSK

Der Betreiber hat für die Berechnung der Erdbebenfestigkeiten die im Rahmen der letzten PSA Studie MUSA2010 bestimmten Zeitverläufe und Etagenspektren verwendet (siehe auch Kapitel 4.2.2).

Ermittlung der Erdbebenfestigkeiten für die SSK

Bei der Beurteilung der Erdbebenfestigkeit eines aus mehreren Komponenten bestehenden Systems wird grundsätzlich wie folgt vorgegangen: Die Erdbebenfestigkeit einer Funktionskette ergibt sich als Minimum der Erdbebenfestigkeiten der Komponenten. Dies spiegelt den Gedanken wieder, dass eine Kette nur so stark ist wie ihr schwächstes Glied. Andererseits ergibt sich die Erdbebenfestigkeit des Gesamtsystems als Maximum der verfügbaren Funktionsketten. Hier spiegelt sich wieder, dass der Erfolg einer Redundanz ausreichend ist - auch wenn eine schwächere Redundanz versagt.

Das KKM verwendet für den deterministischen Erdbebensicherheitsnachweis grundsätzlich die Erdbebenfestigkeiten (Fragilities), die für die probabilistische Erdbebensicherheitsanalyse (Erdbeben-PSA) ermittelt wurden. Für das Notstandsgebäude SUSAN wurde die HCLPF-Kapazität auch nach der CDFM Methode bestimmt.

Bei der Bestimmung der Erdbebenfestigkeit werden die Tragfähigkeit beim angenommenen Versagenmechanismus und die inelastische Energiedissipationsfähigkeit berücksichtigt. Ebenfalls berücksichtigt wird die die Boden-Bauwerk-Wechselwirkung, Dämpfung, Frequenz, modale Form und Torsionskopplung. Da die Erdbebeneinwirkungen auf Komponenten ortsabhängig sind und vom Schwingungsverhalten der Bauwerke abhängen, werden die sogenannten Etagenantwortspektren zur Bestimmung der lokalen Erdbebeneinwirkungen erstellt.

Das Versagen wird für Bauwerke und Komponenten unterschiedlich modelliert. Bei Bauwerken bestimmt das Erreichen der Grenze der Tragfähigkeit eines Bauteils oder das Erreichen eines bestimmten Grenzwerts der differentiellen Stockwerksverschiebung den Versagensfall. Bei Komponenten wird die Beeinträchtigung der Funktionalität als zusätzlicher Versagensfall definiert. Die Erdbebenfestigkeit kann entweder analog zu den Bauwerken berechnet oder mittels dynamischer Versuche bestimmt werden.

Der deterministische Nachweis der Erdbebenfestigkeit wird von KKM anhand der HCLPF-Kapazitäten geführt. Diese müssen grösser sein als der Wert der maximalen Bodenbeschleunigung (PGA) beim 10'000-jährlichen Erdbeben des PRP-IH auf Reaktorgebäudefundamentniveau (-14 m).

$$HCLPF \geq 0.24g$$

Die von KKM für den deterministischen Erdbebensicherheitsnachweis ausgewiesenen Fragilities basieren auf den Fragility-Analysen die im Rahmen der probabilistischen Sicherheitsanalyse im Jahre 2010 durchgeführt wurden (MUSA2010). Für die Bestimmung der Fragilities hat KKM das

Verfahren "Separation of Variables" gemäss EPRI /135/ angewendet. Als Erweiterung dieses Verfahrens hat das KKM die Erdbebeneinwirkung durch 30 verschiedene Zeitverläufe beschrieben. Mit diesen Zeitverläufen wurden Gebäude-Baugrund-Wechselwirkungen und Gebäude-Erdbebenanalysen durchgeführt.

Eine grössere Anzahl Fragilities wurden nach dem EPRI Verfahren /134/ generisch bestimmt. Dabei werden anhand von Erdbebenrundgängen von Expertenteams seismisch robuste Komponenten identifiziert und eine gemäss /134/ konservativ bestimmte, generische Erdbebenfestigkeit zugeordnet. Das KKM betont, dass vollständige Fragility-Analysen durchgeführt werden müssten, falls aufgrund der neuen Gefährdungsannahmen diese generisch bestimmten konservativen Werte limitiert werden. Im Rahmen der Erdbebenrundgänge wurde auch die Identifikation und Bewertung von allfälligen Komponenten, die im Erdbebenfall die betrachtete Komponente gefährden könnten, vorgenommen. Wenn solche Komponenten identifiziert wurden, und deren Festigkeit tiefer war als diejenige der betrachteten Komponente, so wurde der tiefere Wert für den Festigkeitsnachweis massgebend.

Die Fragility-Analysen der MUSA 2010 sind auf Basis der Spektralform für die Erdbebengefährdung nach PEGASOS durchgeführt worden. Das ENSI verlangte jedoch in seiner Verfügung /106/ dass die seismischen Gefährdungsannahmen aus den PRP-Zwischenresultaten zu berücksichtigen sind. Das KKM hat deshalb die HCLPF-Tragfähigkeitswerte der betrachteten Strukturen, Systeme und Komponenten auf die Spektralform der neuen Gefährdungsannahmen gemäss PRP-IH skaliert.

Mit den Ende März 2012 eingereichten Dokumenten hat der Betreiber, wie in der Aktennotiz /13/ angekündigt, den Bericht /87/ mit Skalierungsfaktoren zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Spektrenform von PEGASOS und PRP-IH eingereicht. Die auf der Basis der PEGASOS Gefährdung ermittelten Fragilities werden mit je einem Skalierungsfaktor korrigiert, um der Spektrenform der PRP-IH Gefährdung Rechnung zu tragen. Der Skalierungsfaktor F wird vom Betreiber auf Basis der UHS Spektren (Mean, 1.0E-04/Jahr, Fundamentniveau RG), von PEGASOS und PRP-IH wie folgt ermittelt:

$$F = F_{PGA}/F_{SA}$$

wobei F_{PGA} das PGA - Verhältnis zwischen PEGASOS und PRP-IH und F_{SA} das Verhältnis der Spektralbeschleunigungen von PEGASOS und PRP-IH bei der für das Versagen des betrachteten Gebäudes, Komponente oder Systems relevanten Eigenfrequenz ist. Die median PRP Fragilities $A_{m,PRP}$ werden dann durch Multiplikation der median PEGASOS Fragilities $A_{m,P}$ mit dem Skalierungsfaktor F ermittelt und die zugehörigen HCLPF Werte entsprechend angepasst.

Ermittlung der radiologischen Konsequenzen des Erdbebens

KKM führt den Nachweis, dass die Anlage in einen sicheren Zustand überführt und für mindestens drei Tage stabil gehalten werden kann. Es werden die radiologischen Auswirkungen eines Erdbebens im Sicherheitsbericht des KKM /42/ konservativ als kombinierte Auswirkung der folgenden Ereignisse bestimmt /6/:

- Versagen einer Abgasleitung
- Versagen eines Aktivkohlefilters
- Frischdampfleitungsbruch im Maschinenhaus
- Bruch einer Speisewasserleitung innerhalb des Maschinenhauses

Mit diesen vier Beträgen ist das gesamte radioaktive Inventar, das bei Versagen von Komponenten im Maschinenhaus freigesetzt werden kann, abgedeckt. Das heisst insbesondere, dass die



Analyse der radiologischen Auswirkungen auch bei dem betrachteten Referenzerdbeben, das stärker als das Auslegungserdbeben in der ursprünglichen Analyse ist, gültig bleibt /6/. Ergänzend wurde die Freisetzung von Aktivität aus den Harzsammelbehältern im Aufbereitungsgebäude betrachtet. Zusätzlich wurde für das Erdbebenszenario auch die Folgedosis bei Versagen des Kaltkondensatbehälters abgeschätzt.

Im Zusammenhang mit dem Brennelementbecken wurden separate Beurteilungen durchgeführt, welche die maximalen Verdunstungs- und Verdampfungsverluste einschliesslich derjenigen für den begrenzenden Fall (Eintreten des Erdbebens nach dem Ende des Brennelementwechsels, mehr als zwei Wochen nach der Reaktorabschaltung, und postulierte Versagen der Dammplatte zwischen dem Brennelementbecken und der Reaktorgrube) berücksichtigen.

Beurteilung des ENSI

Auswahl der relevanten SSK

Das ENSI ist der Ansicht, dass das KKM im zu erbringenden Erdbebenachweis die in der Verfügung vom 1. April 2011 /106/ festgelegten systemtechnischen Randbedingungen vollenfänglich berücksichtigt. Der in der Verfügung vom 5. Mai 2011 /107/ festgelegte Prüfumfang für die Brennelementlagerbecken wird durchgeführt.

Aufgrund der Bestätigung der Integrität und Standsicherheit der in der Nähe des KKM gelegenen Stauanlagen in Kapitel 6 kann davon ausgegangen werden, dass durch das 10'000-jährliche Erdbeben kein Hochwasser ausgelöst wird, das die Kühlwasserversorgung des vom KKM zur Erdbebenbeherrschung kreditierten Notstandssystems gefährdet.

Ermittlung der Erdbebengefährdung für die SSK

Gemäss der Verfügung vom 1. April 2011 /106/ sind die aktuellen Resultate der PRP Studie (PRP-IH) als Grundlage für die Erdbebenberechnungen und Nachweise zu verwenden. Die Verwendung der vorhandenen Zeitverläufen und Etagenspektren aus der MUSA2010 Studie für die neuen Nachweise betrachtet das ENSI jedoch als einen zulässigen Zwischenschritt, weil die Erdbebenfestigkeiten vom PEGASOS auf das PRP-IH Niveau mit Hilfe eines Skalierungsfaktors umgerechnet werden.

Ermittlung der Erdbebenfestigkeiten für die SSK

Das ENSI stellt fest, dass die vom Betreiber angewendeten Methoden zur Ermittlung der seismischen Fragilities dem Stand der Technik für Kernkraftwerke entsprechen. Dabei sind folgende Punkte zu erwähnen:

- Die Vorgehensweise zur Bestimmung der seismischen Fragilities stimmt mit den Vorgaben aus der Electric Power Research Institute (EPRI) Dokumentationen (/134/, /135/, /136/) überein.
- Die HCLPF-Tragfähigkeitswerte sind korrekt aus den Fragility-Kurven bzw. den Parameter A_m , β_R und β_U berechnet.
- Das ENSI beurteilt das vom KKM angewendete Skalierungsverfahren zur Berücksichtigung der aktuell anzunehmenden Erdbebengefährdung PRP-IH, im Sinne einer interimistischen Lösung bis die definitive PRP-Gefährdung vorliegt, als zweckmässig und korrekt.



Ermittlung der radiologischen Konsequenzen des Erdbebens

Der Betreiber verfolgt den Ansatz, wonach der Integritätsverlust der nicht gegen das betrachtete Erdbeben ausgelegten Teile der Abgasanlage, Frischdampf- und Speisewasserleitungen pauschal unterstellt wird und ihre Dosisbeiträge summiert werden. Insgesamt vertritt das ENSI jedoch die Ansicht, dass für den Nachweis der Einhaltung von radiologischen Grenzwerten ein mit dem auslösenden Ereignis (hier Erdbeben) durchgehend konsistentes Schadensbild zu ermitteln und zu unterstellen ist. Der von KKM gewählte Ansatz ist nach Ansicht des ENSI im Rahmen dieses Nachweises jedoch akzeptabel (vgl. Abschnitt 4.3).

4 Erdbebenachweis für die Kernkühlung

4.1 Erforderliche Bauwerke und Systeme

Angaben des Betreibers

Für die Sicherstellung der Kernkühlung werden in /6/ nachfolgende Sicherheitssysteme auch bei Annahme eines Einzelfehlers erfüllt. Hierbei handelt es sich vorwiegend um Teilsysteme des Notstandssystems SUSAN, die entweder automatisch oder passiv ausgelöst werden.

- Alternatives Reaktorabschalt- und -isolationssystem (ARSI)
- Steuerstabsantriebssystem (CRD) – Schnellabschaltung (SCRAM)
- Abblaseventile (SRV/SV) – Sicherheitsmodus (passiv)
- RDB Isolationsarmaturen (Abschluss der Frischdampfleitungen (MSIV), der Reaktorwasserreinigung und der Anwärmleitungen für die Frischdampfleitungen)
- Kernisolationskühlsystem (RCIC)
- Druckentlastungsventile (PRV)
- Alternatives Niederdruckeinspeisesystem (ALPS)
- Toruskühlsystem (TCS)
- SUSAN Hilfs- und Unterstützungssysteme
 - Diesel Generator mit Tages- und Haupttank
 - SUSAN Stromversorgung
 - Kühlwasser- (CWS) und Zwischenkühlwassersystem (ICWS)

Hierbei handelt es sich vorwiegend um Teilsysteme des zweisträngigen Notstandssystems SUSAN, die automatisch ausgelöst werden. Mit diesen Systemen wird die Anlage auch bei Annahme eines Einzelfehlers (Ausfall einer SUSAN Division) wie nachfolgend gezeigt in einen sicheren Zustand überführt und dort langfristig (mindestens 72 Stunden) gehalten.

Reaktorschnellabschaltung

Die Reaktorschnellabschaltung (SCRAM) wird durch einen tiefen RDB Füllstand oder über eine hohe Wassertemperatur im Torus ausgelöst. Die SCRAM-Anregung erfolgt über das alternative Reaktorabschalt- und -isolationssystem (ARSI) und bewirkt das schnelle Einfahren der Steuerstäbe durch das Steuerstabsantriebssystem (CRD). Für die Ermittlung der seismischen Robustheit der Abschaltfunktion (s. Kapitel 4.3.2) werden von KKM in /8/ die für die Funktion erforderlichen Ausrüstungen detailliert untersucht.

Kühlmitteleinspeisung und Druckentlastung

Die Kühlmitteleinspeisung erfolgt zuerst im Hochdruckbereich durch das RCIC, welches durch das ARSI bei einem tiefen RDB-Füllstand angeregt wird. Das Niederdruckeinspeisesystem ALPS wird ebenfalls bei tiefem RDB-Füllstand angeregt, speist jedoch erst bei einem tieferen Druck ein, nachdem eine Druckentlastung durch die beiden Druckentlastungsventile (PRV) stattgefunden hat. Die PRV werden nach einem SCRAM mit einer Verzögerung von 30 Minuten über die Auslösung „Reaktordruck hoch“ geöffnet. Die Druckbegrenzung des Reaktordruckbehälters wird durch die vier Sicherheitsabblaseventile (SRV) und zwei Sicherheitsventile (SV) gewährleistet, welche auch bei Ausfall der Druckluftversorgung gestaffelt und selbsttätig gegen eine Federkraft öffnen und in die Wasservorlage des inneren Torus abblasen.

Wärmeabfuhr

Die Wärmeabfuhr aus dem inneren Torus wird über die im SUSAN-Gebäude untergebrachten Systeme TCS und CWS realisiert. Dabei wird die Wärme vom Torus über einen Wärmetauscher an das CWS-System übertragen und an die Aare abgeleitet. Das TCS-System wird dabei über das ARSI durch einen tiefen Füllstand im RDB oder einer hohen Wassertemperatur im Torus angeregt. Das SUSAN Kühlwassersystem CWS wird ebenfalls bei tiefem RDB-Füllstand angeregt. Das TCS führt auch die Wärme der SUSAN-Diesel über das SUSAN Zwischenkühlwassersystem ICWS ab. Die zur Wärmeabfuhr erforderlichen Systeme werden von den beiden SUSAN-Dieseln mit Strom versorgt. Die SUSAN-Diesel selbst starten bei tiefem RDB-Füllstand oder bei Ausfall der externen Stromversorgung. KKM weist für die SUSAN-Diesel sowie für die zu deren sicheren Betrieb erforderlichen Hilfssysteme Erdbeben-festigkeitskennwerte aus. Die Diesekraftstoff- und Schmierölversorgung sind zeitlich begrenzend für die langfristige Stromversorgung und sind für 120 Stunden automatisch sichergestellt. Die SUSAN-Diesel selbst sind für Dauerbetrieb ausgelegt.

Isolation des Reaktordruckbehälters

Die Isolation des Reaktordruckbehälters (RDB) findet gleichzeitig mit dem Start der SUSAN-Systeme durch die Anregung „tiefer RDB-Füllstand“ statt. Die Frischdampfisolation durch die MSIVs (Main Steam Isolation Valves) erfolgt nach dem Fail Safe Prinzip auch bei Stromausfall oder bei Ausfall der Steuerluft. Die Isolationsarmaturen des Reaktorreinigungssystems sowie der Frischdampf-Anwärmleitung bleiben nach Anforderung im geschlossenen Zustand und benötigen keine Hilfsenergie mehr.

In einem weiteren Schritt führt KKM die mechanischen und elektrischen Ausrüstungen sowie die Bauwerke auf, die für die Funktion der oben genannten Sicherheitssysteme erforderlich sind, und weist für diese die Erdbebenfestigkeiten aus. Ausrüstungen die seismisch nicht ausreichend robust sind und die zur Erdbebenbeherrschung erforderlichen Ausrüstungen und Bauwerke gefährden können, wurden im Rahmen von Erdbebenrundgängen durch Expertenteams erfasst und bewertet /93/. Als nachzuweisende Bauwerke wurden vom KKM

- das Reaktorgebäude einschliesslich Drywell sowie inneren und äusseren Torus,
- das Notstandgebäude einschliesslich zugehörigem Ein- und Auslaufbauwerk sowie
- der Abluftkamin aufgrund einer möglichen Gefährdung der beiden anderen Gebäude identifiziert.

Beurteilung des ENSI

Das ENSI hat den eingereichten Erdbebennachweis basierend auf den in Kap. 3.2 aufgeführten Anforderungen daraufhin geprüft und bewertet, ob die für die Sicherstellung der Kernkühlung erforderlichen Strukturen, Systeme und Komponenten (SSK) berücksichtigt wurden.

Aus Sicht des ENSI sind die in Kap. 3.2 genannten Sicherheitsfunktionen für die Gewährleistung der Kernkühlung volumäiglich im Erdbebennachweis des KKM abgedeckt. Die zur einzelfehlersicheren Ausführung dieser Sicherheitsfunktionen benötigten Sicherheitssysteme wurden umfassend identifiziert.

Bei tiefem RDB-Füllstand werden im KKM neben den direkt an den RDB anschliessenden Leitungen (Isolation des RDB) weitere mit der Containment-Atmosphäre in Verbindung stehende Leitungen geschlossen, um einen Austrag radioaktiver Stoffe zu verhindern. Im Rahmen einer Inspektion im Mai 2012 hat sich das ENSI davon überzeugt, dass die zur Containmentisolation gehörenden Durchdringungen und Absperrarmaturen in den von externen Experten und KKM-Betriebspersonal durchgeführten seismischen Anlagenrundgängen beurteilt wurden. Die im Be-

gehungsbericht /45/ festgehaltenen Durchdringungen und Absperrarmaturen der Containmentisolation erachtet das ENSI basierend auf einer Stichprobenprüfung als weitgehend umfassend. Im Rahmen der ENSI-Verfügung vom 10. Januar 2012 /110/ wird die Containmentisolation einer detaillierten Prüfung unterzogen.

Die im Hinblick auf die Beurteilung der seismischen Robustheit der Abschaltfunktion (CRD-SCRAM-Funktion) durchgeführte Ausfalleffektanalyse bewertet das ENSI als korrekt und vollständig. Die Analyse umfasst die für die Reaktorschneellschaltung erforderlichen Komponenten.

In den Erdbebennachweis sind alle Bauwerke einbezogen worden, deren Standfestigkeit für die Sicherstellung der Kernkühlung erforderlich sind. Der Umfang der nachzuweisenden mechanischen und elektrischen Ausrüstungen wurde aufgrund der Vielzahl vom ENSI stichpunktartig anhand der Systemschemata und weiterer System- und Betriebsdokumente geprüft und wird als plausibel beurteilt. Für die jeweiligen Gebäude und Ausrüstungen wurden Erdbebenfestigkeiten seitens KKM ermittelt.

Im Rahmen einer Inspektion im Mai 2012 hat sich das ENSI davon überzeugt, dass die zur Störfallbeherrschung erforderlichen Ausrüstungen nicht durch andere, seismisch schwächere Ausrüstungen gefährdet werden können, was insbesondere auf die weitgehende räumliche Trennung der Notstandausrüstungen zurückzuführen ist. Des Weiteren konnte das KKM aufzeigen, dass die bestehenden systemtechnischen Schnittstellen zwischen Notstandssystemen und nicht im Erdbebennachweis kreditierten Sicherheitssystemen (z.B. ALPS/Kernsprühssystem) im Rahmen von Erdbebenrundgängen aufgenommen und deren Erdbebenfestigkeiten ermittelt wurden.

Zusammenfassend kommt das ENSI zu dem Ergebnis, dass alle zur langfristigen Sicherstellung der Kernkühlung erforderlichen SSK über den vom KKM eingereichten Erdbebennachweis abgedeckt sind und für diese Erdbebenfestigkeitsnachweise eingereicht wurden.

4.2 Erdbebengefährdung für die Bauwerke und Ausrüstungen

Angaben des Betreibers

Als Auslegungsrechnungen sind bei KKM die im Rahmen der seismischen Requalifikation und der Nachrüstprojekte (insbesondere Notstandssystem SUSAN) durchgeführten Erdbebenberechnungen massgebend. Diese weisen nach, dass die an die Bauwerke gemäss Sicherheitsbericht gestellten Auslegungsanforderungen erfüllt werden. KKM hat die entsprechenden Berechnungen dem Erdbebennachweis beigelegt, so z.B. Bericht /103/ für das Reaktorgebäude.

Als Grundlage für die Berechnung der Erdbebenfestigkeiten (Fragilities) der Bauwerke und der Komponenten hat KKM bereits mit dem Projekt MUSA2010 /44/ und ergänzend dazu im Jahre 2011 neue Erdbebenberechnungen durchgeführt. Für den Nachweis der Kernkühlung sind dabei vor allem die Boden-Bauwerks-Interaktionsanalysen (Soil-Structure-Interaction, SSI) für das Reaktorgebäude und das SUSAN-Gebäude (/71/ und /73/) massgebend. Drei verschiedene SSI Berechnungen wurden jeweils für die gleichen Gebäude mit den im Folgenden beschriebenen Zielsetzungen durchgeführt.

Deterministische Gebäudeantwortspektren

Deterministische SSI-Berechnungen zur Bestimmung der Gebäudeantwortspektren (In Structure Response Spectra ISRS) des Reaktor- und SUSAN-Gebäudes. Die deterministischen Berechnungen dienen als Grundlage für das Verständnis der Boden-Bauwerks-Interaktionsanalysen und für die anschliessenden probabilistischen Berechnungen.

Die deterministische SSI-Berechnung und die deterministischen Gebäudeantwortspektren (ISRS) des Reaktorgebäudes sind in der MUSA2010 /44/ mit Bericht /100/ dokumentiert. Es werden darin die deterministischen ISRS für verschiedene Orte und Richtungen berechnet und dargestellt. Dabei werden für die deterministische Berechnung nur median Bodenparameter (ohne Variation) verwendet. Als Input für diese SSI-Berechnung dient das Gebäudemodell des Reaktorgebäudes gemäss /101/, die zur Erdbebengefährdung gemäss PEGASOS (1E-04/Jahr, mean) konformen horizontalen und vertikalen Beschleunigungszeitverläufe an der Geländeoberfläche sowie das Baugrundmodell gemäss /102/ welches einem Zwischenstand des PEGASOS Refinement Projects PRP (Stand 2009) entspricht. Die analoge deterministische SSI-Berechnung und die ISRS des SUSAN-Gebäudes sind ebenfalls im Bericht /100/ dokumentiert.

Probabilistische Gebäudeantwortspektren

SSI-Berechnungen zur Bestimmung der probabilistischen Gebäudeantwortspektren (ISRS) des Reaktor- und SUSAN-Gebäudes. Die probabilistischen ISRS Spektren stellen die Einwirkungen für die Berechnung der Erdbebenfestigkeiten (Fragilities) der Systeme und Komponenten an verschiedenen Standorten in den Gebäuden dar.

Die probabilistische SSI-Berechnung und die probabilistischen Gebäudeantwortspektren (ISRS) des Reaktorgebäudes sind in der MUSA /44/ mit Bericht /100/ dokumentiert. Es werden darin die probabilistischen Spektren für verschiedene Orte und Richtungen berechnet. Neben den variier-ten Input-Zeitverläufen werden bei dieser probabilistischen SSI-Berechnung die Gebäudepa-rameter (modale Dämpfung und Frequenz) sowie die Baugrundparameter (Dämpfung und Schub-modul) nach der Latin Hypercube Simulation Methode unter Verwendung der Lognormalverteilung zufällig variiert. Dabei werden 30 zufallsverteilte Simulationen durchgeführt. Als Input dient das Gebäudemodell des Reaktorgebäudes, 30 Sets von horizontalen und vertikalen Beschleuni-gungszeitverläufen sowie das Baugrundmodell gemäss /102/ Die analoge probabilistische SSI-Berechnung und die Gebäudeantwortspektren (ISRS) des SUSAN-Gebäudes sind ebenfalls im Bericht /100/ dokumentiert.

SSI Berechnungen für die Strukturanalyse

SSI-Berechnungen für Erdbebenfestigkeiten des Reaktor- und des SUSAN-Gebäudes. Diese Berechnungen dienen direkt der Beurteilung der Bauwerke.

Beurteilung des ENSI

Das ENSI hat die neuen Erdbebenberechnungen für das Reaktorgebäude, das SUSAN-Gebäude und den Hochkamin mit Unterstützung eines beauftragten Experten überprüft.

Deterministische Gebäudeantwortspektren

Die deterministischen SSI-Berechnungen zur Bestimmung der Gebäudeantwortspektren (ISRS) des Reaktor- und SUSAN-Gebäudes wurden vom ENSI bereits im Rahmen der Prüfung der MUSA2010, Teil Erdbeben-PSA geprüft. Diese Prüfung kam zum Schluss, dass die Resultate der Erdbebenberechnungen korrekt sind und dem aktuellen Informationsstand gerecht werden. Das ENSI hat nun weitere Stichproben zur vertieften Prüfung dieser Berechnungen durchgeführt:

Den als Erdbebenanregung verwendeten horizontalen Beschleunigungszeitverlauf hat das ENSI unabhängig in ein Antwortspektrum umgerechnet und dieses mit dem entsprechenden Spektrum der PEGASOS-Gefährdung verglichen. Der Vergleich zeigt eine gute Übereinstimmung, woraus geschlossen wird, dass die Erzeugung der Input-Beschleunigungszeitverläufe spektrumskonform erfolgt ist.

Als weitere Stichproben wurden die deterministischen ISRS des Reaktor - und SUSAN-Gebäudes mit den bisherigen Floor Response Spectra (FRS) des KKM /115/ verglichen. Dieser Vergleich erfolgte für verschiedene Orte in den beiden Gebäuden. Die neuen ISRS sind erwartungsgemäß mehrheitlich höher als die bisherigen FRS. Allerdings gilt dies im Fall des SUSAN-Gebäudes nicht überall. Der Grund dafür ist die starke Einbettung des SUSAN-Gebäudes im Baugrund und die daraus resultierende Dämpfung, die bei der Berechnung der bisherigen FRS in den 1980er Jahren konservativerweise nicht berücksichtigt wurde. Aufgrund dieser Vergleiche beurteilt das ENSI die ISRS als plausibel.

Probabilistische Gebäudeantwortspektren

Auch die SSI-Berechnungen zur Bestimmung der probabilistischen ISRS hat das ENSI bereits im Rahmen der Prüfung der MUSA2010, Teil Erdbeben-PSA geprüft, ebenfalls mit positivem Prüfergebnis. Das Bild 2 zeigt einen beispielhaften Vergleich der aus den SSI-Berechnungen resultierenden Gebäudeantwortspektren nach der deterministischen und der probabilistischen Methode. Diese ISRS sind erwartungsgemäß ähnlich und werden als plausibel beurteilt.

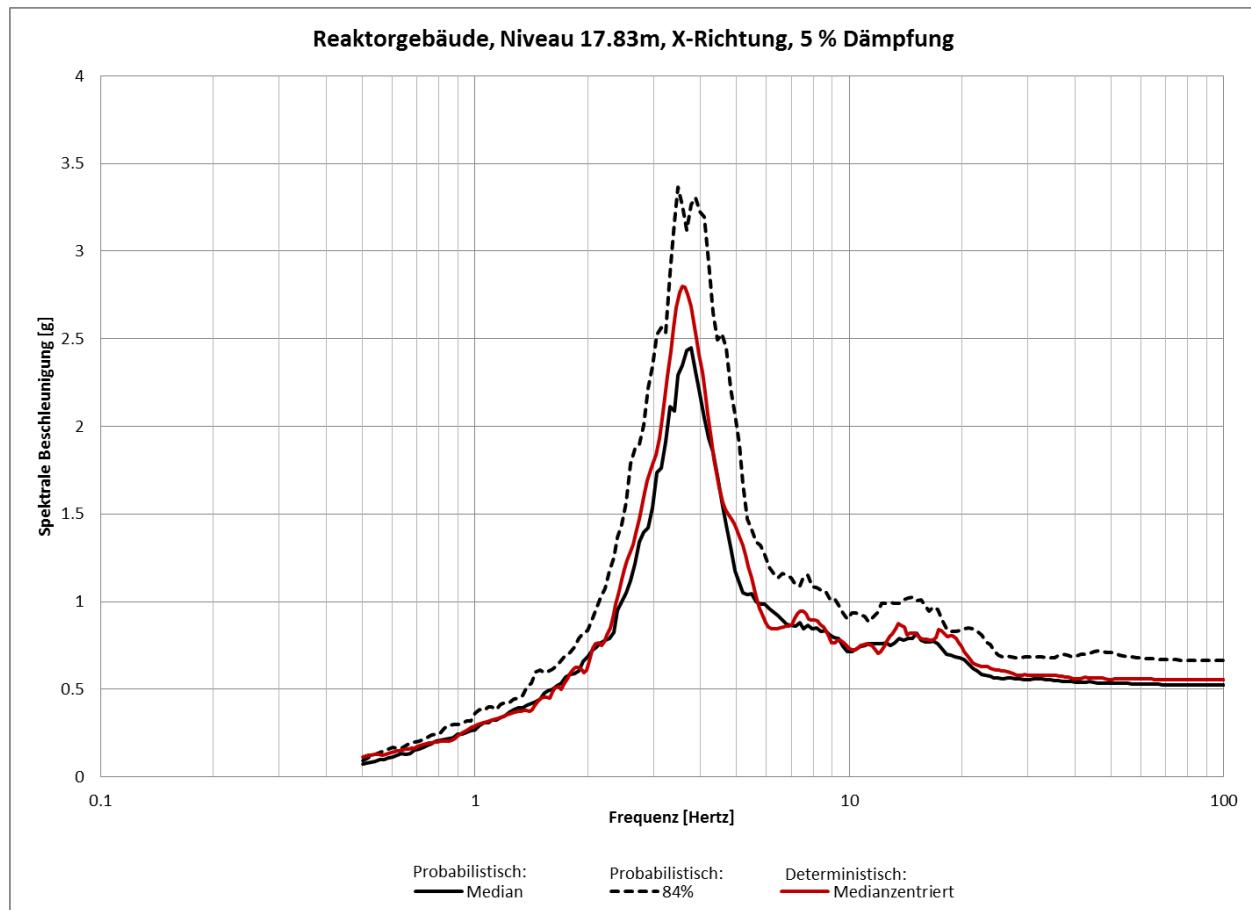


Bild 2: Vergleich eines deterministischen ISRS mit den probabilistisch ermittelten Spektren am Beispiel des Reaktorgebäudes KKM auf 17.83 m Höhe

SSI Berechnungen für die Strukturanalyse

Zur Beurteilung der SSI-Berechnungen für die Erdbebenfestigkeiten des Reaktor- und des SUSAN-Gebäudes hat das ENSI die Eigenfrequenzen der veränderten Gebäudemodelle mit denjenigen der Gebäudemodelle aus MUSA2010 /100/ verglichen. Die neu bestimmten Eigen-

frequenzen liegen wie erwartet etwas tiefer, wegen der infolge stärkerer Berücksichtigung der Rissbildung im Beton leicht geringeren Gebäudesteifigkeit unter Erdbebeneinwirkung.

Das ENSI hat als Stichprobe je einen als Zwischenresultat ausgewiesenen horizontalen Beschleunigungszeitverlauf auf Fundamentniveau des Reaktorgebäudes bzw. des SUSAN-Gebäudes unabhängig in ein Antwortspektrum umgerechnet. Es hat diese Spektren mit den entsprechenden ISRS des Betreibers verglichen. Der Vergleich zeigt eine gute Übereinstimmung, woraus geschlossen wird, dass die Umrechnung der resultierenden Zeitverläufe in die ISRS korrekt erfolgt.

Schliesslich hat das ENSI die aus diesen Berechnungen resultierenden Antwortspektren an den Fundamenten der beiden Gebäude mit den Antwortspektren der Erdbebenanregung verglichen. Der Vergleich zeigt den Einfluss der Boden-Bauwerk-Interaktion und der damit verbundenen Dämpfung hochfrequenter Schwingungsanteile. Die Übertragung der Erdbebenanregung ins Bauwerk beurteilt das ENSI als plausibel.

4.3 Erdbebenfestigkeit der erforderlichen Bauwerke und Ausrüstungen

4.3.1 Bauwerke

Angaben des Betreibers

Der Betreiber hat die Erdbebenfestigkeiten für die Bauwerke, in welchen sich die zur Gewährleistung der Sicherheitsfunktionen erforderlichen Komponenten befinden neu berechnet. Im Vordergrund stehen das Reaktorgebäude und das SUSAN-Gebäude. Zusätzlich wurde das erdbebeninduzierte Versagen des Abluftkamins beim Erdbeben als eine Gefährdung für die Bauwerke identifiziert, in denen sich Systeme zum sicheren Abfahren der Anlage befinden. Aus diesem Grund wurde auch die Erdbebenfestigkeit des Abluftkamins neu bewertet.

Zur Berechnung der Erdbebenfestigkeiten des Reaktorgebäudes und des SUSAN-Gebäudes wurden die bestehenden Gebäudemodelle aus /100/ aktualisiert (neue Programmversion SAP2000) und kleinere Änderungen vorgenommen, insbesondere wurde die Steifigkeitsabminderung infolge Rissbildung bei Erdbebeneinwirkung stärker berücksichtigt.

Reaktorgebäude

Die Berechnung der Erdbebenfestigkeit des Reaktorgebäudes ist im Bericht /71/ dokumentiert. Das Reaktorgebäude ist als eine zylindrische im Boden eingebettete Stahlbetonstruktur ausgebildet. Die Fundamentplatte liegt direkt auf dem Fels auf dem Niveau (-) 14 m das auch als Referenzniveau für die Erdbebeneinwirkung gilt.

In der Mitte des Reaktorgebäudes befindet sich eine Betonabschirmung, die den Sicherheitsbehälter (Drywell) umfasst. Die Betonabschirmung ist oben mit einem schweren Betondeckel verschlossen. Der Brennelementlagerbecken im oberen Bereich des Reaktorgebäudes ist mit der Betonabschirmung monolithisch verbunden.

Der Sicherheitsbehälter (Drywell) ist als birnenförmige Stahlstruktur. Im unteren Bereich ist der Sicherheitsbehälter mit Beton gefüllt, auf dem der Auflagerring für den Reaktordruckbehälter und für den biologischen Schild steht. Der Reaktordruckbehälter ist im oberen Bereich horizontal am biologischen Schild abgestützt. Der biologische Schild wird mit einem sternförmigen Fachwerk aus Stahlrohrprofilen (star truss stabilisier) am Sicherheitsbehälter (Drywell) befestigt und stabilisiert.

Die Hauptelemente zur Abtragung der Horizontalkräfte sind die Aussenwände und die Wände der Betonabschirmung. Es wurden jeweils die unteren Bereiche als massgebend betrachtet und genauer untersucht.

Die Duktilität des Systems wurde gemäss EPRI RT-103959 /135/ bestimmt (mass weighting approach). Dabei wurde die Fliessverschiebung mit Hilfe der linearen Zeitverlaufanalyse mit SAP2000 bestimmt. Die Verschiebung im Bruchzustand wurde hingegen mit einem Medianwert der Stockwerkschiefstellung von 0.75% im unteren Aussenwandbereich gerechnet. Aus der Duktilität wurde weiter der Faktor für die inelastische Energiedissipationsfähigkeit (inelastic energy absorption factor) bestimmt. Die benutzte Methode (effective stiffness / effective damping method) berücksichtigt die effektive Steifigkeit im Bruchzustand und ist geeignet für die Strukturen mit Wänden die ein „pinched“ Hystereseverhalten aufweisen.

Die Erdbebenfestigkeit (HCLPF) für ein Schubversagen der Aussenwand beim gleichzeitigen Fliessen der Bewehrung beim Anschluss an die Fundation liegt bei 0.60 g bezogen auf Felsniveau (-14 m)

SUSAN Gebäude

Die Berechnung der Erdbebenfestigkeit des SUSAN Gebäudes wurde im Bericht /73/ dokumentiert. Das SUSAN Gebäude, das wichtige Sicherheitssysteme beinhaltet, liegt auf der Westseite von Reaktorgebäude und wurde nachträglich in den 1980er Jahren erstellt. Zwischen dem SUSAN Gebäude und dem Reaktorgebäude befindet sich ein Zwischenbau (Interface).

Das SUSAN Gebäude mit den Grundrissabmessungen von 19 m auf 27.2 m wurde aus Stahlbeton erstellt. Massgebend für die Erdbebenfestigkeit des SUSAN Gebäudes ist das Biegeversagen der meistbeanspruchten Wände.

Der Schub- und Biegetragwiderstand der Wände wurde wie beim Reaktorgebäude gemäss EPRI TR-103959 /135/ ermittelt. Die Analyse zeigt, dass die Südwand massgebend ist. Dabei wurden die mitwirkenden Wandabschnitte der angrenzenden Wände sowie die axiale Kraft berücksichtigt. Ebenfalls berücksichtigt wurde die inelastische Energiedissipationsfähigkeit. Die HCLPF Festigkeit der massgebenden Wand ist erwartungsgemäss hoch und liegt bei 1.08 g, bezogen auf Felsniveau (-14 m). Dieser Wert wurde auch mit der CDFM Methode verifiziert.

Der Betreiber hat auch die Widerstandsfähigkeit des SUSAN Gebäudes gegen Eindringung des Wassers untersucht. Da die unkontrollierte Wasserabgabe durch die Stauanlagen im Einflussbereich des KKM ausgeschlossen werden kann (siehe Kap. 6) wird auf diese Problematik an dieser Stelle nicht weiter eingegangen.

Hochkamin

Der Hochkamin befindet sich auf der Südseite des Reaktorgebäudes. Die 125 m hohe zylindrische Stahlbetonstruktur steht auf einem breiten ringförmigen Streifenfundament.

Der Hochkamin hat keine Sicherheitsfunktion im Zusammenhang mit der Reaktorabschaltung. Im Falle eines Versagens könnte der Kamin aber beim Einsturz die benachbarten Bauten insbesondere das Reaktorgebäude und das SUSAN Gebäude gefährden. Aus diesem Grund wurde eine Untersuchung der Sicherheit gegen Einsturz infolge Erdbeben durchgeführt.

Die linearelastische Berechnung erfolgte mit dem FEM Programm SAP2000 unter Verwendung des Anwortspektrenverfahrens. Die Bestimmung der Fähigkeit des Systems im inelastischen Bereich die Energie zu absorbieren erfolgte mit Hilfe einer Pushover-Analyse. Dabei wurde auch die Wechselwirkung zwischen den Horizontalverschiebungen und Axiallast berücksichtigt (P-Delta Analyse).

Die Untersuchung zeigt, dass der Kamin eine relativ hohe seismische Tragfähigkeit mit dem HCLPF Wert von 0.96 g aufweist. Zulässig wäre ein Wert von 0.24 g (siehe Abschnitt 3.1). Es wurden die folgenden Gründe dafür angegeben:

- Realistische Annahmen bezüglich Materialfestigkeiten und Versagensarten.
- Realistische Berücksichtigung des nichtlinearen Verhaltens durch Anwendung einer Pushover-Analyse.
- Relativ kleine Bodenbewegungen infolge des Referenzbebens.

Zusammenstellung der HCLPF Werte

Die vom Betreiber mit Hilfe der Strukturanalysen ermittelten Fragility-Werte für die massgebenden Gebäude sind in der nachfolgenden Tabelle 1 zusammengefasst. Die auf PRP-IH bezogenen Erdbebenfestigkeiten (HCLPF) übertreffen jeweils die maximale Bodenbeschleunigung PGA an der Geländeoberfläche von 0.24 g.

Struktur	A_m [g]	β_R [-]	β_U [-]	HCLPF [g]	PRP-IH [g]	Faktor HCLPF/PRP-IH
Reaktorgebäude Wandversagen	1.30	0.14	0.33	0.60	0.24	2.5
Drywell Integrität	0.89	0.21	0.15	0.49	0.24	2.0
Torus Verankerung	1.73	0.29	0.35	0.60	0.24	2.5
SUSAN Gebäude	2.41	0.20	0.29	1.08	0.24	4.5
Abluftkamin	2.01	0.17	0.28	0.96	0.24	4.0

Tabelle 1: Erdbebenfestigkeiten für die massgebenden Bauwerke /6/

Beurteilung des ENSI

Das ENSI stellt fest, dass mit den von KKM durchgeführten Untersuchungen für alle Bauwerke, welche Systeme für die Kernkühlung enthalten, aktualisierte Erdbebenfestigkeiten vorliegen. Das ENSI hat die neuen Erdbebenberechnungen für das Reaktorgebäude, das SUSAN-Gebäude und den Hochkamin mit Stichproben und Plausibilitätskontrollen überprüft. Unter anderem wurden mit dem Programm SAP2000 erstellte Gebäudemodelle in Bezug auf Geometrie, Massen oberhalb der Fundamentplatte und Materialeigenschaften kontrolliert. Weiter wurden die neu berechneten Eigenfrequenzen mit den alten Werten verglichen um den Einfluss der Rissbildung im Beton und der damit verursachten Reduktion der Gebädesteifigkeit zu beurteilen.

Das ENSI schliesst aus diesen Kontrollen, dass die neuen Modelle und die Erdbebenberechnungen korrekt sind.

Das ENSI hat für die massgebenden Bauwerke (Reaktorgebäude, SUSAN Gebäude und Hochkamin) vertiefende Überprüfungen der Fragilities durchgeführt:

Reaktorgebäude

Bei der Überprüfung der Berechnung der Erdbebenfestigkeit des Reaktorgebäudes unter Annahme des Schubversagens der massgebenden Wand wurden unter anderem die Parameter für die Fragility-Analyse und speziell der Wert der aleatorischen Streuung β_R hinterfragt. Das ENSI

ist der Meinung, dass dieser eher zu tief ist, verglichen mit den Werten aus vergleichbaren Anlagen. Eine von ENSI durchgeführte Kontrollrechnung zeigt aber, dass die Erdbebenfestigkeit (HCLPF) des Reaktorgebäudes auch unter der Verwendung von realistischeren β_R Werten weit über dem erforderlichen Wert von 0.24 g liegt (Sicherheitsmarge von ca. 2.0). Die Stahlbetonstruktur des Reaktorgebäudes kann somit auch bei PRP-IH Erdbebengefährdung als sehr robust betrachtet werden. Bei den kommenden Erdbebenüberprüfungen des Reaktorgebäudes und anderen SSK sind die eingesetzten Werte der Faktoren für Unsicherheiten in den Fragility-Berechnungen ausführlicher zu begründen und mit den Werten aus ähnlichen Anlagen zu vergleichen.

Ein entscheidender Analyseschritt bei der Bestimmung der Fragilities ist die Annahme der massgebenden Versagensmechanismen. Im Falle des Reaktorgebäudes hat KKM in /71/ vier verschiedene Versagensmechanismen an unterschiedlichen Bauteilen postuliert und nachgewiesen. Das ENSI stellte fest, dass dabei die Dachkuppel des Reaktorgebäudes nicht untersucht wurde, obwohl das bei früheren seismischen Berechnungen z.B. /103/ der Fall war. Mit dem nachträglich gelieferten Bericht /91/ hat der Betreiber Zusatzstudien nachgereicht, die belegen sollen, dass das Versagen der Kuppel beim 10'000-jährlichen Erdbeben ausgeschlossen werden kann. Eine unabhängige Kontrollrechnung des ENSI kann diese Aussage grundsätzlich bestätigen. Bei den kommenden Erdbebenüberprüfungen des Reaktorgebäudes erwartet das ENSI eine genauere Berechnung des HCLPF Wertes für die Kuppel durch eine entsprechende Überarbeitung der Berechnung des Betreibers. Dabei sollen alle Bereiche der Kuppel unter Berücksichtigung aller relevanter Versagensarten und der vorhandenen Bewehrungen betrachtet werden.

SUSAN Gebäude

Bei der Überprüfung der Berechnung der Erdbebenfestigkeit des SUSAN Gebäudes wurden unter anderem die Parameter für die Fragility-Analyse, die Versagensmechanismen, und die Methode zu Bestimmung der inelastischen Energiedissipationsfähigkeit der Struktur hinterfragt. Der Betreiber geht von einem Biegeversagen der massgebenden Wand aus und schätzt die Energiedissipationsfähigkeit mit einer Methode für die Wände die bei zyklischer Belastung volle Hysterese-Zyklen aufweisen. Eine Schätzung mit alternativer Berechnungsmethode für gedrungene, vorwiegend auf Schub beanspruchte Wände würde nach Ansicht von ENSI zu ähnlichen Resultaten führen. Die hohe Erdbebenfestigkeit der Struktur des SUSAN Gebäudes kann vom ENSI bestätigt werden.

Hochkamin

Bei der Überprüfung der Berechnung der Erdbebenfestigkeit des Hochkamins /56/ wurden unter anderem die Vorgehensweise bei der Pushover-Analyse zur Bestimmung der inelastischen Energiedissipationsfähigkeit und die Überlagerung der Erdbebenauswirkungen aus zwei orthogonalen Richtungen hinterfragt. Das ENSI kommt zur Auffassung, dass die für den Kamin angegebene Sicherheitsmarge von 4.0 vom Betreiber überschätzt wurde. Eine vom ENSI durchgeführte Sensitivitätsanalyse hat aber ergeben, dass die Erdbebenfestigkeit (HCLPF) dennoch deutlich über dem geforderten Wert liegt, sodass Strukturversagen beim Referenzbeben mit PGA von 0.24 g bezogen auf das Fundamentniveau des Reaktorgebäudes (-14 m) ausgeschlossen werden kann.

Nach dem Abschluss der PRP-Gefährdungsstudie wird KKM eine neue Analyse der Erdbebenfestigkeit des Hochkamins durchführen. Das ENSI erwartet, dass dabei der Frage der inelastischen Energiedissipationsfähigkeit und der Überlagerung der Erdbebenauswirkungen genauer begründet wird.

Torusverankerung

Bei der Torusverankerung liegen die HCLPF Werte bei den vergleichbaren Anlagen im Ausland bei ca. 0.45 g. Der Betreiber errechnet für die Torusverankerung einen höheren HCLPF Wert von 0.60 g aus /72/. Zu beachten ist jedoch, dass die Berechnung auf einem detaillierten 3D-FE-Modell basiert. Aus diesem Grund findet das ENSI die Resultate plausibel. Anzumerken ist, dass auch mit einem HCLPF von 0.45 g die Erdbebenfestigkeit der Verankerung fast doppelt so gross wäre wie erforderlich (0.24 g).

Bioschild Stabilisierung (star truss stabiliser)

Im Falle der Erdbebenfestigkeit des sternförmigen Fachwerks aus Stahlrohrprofilen (star truss stabiliser) das der biologische Schild mit dem Sicherheitsbehälter (Drywell) verbindet und stabilisiert wurden dem ENSI zwei Berechnungen vorgelegt. In der ersten Berechnung /71/ wurde die Erdbebenfestigkeit (HCLPF) der Aussteifung von 0.4 g (bezogen auf PEGASOS Einwirkung) ermittelt.

Zusammen mit dem deterministischen Nachweis der Beherrschung des 10'000-jährlichen Erdbebens /6/ wurde eine weitere detaillierte nichtlineare Berechnung der inneren Struktur des Reaktorgebäudes /78/ nachgereicht. Bei dieser Berechnung wurde das Verhalten des biologischen Schildes und der Zwischendecken nach dem postulierten Versagen des aussteifenden Fachwerkes anhand eines nichtlinearen FE-Modells untersucht. Für dieses Szenario wurde ein HCLPF Wert von 0.67 g (skaliert auf PRP-IH Einwirkung) bestimmt, wobei das Versagen der Zwischendecke (+12.6) sich als massgebend herausstellte.

Das ENSI teilt die Meinung des Betreibers, dass das Versagen des aussteifenden Fachwerks nicht zum Versagen des Bioschildes führt. Die Berechnung der Kippbewegungen des biologischen Schildes müsste aber nach ENSI Einschätzung anhand eines dreidimensionalen Modells und nicht, wie im Bericht /78/ mit einem einfachen zweidimensionalen Stabmodell erfolgen. Aus diesem Grund betrachtet das ENSI die ursprünglich berechnete Erdbebenfestigkeit der Aussteifung von 0.4 g (bezogen auf PEGASOS Einwirkung) als belastbar. Eine Skalierung auf PRP-IH würde nach Einschätzung des ENSI zu einem HCLPF Wert von ca. 0.3 g führen. Erforderlich wäre ein Wert von 0.24 g. Damit wäre aus der Sicht des ENSI die Erdbebenfestigkeit des aussteifenden Fachwerks bei einem 10'000-jährlichen Erdbeben nachgewiesen.

Bei der nächsten Erdbebenüberprüfung des Drywells sollte die Modellbildung hinterfragen. Die Problematik der Drywell- und Bioschildstabilisierung, sowie Drywelldecken sollte nach Ansicht des ENSI anhand eines 3D-Gesamtmodells betrachtet werden. Generell wird empfohlen wenn möglich Gesamtmodelle zu bilden um die Anzahl der Schnittstellen zwischen den Teilsystemen zu reduzieren.

Weitere Bemerkungen

Mit der Aktualisierung der Erdbebengefährdung müssen nach Abschluss des PRP auch die Berechnungen der Erdbebenfestigkeiten revidiert werden. Dabei sind die entsprechenden Bemerkungen des ENSI zu beachten.

Die Verwendung der Fragilities zur Bewertung des Erdbebenrisikos im auslegungsüberschreitenden Bereich, wie es mit der PSA ausgewiesen wird, überprüft das ENSI im Rahmen der ENSI-Stellungnahme zur PSÜ.

4.3.2 Mechanische und elektrische Ausrüstungen

Angaben des Betreibers

Die vom KKM ermittelten Fragility-Werte für die im Kapitel 4.1 angegebenen Sicherheitssysteme sind in der nachfolgenden Tabelle 2 zusammengefasst. Es wurde jeweils der Wert für die schwächste Komponente angegeben. Bei den meisten Systemen ist die Erdbebenfestigkeit der Kabeltrassen massgebend (HCLPF von 0.56 g). Die auf PRP-IH bezogenen Erdbebenfestigkeiten (HCLPF) übertreffen jeweils die maximale Bodenbeschleunigung PGA auf Reaktorgebäudefundamentniveau von 0.24 g.

Nach den aufgelisteten HCLPF-Werten ist das Ablassdruckluftsystem mit einem Wert von 0.33 g für die Funktion der SUSA-Diesel limitierend. Dies ist insgesamt die kleinste von KKM ausgewiesene Fragility. Der Wert basiert auf generischen Angaben von EPRI. Ein weiterer niedrigerer HCLPF-Wert ergibt sich für die Kupplung zwischen Motor und Generator mit einem Wert von 0.4 g. Ebenfalls relativ niedrige Fragility-Werte weist der Lüftungsventilator mit einem Wert von 0.38 g auf. Als limitierend wird ein Versagen der Anker der Halterung angesehen. Ein Versagen der Diesel-Kraftstoffleitung wird mit 0.50 g ausgewiesen, postulierte Versagensart ist Biegeversagen. Laut KKM ist diese Fragility jedoch auch bei stärkeren Erdbeben (mit $PGA_{(-14m)} > 0.50$ g) nicht relevant, da nur die Verbindung von Vorrats- zu Betriebsbehälter betroffen ist und erst nach 48 h kreditiert wird. In dieser Zeit kann ein Versagen dieser Leitung durch manuelles Auffüllen des Betriebsbehälters ausgeglichen werden.

Für die Systeme ARSI, PRV, RCIC, ALPS, TCS, ICWS und CWS sind die Kabeltrassen als limitierend ausgewiesen. Es werden von KKM HCLPF-Werte von 0.56 g angegeben, die gemäss /77/ auf Basis der Gebäudeantwortspektren für die nach dem standardisierten EPRI-Verfahren /134/ berechnet wurden. Analog wurden die Erdbebenkapazitäten der Sicherheitsregelventile bestimmt. Als limitierend wird die Abblaseleitung mit HCLPF = 0.58 g angesehen.

Sicherheitssystem	A_m [g]	β_R [-]	β_U [-]	HCLPF [g]	PRP-IH [g]	Faktor HCLPF/PRP-IH
ARI	1.85	0.16	0.56	0.56	0.24	2.3
SCRAM	1.44	0.13	0.25	0.77	0.24	3.2
SRV/SV	1.88	0.16	0.56	0.58	0.24	2.4
RDB Isolationsarmaturen	1.15	0.16	0.56	0.35	0.24	1.4
RCIC	1.85	0.16	0.56	0.56	0.24	2.3
PRV	1.85	0.16	0.56	0.56	0.24	2.3
ALPS	1.85	0.16	0.56	0.56	0.24	2.3
TCS	1.85	0.16	0.56	0.56	0.24	2.3
Susan Hilfsysteme ICWS	1.85	0.16	0.56	0.56	0.24	2.3
SUSAN DG	1.50	0.16	0.76	0.33	0.24	1.4

Tabelle 2: Erdbebenfestigkeiten für die massgebenden Sicherheitssysteme /6/

Im Zusammenhang mit der Abschaltfunktion (SCRAM) wurden für die CRD-Antriebe HCLPF-Werte von 1.46 g sowie für die Reaktoreinbauten von 0.77 g ermittelt /8/. Diese Werte sind mit Hilfe experimenteller Methoden bestimmt worden. Versagensart ist funktionelles Versagen. Bei der Ermittlung der seismischen Beanspruchungen auf die RDB-Einbauten wird auf ein Stabwerksmodell von GE zurückgegriffen. Anzumerken ist, dass das KKM im Bericht zum EU-Stresstest /53/ einen tieferen HCLPF Wert für die Abschaltfunktion ausgewiesen hat (0.53 g mit PEGASOS Gefährdung). In Anbetracht der zentralen sicherheitstechnischen Bedeutung der Abschaltfunktion hat das ENSI mit Forderung vom 10.01.2012 /110/ und der darauf folgenden Erläuterung vom 24.01.2012 /111/ aufgefordert zu diesem Thema Stellung zu nehmen. Im Bericht /8/ vom 23.01.2012 hat das KKM nachgewiesen, dass der tiefere Wert auf einer zu konservativen Annahme basiert. Ursprünglich wurde der Stahlrahmen, der oberhalb der hydraulischen Steuerstabeinheiten angeordnet ist, als massgebend betrachtet. Das allfällige Versagen des Rahmens kann aber die Abschaltfunktion nicht verhindern sondern führt im Gegenteil zur ihrer Auslösung und zum Einfahren der Steuerstäbe /8/. Somit ist der Rahmen für die Robustheit der Abschaltfunktion nicht relevant.

Für den Torus als Teil des Primärcontainments weisst das KKM einen HCLPF-Wert von 0.6 g aus. Postuliert wird ein Versagen der Verankerung. Als Basis für die aktuelle Fragility-Analyse dient eine 3D-FE-Berechnung mit dem Programm NASTRAN.

Beurteilung des ENSI

Bei der Auslegung der mechanischen Ausrüstungen (druckführende Behälter, Rohrleitungen, Armaturen und Pumpen) werden in den Lastfällen die Erdbebenlasten berücksichtigt. Die Erdbebenlasten spielen jedoch in der Regel eine untergeordnete Rolle im Vergleich zu den relevanten Betriebs- und Störfalllasten. In der Auslegung der druckführenden Komponenten werden zudem Sicherheitsmargen angewendet, die Unsicherheiten der Berechnungsmethoden und der Materialkennwerte konservativ abdecken. Die erhöhten PRP-IH-Gefährdungsannahmen für das Erdbeben haben in der Regel für die berechneten Auslegungsspannungen der druckführenden Komponenten, insbesondere auch der druckführenden Umschliessung des Primärkreislaufes, eine untergeordnete Bedeutung oder werden durch die Sicherheitsmargen abgedeckt.

Erdbebenlasten sind jedoch vor allem für die Halterungen der Komponenten von Bedeutung, da diese neben dem Eigengewicht vor allem gegen seismische Lasten auszulegen sind. Insofern ist es für das ENSI nachvollziehbar, dass für die vom KKM ingenieurmässig festgelegte Versagensart überwiegend ein Versagen der Halterungen angenommen wird.

Für die Ermittlung der seismischen Beanspruchungen auf die RDB-Einbauten hat das KKM auf ein Stabwerksmodell von GE zurückgegriffen und keine explizite Fragility-Analyse für ein unzulässiges Verschieben des Kerns in Folge des Versagens von Kerneinbauten vorgelegt. Die Auslegung der Kerneinbauten des Reaktordruckbehälters gegen unzulässig grosse Verschiebungen wurde aber im Rahmen der Nachweise zum Bruchausschluss bzw. des Leck-vor-Bruch-Nachweises für die Hauptumwälzleitungen untersucht. Dazu wurden verschiedene Leckgrössen, u.a. auch beidseitiger Abriss der Speisewasser- oder der Frischdampfleitungen am RDB unterstellt. Unter diesen Bedingungen wurde nachgewiesen, dass die Verschiebung der Einbauten die zulässige Grösse nicht überschreitet. Die Erdbebenlasten spielen im Vergleich zu den in den genannten Nachweisen betrachteten Lasten eine untergeordnete Rolle. Zudem sind für den Kernmantel der ebenfalls zu den Kerneinbauten gehört, umfangreiche bruchmechanische Analysen vorhanden. Diese weisen gegenüber den bisherigen Gefährdungsannahmen eine Sicherheitsmarge von mehr als einem Faktor 2.0 aus und beinhalten bezüglich Modellierung und Auswertemethodik weitere Konservativitäten.

Überwiegend basieren die vom KKM bewerteten Erdbebenkapazitäten auf Angaben in den E-PRI-Dokumenten /134/ bis/136/. Das betrifft beispielsweise die Angaben für die Dieselgeneratoren, Diesel-Lüftungsventilatoren und Diesel-Kraftstoffleitungen. Die von KKM identifizierten maßgebenden Versagensarten beurteilt das ENSI als plausibel.

Als zuverlässig können die FE-Berechnungen für den Torus betrachtet werden, die auf dynamischen 3D Finite-Elemente-Berechnungen mit der gut dafür geeigneten Software NASTRAN basieren. Die Randbedingungen, Modellierung und berechneten Ergebnisse sind gemäss ENSI-Bewertung plausibel. Das gilt auch für den postulierten Versagensmechanismus des Halterungsversagens.

Das ENSI hat die aufgrund der Forderung vom 10.01.2012 /110/ eingereichten Unterlagen für die CRD-Antriebe geprüft. Es stimmt der Schlussfolgerung des Betreibers zu wonach der Stahlrahmen für die Robustheit der Abschaltfunktion nicht relevant ist. Die Nachweisführung des Betreibers und den ausgewiesenen HCLPF-Wert von 1.46 g betrachtet ENSI als plausibel.

Für die Bestimmung der Erbebenfestigkeit der Schnellabschaltung wurde vom KKM Brennelementverbiegung infolge von horizontaler Erdbebenbeschleunigung von 15.8 mm mit der 1984 festgelegten Bodenanregung für ein Sicherheitserdbeben berechnet und nach Umrechnung auf die aktuellen Gefährdungsannahmen gemäss PRP-IH verwendet /80/, /6/. Der resultierende HCLPF-Wert von 0.77 g weist gegenüber der Bodenanregung von 0.24 g eine Sicherheit von 3.2 auf. Die Sicherheit gegen das Anheben und seitliche Versetzen der Brennelemente infolge von vertikaler Erdbebenbeschleunigung, das zur Verhinderung des Steuerstabeinschiessens führen könnte, wurde vom Betreiber nicht bewertet. Für das vergleichbar schwere Siedewasserreaktor-Brennelement ATRIUM 10 wurde bei angenommener vertikaler Beschleunigung von 0.24 g ein Sicherheitsfaktor von mindestens 1.3 ermittelt /104/. Da der maximale Wert der vertikalen Grundbeschleunigung im KKM von 0.16 g kleiner ist, geht das ENSI von ausreichender Sicherheitsmarge gegen das Blockieren der Steuerstäbe aus. Nichtsdestotrotz wird die Forderungen gestellt, diesen Sachverhalt vom Betreiber genau zu untersuchen und die Ergebnisse beim ENSI zur Beurteilung einzureichen.

Forderung 1: *Der Betreiber hat die Sicherheit gegen das Anheben und seitliche Versetzen der Brennelemente infolge von vertikaler Erdbebenbeschleunigung zu untersuchen, das zur Verhinderung des Steuerstabeinschiessens führen könnte. Die Resultate der Untersuchung sind dem ENSI bis zum 31. Dezember 2012 zur Beurteilung einzureichen.*

Zurzeit betrachtet das ENSI aufgrund der vorhandenen Sicherheitsmarge die Abschalt Sicherheit auch unter erhöhter Erdbeben-Gefährdung als nachgewiesen und betrachtet somit die Forderung 3.3 aus der Verfügung vom 10. Januar 2012 /205/ als erfüllt. Das ENSI weist jedoch darauf hin, dass nach Abschluss des Projekts PRP und Vorlage einer endgültigen Erdbebengefährdung detaillierte Nachweise zur Abschalt Sicherheit für alle freigegebenen und noch eingesetzten Brennelementtypen erbracht werden müssen.

Für die stichprobeweise Überprüfung elektrischer und leittechnischer Ausrüstungen wurden die, aus den Schwingungsversuchen bekannten Prüfbeschleunigungen ausgewählter elektrischer und leittechnischer Ausrüstungen der Notstandssysteme ALPS, ARSI und PRV mit den hierfür von KKM ausgewiesenen HCLPF- und A_m -Werten verglichen.

Die Plausibilitätsprüfungen erfolgten anhand der Daten für folgende repräsentative Ausrüstungen:

- Pumpenantriebsmotor, Reaktorgebäude
- Schaltschrank Niederspannungsschaltanlage, SUSAN-Gebäude
- Leittechnikschränke, SUSAN-Gebäude

- Bedienpult, SUSAN-Gebäude
- Ladegleichrichter, SUSAN-Gebäude
- Druckentlastungsventilantrieb, Drywell

Aufgrund des Vergleichs der für die jeweiligen Ausrüstungen und den jeweiligen Standort ausgewiesenen Qualifikationswerte mit den Daten aus den Fragility-Analysen (HCLPF, A_m) unter Berücksichtigung der Etagenspektren, kann davon ausgegangen werden, dass eine genügende Erdbebenfestigkeit der eingesetzten elektrischen und leittechnischen Ausrüstungen besteht. Eine abschliessende Bewertung kann mit dem Vorliegen der aufgrund der definitiven Ergebnisse von PRP resultierenden Anforderungswerte und den hieraus zu definierenden Floor-Response-Spektren für die entsprechenden Aufstellorte dieser Ausrüstungen innerhalb des Drywells-, Reaktor- und SUSAN-Gebäudes vorgenommen werden.

Ein genereller Kritikpunkt ist die Verwendung nichtmetrischer Einheiten. Das metrische SI-Einheitensystem ist seit Jahrzehnten Standard und dessen Verwendung gemäss Bundesgesetz über das Messwesen (SR 941.20) sowie der Einheiten-Verordnung (SR 941.202) in der Schweiz verbindlich. Der Betreiber sollte aus diesem Grund bei den nächsten Erdbebenüberprüfungen die Berechnungen mit den metrischen SI Einheitensystem durchführen, oder mindestens die wichtigsten Parameter und Zwischenresultate im SI Einheitensystem darstellen.

4.4 Radiologische Auswirkungen

Angaben des Betreibers

Erdbeben mit Magnituden entsprechend einer Häufigkeit von 1E-4/Jahr, wie sie für den zu erbringenden Nachweis angenommen werden, sind aufgrund der Eintrittshäufigkeit des auslösenden Ereignisses der Störfallkategorie 3 zuzuordnen. Zusätzlich wird unabhängig vom Erdbeben das Versagen eines SUSAN Strangs und ein offen blockiertes SRV (SORV) angenommen (siehe auch Kap 3.1).

Gemäss /6/ wurden die radiologischen Auswirkungen eines Erdbebens im Sicherheitsbericht konservativ als kombinierte Auswirkung des Versagens einer Abgasleitung, des Versagens eines Aktivkohlefilters, des Frischdampfleitungsbruchs im Maschinenhaus und des Bruchs einer Speisewasserleitung innerhalb des Maschinenhauses bestimmt.

Die radiologisch massgebenden Beiträge stammen aus den Störfällen Frischdampfleitungsbruch und Bruch einer Speisewasserleitung. Für die Berechnungen wird von einer Iod Aktivität im Reaktorwasser ausgegangen, welcher dem maximal zulässigen Grenzwert (sog. GW2) nach Technischer Spezifikation entspricht.

Eine Rückhaltung von freigesetzten Stoffen durch das Maschinenhaus wurde nicht unterstellt, die Freisetzung erfolgt ungefiltert in die Umgebung. Die Abgabe von radioaktiven Stoffen wird beim Versagen der Abgasleitung und eines Aktivkohlefilters in Bodennähe angenommen. Die Freisetzung aus dem Maschinenhaus von Frischdampf und Speisewasser wird in 20 m Höhe unterstellt.

Die Dosisberechnungen erfolgen nach ENSI-G14 jeweils separat für Erwachsene, Kinder und Kleinkinder. Für den Fall mit GW2 ergibt sich für die meist betroffene Personengruppe der Kleinkinder eine maximale Folgedosis von 2.8 mSv. Zusätzlich wurden weitere Abschätzungen zur maximalen Folgedosis bei Abgabe der in der Anlage vorhandenen Aktivitäten in verschiedenen Sammel- und Vorratsbehältern durchgeführt. Die dafür ermittelte Zusatzdosis für die am meisten betroffene Bevölkerungsgruppe der Erwachsenen beträgt 0.3 mSv.



Beurteilung des ENSI

Das gleichzeitige Auftreten des Erdbebens, der maximal zulässigen Reaktorwasseraktivität (GW2) und eines Einzelfehlers weist eine Eintrittshäufigkeit auf, die im auslegungsüberschreitenden Bereich liegt. Die Zugrundelegung der maximal zulässigen Reaktorwasseraktivität stellt den radiologischen abdeckenden Fall dar. Im Mai 2012 hat das ENSI einen Antrag des KKM stattgegeben, wonach die begrenzenden Reaktorwasseraktivitäten für das massgebende Iod um einen Faktor 10 reduziert wurden.

Der von KKM gewählte Ansatz der Summation der Dosisbeiträge resultierend aus dem Integritätsverlust der nicht gegen das betrachtete Erdbeben ausgelegten Teile der Abgasanlage, Frischdampf- und Speisewasserleitungen ist nach Ansicht des ENSI im Rahmen dieses Nachweises akzeptabel: es werden konsistent mit dem infolge des Erdbebens erwarteten Schadensbild, durchgehend bodennahe Freisetzungungen unterstellt und die wesentlichen, zur Gesamtdosis beitragenden Aktivitätsinventare erfasst und berücksichtigt. Gleichfalls hat der Betreiber plausibel dargelegt, dass zusätzliche Beiträge aus Sammel- und Vorratsbehälter im Verhältnis zur Gesamtdosis und zum Dosisgrenzwert von 100 mSv verhältnismässig klein ausfallen. Auslaufende Inventare, vorwiegend aus Systemen und Komponenten ausserhalb des Reaktorgebäudes, sind gegenüber Frischdampf und Speisewasser kalt und von weit geringerer Aktivität. Ein daraus resultierender Quellterm hat einen geringen Einfluss auf die radiologische Betrachtung.

Das ENSI ist jedoch der Auffassung, dass die Modellierung des freigesetzten Iods aus dem austretenden Kühlmittel beim Frischdampf- und Speisewasserleitungsbruch verbesserungswürdig ist, da davon ausgegangen werden muss, dass das im Kühlmittel enthaltene Iod nicht nur durch so genanntes „flashing“ in die Atmosphäre des Maschinenhauses und damit in die Umgebung gelangt. Das ausgelaufene Kühlmittel enthält insbesondere weiterhin einen nicht vernachlässigbaren Anteil an flüchtigem Iod, welches längerfristig in die Atmosphäre entweichen dürfte.

Das ENSI hat daher unter der Annahme, dass sämtliches Iod aus dem ausgelaufenen Kühlmittel in die Atmosphäre entweicht, eigene abdeckende Betrachtungen durchgeführt. Das ENSI kommt zum Schluss, dass der Dosisgrenzwert von 100 mSv deutlich eingehalten wird. Das ENSI hat zudem die Dosisberechnungen des KKM mit dem aus /47/ angegebenen Quellterm überprüft und erhält ähnliche Werte wie das KKM. Die Dosisberechnungen entsprechen den Vorgaben der Richtlinie ENSI-G14 /131/.

5 Erdbebennachweis für die Brennelementbeckenkühlung

5.1 Erforderliche Bauwerke und Systeme

Angaben des Betreibers

In /15/ analysiert das KKM für unterschiedliche Anlagenkonfigurationen die seismische Robustheit des Brennelementlagerbeckens (BEB), des Reaktorbeckens und des Reaktoreinbauten-Beckens (REB), die sich innerhalb des Reaktorgebäudes (RG) auf der Höhe +17.5 m bis +29 m befinden. Je nach Anlagenkonfiguration ist das BEB durch die Dammplatte vom Reaktorbecken getrennt oder das BEB ist (bei entfernter Dammplatte) direkt über das Reaktorbecken mit dem geöffneten Reaktordruckbehälter und dem REB verbunden. Die einzelnen Becken verfügen über mehrere Anschlussleitungen, die der BEB-Kühlung, der Leckageüberwachung oder der Entleerung der Becken dienen.

Das Reaktorgebäude, die Strukturen der Becken sowie die Leckage- und Entleerungsleitungen der Becken werden basierend auf den Erdbebenfestigkeitsanalysen als seismisch robust eingeschätzt. Die Dichtfunktion der Dammplatte, die Zuleitungen F1/F2 zum BEB, sowie die Kühlleitungen K1/K2 des Reaktorbeckens sind deutlich weniger robust, so dass deren Versagen bei einem 10'000-jährlichen Erdbeben unterstellt wird.

- Die Dammplatte (Unterkante RG +22 m) dichtet im Leistungsbetrieb das Reaktorbecken gegen das BEB ab. Ein Versagen der Dichtwirkung der Dammplatte würde zu einer Leckage vom BEB in das Reaktorbecken und das REB führen. Dies könnte einen schnellen Füllstandabfall im BEB zur Folge haben, wobei die Brennelemente aufgrund des begrenzten Ausgleichsvolumens der anderen Becken noch 3.8 m mit Wasser überdeckt blieben.
- Bei Verlust der Dichtwirkung der Dammplatte würde über die Leckageüberwachungsleitung E zwischen BEB und Reaktorgrube (RG +22. m) eine kontinuierliche Leckage von bis zu 5 t/h in den Anlagenentwässerungsbehälter (AEB) auf RG -12.8 m auftreten. Bei Ausfall der nicht erdbebensicheren AEB-Pumpen würde das Wasserniveau bis auf RG -11m steigen. Für diesen Fall steht das notstand-stromversorgte, seismisch robuste Containment-Rückpumpsystem (CRS) mit einer Kapazität von 2x50 t/h zur Verfügung, mit dem eine ausreichende Rückförderung in den Torus sichergestellt wird. Eine Überflutung auf Niveau -11 m und eine Gefährdung der dort untergebrachten Sicherheitssysteme kann somit verhindert werden. Aufgrund der Kapazität des CRS könnten auch potentielle Leckagen über die seismisch robusteren Entleerungsleitungen im Reaktorbecken aufgenommen werden. Vor bzw. im nächsten Revisionsstillstand wird durch Setzen von Stopfen in den Entleerungsleitungen und einer Querschnittsverengung beim Einlauf der Leckageüberwachungsleitung die Integrität des Reaktorbeckens zusätzlich erhöht bzw. Leckagen minimiert.
- Ein Versagen der Zuleitungen F1/F2 würde lediglich zu einem schnellen Füllstandabfall im BEB von 0,2 m führen, da diese Leitungen mit Rückschlagventilen abgesichert sind und die Saughebewirkung durch Lüftungsbohrungen in den Leitungen knapp unterhalb des Wasserspiegels des BEB beschränkt ist.
- Ein Versagen der Kühlleitungen K1/K2 kann lediglich bei geflutetem Reaktorbecken und REB im Revisionsstillstand zu einem schnellen Füllstandabfall führen. Zur Reduktion der Leckage wird vor dem nächsten Revisionsstillstand der Querschnitt der Leitung verengt.

Zur Kompensation des Füllstandabfalls im BEB stehen im KKM je nach Anlagenkonfiguration mehrere Systeme zur Verfügung /6/. Sofern das BEB durch die Dammplatte vom Reaktorbecken getrennt ist, besteht im Rahmen vorbereiteter Notfallschutzmassnahmen die Möglichkeit, Feuerlöschwasser über das seismisch robuste Abfahr- und Toruskühlsystem oder über neue, an der



Aussenwand des Reaktorgebäudes installierte Zuführungsleitungen in das BEB einzuspeisen. Ist das BEB direkt über das Reaktorbecken mit dem geöffneten Reaktordruckbehälter und dem REB verbunden, können zusätzlich die seismisch robusten Noteinpeisesysteme verwendet werden.

Für diese Massnahmen stehen ohne aktive Kühlung des BEB je nach Anlagenkonfiguration mindestens drei Tage zur Verfügung, bevor die im BEB gelagerten Brennelemente freigelegt würden. Die aktive Kühlung durch das bestehende Brennelementbecken-Kühlsystem wird nicht kreditiert. Die Wärmeabfuhr aus dem BEB erfolgt passiv durch Verdunstung über das Sekundärcontainment, den äusseren Torus und den Abluftkamin.

Beurteilung des ENSI

Das ENSI hat den eingereichten Erdbebennachweis basierend auf den in Kap. 3.2 aufgeführten Anforderungen daraufhin geprüft und bewertet, ob die für die Sicherstellung der Brennelementbeckenkühlung erforderlichen Strukturen, Systeme und Komponenten (SSK) berücksichtigt wurden.

Aus Sicht des ENSI sind in den Erdbebennachweis alle Bauwerke und Baustrukturen einbezogen worden, deren Standfestigkeit und Integrität für die Sicherstellung der BE-Beckenkühlung erforderlich sind. Das ENSI hat sich anhand der aktuellen Schaltbilder für die BE-Beckenkühl- und Reinigungssysteme davon überzeugt, dass alle an die Becken anschliessenden Leitungen durch die Analyse des KKM abgedeckt sind und damit die Auswirkungen möglicher Leckagepfade von den Becken ins Reaktorgebäude auf RG -11 m umfassend bewertet wurden.

Im Rahmen einer Inspektion hat das ENSI ergänzende Informationen bezüglich der Auswirkungen eines seismisch bedingten Versagens der Dichtwirkung der Dammplatte erhalten und die Situation vor Ort besichtigt. Demnach ist die Arretierung der Dammplatte um den Faktor 7 überdimensioniert. Aus Sicht des ENSI kann daher ein Absturz der Dammplatte ins BEB ausgeschlossen werden. In Richtung Reaktorgrube stützt sich die Dammplatte an horizontal eingebauten Kulissensteinen ab, so dass ein Absturz der Dammplatte auch in das Reaktorbecken ausgeschlossen werden kann. Die Dammplatte ist aus einem Stück aus Stahlbeton mit einem Stahlmantel gefertigt. Somit können auch keine einzelnen Teile der Dammplatte herausfallen. Nicht ausgeschlossen hingegen, kann ein Absturz der Abschirmsteine in das Reaktorbecken. Deshalb beabsichtigt das KKM diese in der Stillstandrevision 2012 zu entfernen. Das ENSI begrüßt diese Massnahme aus sicherheitstechnischer Sicht. Des Weiteren wird das KKM Analysen hinsichtlich einer Verbesserung der Dichtfunktion der Dammplatte bis Ende September 2012 durchführen und daraus eventuell resultierende konstruktive Verbesserungsmassnahmen in der Revision 2013 umsetzen. Das ENSI erachtet diesen Zeitrahmen aufgrund der begrenzten Auswirkungen eines Versagens der Dichtwirkung der Dammplatte für angemessen.

Forderung 2: Das KKM hat hinsichtlich der Verbesserung der Dichtfunktion der Dammplatte eine Analyse durchzuführen und die Ergebnisse der Analyse dem ENSI bis zum 31. Dezember 2012 zur Beurteilung einzureichen

Die vom KKM geplanten Sofortmassnahmen zur Vermeidung bzw. zur Begrenzung der Auswirkungen eines seismisch bedingten Versagens der Entleerungs- und Leckageüberwachungsleitungen des Reaktorbeckens erachtet das ENSI als zielführend. Damit wird die Sicherheitsmarge zur Vermeidung einer Überflutung der Notstandssysteme auf RG -11 m im Fall eines Einzelfehlers des CRS erhöht. Neben den bereits geplanten Massnahmen wird das KKM in der Stillstandrevision 2012 analog zur Absicherung der Zuleitungen F1/F2 die Kühlleitungen K1/K2 mit Lüftungsbohrungen knapp unterhalb des Wasserspiegels versehen. Insgesamt gesehen wird damit aus Sicht des ENSI die Integrität des Reaktorbeckens bei einem 10'000-jährlichen Erdbeben deutlich verbessert.



Die Analysen des KKM hinsichtlich einer ausreichenden Wasserüberdeckung der Brennelemente im BEB für mindestens drei Tage bei den unterstellten Leckagen hält das ENSI nach eigenen Abschätzungen für plausibel. Zur Nachspeisung von Kühlwasser ins BEB stehen seit kurzem erdbebensichere Einspeiseleitungen zur Verfügung. Die hierfür erforderlichen Massnahmen können ohne das Betreten des BEB-Bereiches eingeleitet werden. Da es aus Sicht des ENSI für diese interne Notfallschutzmassnahme keiner zeitintensiven Vorbereitungen bedarf, kann die Kühlwassernachspeisung ins BEB innerhalb von 3 Tagen sicher durchgeführt werden.

Die aktive Kühlung der Brennelemente im BEB wird vom Betreiber richtigerweise nicht kreditiert, da die durchgängige Erdbebenfestigkeit der erforderlichen Kühlkette und der Stromversorgung nicht nachgewiesen wurde. Das ENSI hat mit /107/ u.a. auch die seismische Ertüchtigung der Systeme zur Brennelementbeckenkühlung verfügt. Der diesbezügliche Konzeptantrag wurde seitens KKM Ende Juni 2012 eingereicht. Damit stellt die vom KKM kreditierte passive Wärmeabfuhr lediglich eine Übergangslösung dar, bis das vom KKM beantragte, neue BEB-Kühlsystem errichtet ist.

Zusammenfassend kommt das ENSI zu dem Ergebnis, dass alle zur langfristigen Sicherstellung der Brennelementbeckenkühlung erforderlichen SSK über den vom KKM eingereichten Erdbebenachweis abgedeckt sind und für diese Erdbebenfestigkeitsnachweise eingereicht wurden.

5.2 Erdbebenfestigkeit für die erforderlichen Bauwerke und Ausrüstungen

5.2.1 Bauwerke

Angaben des Betreibers

Erdbebenfestigkeitsnachweise wurden klassisch auf der Basis von Strukturanalysen und konservativen Etagenantwortspektren geführt. Die Nachweise beinhalten bereits ausreichende Sicherheitsfaktoren nach gängigen Regelwerken. Die in der Aktennotiz /15/ ausgewiesenen Erdbebenfestigkeiten basieren teils auf klassischen Festigkeitsberechnungen, teils auf den Fragility-Analysen der KKM Erdbeben-PSA (/6/, /42/).

Die Fragilities (HCLPF) für alle Teile der Baustruktur liegen über 0.49 g. Ein Versagen des Beckens durch seismische Einflüsse bei einem Referenzerdbeben mit PGA von 0.24 g wird deshalb ausgeschlossen. Für Leckagen aus dem Brennelementbecken ist die Dichtung der Dammplatte die begrenzende Komponente. Deshalb muss das Versagen dieser Komponente unterstellt werden. Wie in der Aktennotiz /15/ nachgewiesen wurde, ist die Kühlbarkeit der Brennelemente auch für diesen Fall gewährleistet.

Brennelementbecken (BEB)

Das BEB ist ein rechteckiges Becken im oberen Bereich des Reaktorgebäudes mit einer Verbindung zur Reaktorgrube, die mit einer Dammplatte und Abschirmsteinen verschlossen ist und für den Brennelementwechsel geöffnet werden kann. Das BEB hat die Abmessungen L x B x H = 6.1 m x 12.2 m x 11.6 m /16/ und ist als eine monolithische Stahlbetonstruktur ausgebildet, die einen integralen Teil des Reaktorgebäudes bildet. In der Fragility-Analyse des BEB wurde die seismische Robustheit der Struktur zu 0.50 g HCLPF bestimmt /6/ wobei die massgebenden Stellen sich beim Übergang zwischen Betonabschirmung und Wänden bzw. Bodenplatte des Beckens befinden.



Reaktorgrube

Die annähernd zylindrische Reaktorgrube befindet sich zwischen dem BEB und dem Reaktoreinbautenbecken (REB). Während des Normalbetriebs ist die Grube entleert, mit Betonsteinen verschlossen und der Dryweldeckel montiert. Der Bodenbereich der Grube muss bei gefluteter Grube eine sichere Abdichtung zum Innenraum des Drywells und zum Beton des Reaktorgebäudes bieten. Die seismische Robustheit der Grube (HCLPF) wird mit 0.49 g angegeben. Zwei Metallbalge dichten den Grubenboden gegen Leckagen in den Drywell bei geöffnetem Dryweldeckel und zwischen Drywell und der Auskleidung zum Gebäudebeton ab und erlauben einen spannungsfreien Dehnungsausgleich zwischen Reaktordruckbehälter (RDB) und Drywell bzw. Drywell und Grube. Ihre seismische Robustheit (HCLPF) beläuft sich auf 0.59 g /6/.

Reaktoreinbautenbecken (REB)

Das Reaktoreinbautenbecken (REB) liegt bei der Reaktorgrube an und kann mit Betonsteinen zu diesem abgegrenzt werden. Eine wasserdichte Abdichtung wie bei der Dammplatte des BEB ist nicht vorhanden, es besitzt jedoch eine wasserdichte Schwelle zur Reaktorgrube. Das Becken hat die Abmessungen L x B x H = 9.0 m x 4.6 m x 7.6 m. Die Bauweise des Beckens und der Beckenauskleidung entspricht der des BEB. Demzufolge liegt die seismische Robustheit des REB (HCLPF) nicht unter 0.50 g zumal es kompakter gebaut ist und aufgrund des kleineren Volumens kleinere hydrodynamische Kräfte im Falle eines Erdbebens selbst bei voll geflutetem Zustand auftreten würden.

Beurteilung des ENSI

Das Brennelementbecken, die Reaktorgrube und das Reaktoreinbautenbecken liegen im Reaktorgebäude und sind deshalb im FE-Berechnungsmodell des Reaktorgebäudes berücksichtigt. Das ENSI hat die Modellierung des Reaktorgebäudes kontrolliert und betrachtet sie als zweckmässig. Diese Aussage gilt auch für die Becken. Nach Einschätzung des ENSI sind die Strukturen des BEB, der Reaktorgrube und des REB mit ihren starken Stahlbetonwänden und Decken sehr robust und weisen keine relevanten Schwachstellen aus. Die Vorgehensweise des Betreibers bei der Bestimmung der seismischen Robustheit ist plausibel. Die postulierten Versagensarten sind realistisch.

Das ENSI teilt aufgrund der durchgeführten Überprüfungen die Meinung des Betreibers, dass das Strukturversagen beim Referenzbeben mit PGA von 0.24 g bezogen auf Fundamentniveau des Reaktorgebäudes (-14 m) deterministisch ausgeschlossen werden kann.

5.2.2 Mechanische und elektrische Ausrüstungen

Angaben des Betreibers

Zur Gewährleistung der Standsicherheit der Brennelemente in den Lagerbecken hat KKM eine ausreichende Robustheit der Lagergestelle gegenüber dem 10'000-jährlichen Erdbeben ausgewiesen (HCLPF Wert vom 0.33 g).

Beurteilung des ENSI

Für die langfristige Sicherstellung der Kühlung der Brennelemente (über 72 Stunden) werden bei Erhalt der Integrität des Lagerbeckens keine elektrischen oder mechanischen Komponenten benötigt. Die im Jahr 2011 neu errichteten Einspeiseleitungen in das Brennelementbecken sind gegen die neu zu erwartenden Erdbebenlasten ausgelegt.

Nach Beurteilung des ENSI sind mit den vom KKM nachgereichten Erdbebenfestigkeit für die Lagergestelle die bisherige Nachweise zur Unterkritikalität der Brennelemente in den Lagerbecken auch nach einem 10'000-jährlichen Erdbeben gültig.

5.3 Radiologische Auswirkungen

Angaben des Betreibers

Gemäss Vorgaben des ENSI in /106/ kann die aktive Beckenkühlung nach einem Referenzerdbeben nicht kreditiert werden. Die Wasservorlage im Becken wird sich deshalb durch die Nachzerfallswärme der eingelagerten Brennelemente langsam erwärmen. Deren Kühlung wird, wie in /18/ bereits behandelt, passiv durch Verdunstung bzw. Verdampfung der Wasservorlage sichergestellt /15/.

Als abdeckender Fall wird ein komplett ausgelagerter Kern ca. sieben Tage nach Abschalten des Reaktors betrachtet. Dies entspricht konservativ abgeschätzt einer Heizleistung von 3200 kW /16/. Die dafür ermittelten Zeitspannen bis zum Absinken des Wasserspiegels auf das Niveau Oberkante Brennelemente entsprechen ca. 10.8 Tage (bei Füllstand 29.05 m) und 5.9 Tage (bei Füllstand 25.9 m).

Bei einer Nichtverfügbarkeit der Reaktorgebäudelüftung kondensiert das Wasser an der Innenseite der Außenwand des Reaktorgebäudes, oder falls der Druck im Reaktorgebäude durch die Verdampfung von Wasser aus dem Brennelementlagerbecken steigt, erfolgt ein Druckabbau gefiltert über den äusseren Torus in dem das Wasser wieder kondensiert. Können die Brennelemente mit Wasser überdeckt gehalten werden, kann kein Filmsieden mit entsprechenden BE-Hüllrohrsäden entstehen. /18/

Das Brennelementbecken erreicht nach etwa 50 Stunden eine Temperatur von 85°C und der Wasserverlust durch Verdunstung beträgt dann etwa 1.7 t/h. Für den Betrachtungszeitraum von 72 Stunden, der für den Nachweis gefordert wurde, ergibt sich daraus die verdunstete Wassermenge zu 38 t. Würde diese Menge über die verschiedenen Wasservorlagen in die Umgebung gelangen, so würden 3.8E+3 Bq Aerosole und 3.1E+7 Bq I-131 über den Kamin abgegeben /17/. Die konservativ abgeschätzten Aktivitäten für die Aerosole und Spaltprodukte sind vernachlässigbar klein; für die Berechnung einer Folgedosis ist also nur der Beitrag des I-131 relevant. Aus dem Abgabereglement lässt sich folgern, dass bei der Abgabe von 1E+8 Bq I-131 mit einer Folgedosis etwa 0.002 mSv zu rechnen ist.

Der stabile Zustand der Kühlbarkeit der Brennelemente im Brennelementbecken ist über drei Tage nach einem Referenzerdbeben hinaus für alle Betriebszustände nachgewiesen. /16/

Beurteilung des ENSI

In den vom KKM nachgereichten Betrachtungen zu den radiologischen Folgen verdampfenden Wassers aus dem Brennelementbecken nach Kühlungsausfall wurde u.a. ein konservatives Szenario betrachtet (bei ausgeladenem Kern). Für die Freisetzung wird unterstellt, dass das gesamte Iodinventar im verdampfenden Anteil des Beckenwassers freigesetzt wird und die übrigen Stoffe (Kobalt, Antimon, Cäsium) entsprechend dem Übertrag-Anteil des verdampften Brennelementbeckeninventars freigesetzt werden. Das ENSI stellte bei der Überprüfung fest, dass bei der Berechnung der Aktivitätskonzentrationen für den Zeitpunkt nach drei Tagen für I-132 kein Aufbau dieses Nuklids durch Te-132 berücksichtigt wurde. Damit wird nach Auffassung des ENSI übersehen, dass das I-132 quasi im Gleichgewicht mit Te-132 vorhanden ist und folglich auch nur mit dessen Halbwertszeit abnimmt. Ausserdem geht das ENSI von einer um den Faktor 3.2 höheren Verdampfungsrate gemäss /15/ aus.



Die angesetzten Freisetzunganteile für Aerosole sind akzeptabel. Aufgrund der grossen Unsicherheiten betreffend Freisetzungsmechanismen der Iode geht das ENSI in einer eigenen konservativen Abschätzung von der Freisetzung aller im Beckenwasser vorhandenen Iode aus. Das ENSI hat entsprechende Ausbreitungsrechnungen mit verschiedenen Abgabehöhen berechnet und stellt fest, dass die so ermittelten Werte zwar deutlich grösser ausfallen, im Vergleich zu 100 mSv aber sehr klein sind.



6 Nachweis Kombination von Erdbeben und Hochwasser

6.1 Überprüfung der Stauanlagen im Einflussbereich des KKM

Das ENSI hat am 1. April 2011 aufgrund der Ereignisse in Fukushima unter anderem verfügt /106/, dass die schweizerischen Kernkraftwerke bis zum 31. März 2012 die Beherrschung der Kombination des 10'000-jährlichen Erdbebens und dem durch dieses Erdbeben eventuell ausgelösten Versagen der Stauanlagen im Einflussbereich des jeweiligen Kernkraftwerks nachzuweisen haben.

Im Nachgang zum EU-Stresstest forderte das ENSI am 10. Januar 2012 das KKM zusätzlich auf /2/, als Zwischenresultat den Erdbeben-Standsicherheitsnachweis (insbesondere den Nachweis der lokalen und globalen Stabilität) für das Wasserkraftwerk Mühleberg bis zum 31. Januar 2012 ein-zureichen. Dabei sollte der Nachweis grundsätzlich gemäss BWG-Richtlinie (heute Bundesamt für Energie) zur Sicherheit von Stauanlagen geführt werden. In Abweichung von der BWG-Richtlinie waren die verschärften seismischen Gefährdungsannahmen gemäss der Verfügung vom 1. April 2011 /106/ anzusetzen.

Mit Brief /3/ vom 31. Januar 2012 hat der Betreiber der geforderte Standsicherheitsnachweis für die Staumauer des Wohlensees /4/ dem ENSI zugestellt. Da die Zuständigkeit für die Aufsicht über das Wasserkraftwerk Mühleberg gemäss Stauanlagenverordnung beim Bundesamt für Energie liegt, hat das ENSI das Bundesamt für Energie am 31. Januar 2012 um Unterstützung bei der Überprüfung der Zwischenresultate gebeten /5/. Mit Brief vom 27. Februar 2012 /116/ hat das BFE dem ENSI die Resultate der Überprüfung zugestellt. /118/

Am 29. März 2012 hat der Betreiber des KKW Mühleberg eine Aktennotiz „Deterministischer Nachweis der Beherrschung der Kombination von Erdbeben und Hochwasser für das KKM“ /7/ mit zugehöriger Dokumentation eingereicht. Diese beinhaltet die definitiven Nachweise für die Stauanlagen Rossens /27/, Schiffenen /26/ und Mühleberg /22/. Im letzten Fall handelt sich um Vervollständigung des Berichts /21/ vom 31. Januar 2012. Auch in diesem Fall hat das ENSI das Bundesamt für Energie am 20. April 2012 um Unterstützung bei der Überprüfung gebeten /8/.

Mit Brief vom 26. Juni 2012 /117/ hat das BFE dem ENSI die Resultate der Überprüfung zugestellt (Prüfberichte /119/, /120/, /121/).

Angaben des Betreibers

In seiner Verfügung vom 1. April 2011 /106/ hat das ENSI im Punkt 3.3 dem Betreiber die Forderung gestellt, den Nachweis zur Beherrschung der Kombination von Erdbeben und dem durch das Erdbeben ausgelöste Versagen der Stauanlagen im Einflussbereich des Kernkraftwerks Mühleberg zu erbringen.

Die Stauanlage Mühleberg befindet sich 1.5 km oberwasserseitig des KKM an der Aare und könnte bei einem Versagen zu Überflutungen auf dem Areal des KKM führen. Zwei Stauanlagen an der Saane haben Entfernungen zum KKM von ca. 11 km (Stauanlage Schiffenen) bzw. von ca. 30 km (Stauanlage Rossens). Deren Versagen könnte an dem 3 km unterwasserseitig liegenden Zusammenfluss der Saane mit der Aare zu einem Rückstau führen und das Areal des KKM überfluten. Aus diesem Grund wurden diese drei Stauanlagen detailliert untersucht.

Der Betreiber führt die Nachweise gemäss der in der Verfügung /106/ beschriebenen Variante 1. Für alle Stauanlagen, welche das KKM potenziell gefährden können, wird deterministisch nachgewiesen, dass bei einem 10 000-jährlichen Erdbeben eine unkontrollierte Wasserabgabe ausgeschlossen werden kann. Die betrachteten Stauanlagen sind der Verordnung über die Sicher-

heit der Stauanlagen (StAV) unterstellt /126/. Die Erdbebennachweise werden folglich nach einheitlichen Kriterien gemäss den BWG-Richtlinien durchgeführt /139/, /140/ und /141/.

Für die dynamischen Berechnungen der betrachteten Stauanlagen werden abweichend von den BWG-Richtlinien /141/ Gefährdungsspektren für laufenden Erdbebengefährdungsanalysen in der Schweiz verwendet (/37/ und /38/). Die zum vorliegenden Erdbebensicherheitsnachweis angesetzten Erdbebenbeschleunigungs-Zeitverläufe (/88/, /141/) sind mit diesen Gefährdungsspektren kompatibel. Aufgrund einer Analyse der Deaggregation der seismischen Gefährdung wurden für die vorliegenden Untersuchungen generierte Erdbebenverläufe mit Starkbebendauer um 8 Sekunden gewählt.

Die Nachweise wurden mit detaillierten Finite-Elemente-Modellen mittels dynamischer Zeitverlaufs berechnungen geführt. Während bei Gewichtsmauern die Standsicherheit meist durch die Gleitsicherheit bestimmt ist, sind für Bogenstaumauern im Allgemeinen die Spannungsnachweise massgebend.

Stauanlage Mühleberg

Die Stauanlage Mühleberg wurde zwischen 1917 und 1920 erbaut. Es handelt sich um eine Gewichtsmauer aus Beton. Sie besteht aus dem Wehr mit einem oberen und einem unteren Abfallboden, dem Maschinenhaus und einem Maschinenhausanbau. Der Standort liegt in einem ca. 100 m tiefen U-förmigen Erosionstal, das von der Aare in das Molasseplateau eingeschnitten wurde. Die Anlagenteile Wehr und Maschinenhaus sind auf der ganzen Länge im anstehenden Fels der Unteren Süsswassermolasse (USM) fundiert, welche eine nahezu horizontale Schichtung aufweist. Abgestimmt auf die Baugrundverhältnisse sind bis zu fünf Meter tiefe Spalten in den Felsuntergrund eingelassen. Das Stauvolumen beträgt 18 Mio. m³

Die standortspezifische Erdbebengefährdungsanalyse erfordert die Bestimmung der seismischen Quellencharakteristiken, der Ausbreitungscharakteristiken und der Standortcharakteristiken. Wegen der unmittelbaren Nähe der Stauanlage zum Kernkraftwerk sind die ersten beiden Charakteristiken für beide Standorte weitestgehend identisch. Lediglich die Standortcharakteristiken erfordern eine gründliche Überprüfung und gegebenenfalls Anpassung. Die umfangreichen Baugrunduntersuchungen zwischen Juli und Oktober 2011 mit unter Anderen 16 Sondierungsbohrungen ergaben hierüber Aufschluss /23/. Ein Vergleich mit den Ergebnissen aus den Baugrunduntersuchungen am Standort des KKM zeigte, dass die Bedingungen des Standortes des KKM auf Reaktorgebädefundamentniveau bei -14 m unter Geländeoberkante vergleichbar ist mit dem Fels auf Stauanlagenfundamentniveau. Neben dem Schichtaufbau bestätigte dies auch der Vergleich der Scherwellengeschwindigkeiten /24/. Aus diesen Gründen wird das Gefährdungsspektrum des Standortes des KKM auf Reaktorgebädefundamentniveau bei -14 m unter Geländeoberkante als Gefährdungsspektrum zur Bestimmung der Referenzerdbeben für den Erdbebennachweis der Stauanlage Mühleberg herangezogen.

Gemäss den ausgeführten geologischen und geotechnischen Untersuchungen ist das WKK Mühleberg quer zum Lauf der Aare angeordnet und auf der ganzen Länge im anstehenden Fels der Unteren Süsswassermolasse (USM) fundiert (/23/, /24/). Die Untere Süsswassermolasse besteht aus einer horizontal liegenden Wechsellagerung von Sand- und Siltsteinbänken in welche dünne Tonsteinschichten eingelagert sind. Die Scherfestigkeitsparameter (Kohäsion und Reibungswinkel) für die Tonstein-Mergel-Tonmergel Schichten und für den Sandstein im Fundationsbereich der Stauanlage wurden aufgrund der Ergebnisse der felsmechanischen Laborversuche bestimmt.

Bei der Modellierung der Anlage wurden die Anlagenteile mit dem mitschwingenden Felsuntergrund und mit den ebenfalls mitschwingenden Wassermassen berücksichtigt. Die zur Modellierung des Felsuntergrundes notwendigen Daten wurden mittels umfangreicher Baugrunduntersu-

chungen zwischen Juli und Oktober 2011 erhoben /23/. Die erhobene Datenbasis wurde von einer Expertengruppe bewertet. Die Auswertung der Datenbasis und die Auswahl der notwendigen Parameter zur Modellierung des Felsuntergrundes sind in /24/ zusammengefasst.

Die Erdbebennachweise für die Integrität und Stabilität der Anlagenteile Wehr und Maschinenhaus wurden getrennt geführt. Die Nachweise wurden mit detaillierten Finite-Elemente-Modellen mittels dynamischer Zeitverlaufsberechnungen geführt.

Die dynamischen Berechnungen mittels zweier voneinander unabhängigen dreidimensionalen Finiten-Elemente-Modelle für das Maschinenhaus und das Wehr des WKW Mühleberg und seiner Fundation zeigen, dass der dynamische Spannungsnachweis sowohl für Druck- als auch für Zugspannungen erbracht werden kann. Folglich ist die Integrität der Anlagenteile für die Referenzerdbeben gewährleistet, Schäden an der Staumauer werden nicht erwartet /22/.

Für den Nachweis der Stabilität gegen Gleiten wurden ebenfalls dynamische Zeitverlaufsberechnungen für die drei Referenzerdbeben durchgeführt. Dabei sind die rückhaltenden Kräfte um mindestens 30 % grösser als die treibenden Kräfte. Ferner zeigte sich, dass kein Kipprisiko besteht. Somit ist für die Stauanlage Mühleberg die Gleit- und Kippsicherheit gemäss den Vorgaben der BWG Richtlinie mit den neuen Gefährdungsannahmen gewährleistet /22/.

Der Nachweis der Funktionstüchtigkeit der Sicherheitsorgane (Stauklappen, Plungerkolben und Grundablass) ist ebenfalls erbracht /22/.

Um die Ergebnisse der FE-Berechnungen nachzuprüfen wurden einige ergänzende Untersuchungen durchgeführt. Die Idee war, den Einfluss einzelner Variationen gewisser Modell-Parameter auf Schlüssel-Elemente der Berechnung zu bestimmen, oder die wichtigsten Sicherheitsnachweise auf Grund von anderen Standpunkten (oder anderen anerkannten Prozeduren) zu betrachten.

Bogenmauer Schiffenen und Rossens

Bei der Staumauer Schiffenen handelt es sich um eine doppelt gekrümmte Bogenmauer, welche rund 15 km flussabwärts der Stadt Fribourg liegt. Die 47 m hohe Bogenmauer weist eine Kronenlänge von 470 m auf und wurde in den Jahren 1961-1963 gebaut. Die Mauerstärke beträgt 7 m bei der Mauerkrone und nimmt gegen die Basis hin auf 12 m zu. Die Mauerbögen weisen über die gesamte Länge eine konstante Stärke auf. Lediglich bei den seitlichen Widerlagern nimmt die Mauerdicke talseitig zu. Die Fundation der Mauer weist einige Besonderheiten auf. So ist die Mauerbasis auf dem Talboden fundiert, welcher aus Süßwassermolasse besteht, während die seitlichen Widerlager aus dem Fels der Meerwassermolasse gebildet werden. Das Stauvolumen beträgt 65 Mio. m³

Die doppeltgekrümmte Bogenstaumauer Rossens staut den Saanefluss in Kanton Freiburg zum Ausgleichsbecken Greyerzersee. Die Mauer wurde im Jahre 1948 fertiggestellt. maximale Mauerhöhe beträgt 83 m bei einer Kronenlänge von 320 m. Die Kronenbreite beträgt 5 m und die maximale Mauerstärke 28 m. Die Mauer ist kreisbogenförmig, mit einer sich ausdehnenden Breite zur Fundation hin. Das Stauvolumen beträgt 220 Mio. m³

Im gleichen Zuge wie die Aktualisierung der standortspezifischen Erdbebengefährdung für die Kernkraftwerksstandorte nach den Ereignissen in Japan Ende Mai 2011, wurden die standortspezifischen Erdbebengefährdungen für eine mittlere Eintretenshäufigkeit von einmal in 10'000 Jahren auch für Standorte von Stauanlagen ermittelt /37/. Im Unterschied zu den Kernkraftwerksstandorten liegen für diese Standorte jedoch keine umfassenden Standortuntersuchungen vor. Dies ist in diesen Fällen nicht erforderlich, da die untersuchten Standorte von Stauanlagen Felsstandorte sind und eine geringe Bodenamplifizierung erwarten lassen. Es wurde eine über die ersten 30 m gemittelte, generische Scherwellengeschwindigkeit von 1000 m/s angenommen,

konsistent mit der Scherwellengeschwindigkeitscharakterisierung für weiche Felsformationen, zu denen auch die an beiden Standorten vorhandene Untere Süßwassermolasse gehört. Für die Stauanlagenstandorte mit weitaus höheren Scherwellengeschwindigkeiten in den ersten 30 Metern stellt diese Annahme eine zusätzliche Konservativität bezüglich der Erdbebengefährdungsbestimmung dar.

Die Berechnungen der Bogenstaumauer Schiffenen führte zu folgenden Resultaten: Die dreidimensionale numerische Berechnung mit dynamischen Zeitverlaufsberechnungen zeigte, dass sich im Erdbebenfall zu lokalen und kurzzeitigen partiellen Öffnung der vertikalen Blockfugen kommen könnte, ohne Beeinträchtigung der Stabilität der Mauer. beim wasserseitigen Mauerfuss ist auch eine Öffnung der Basisfuge (Konstruktionsfuge auf Höhe der Fundation) zu erwarten. Anhand einer Zusatzberechnung konnte aber nachgewiesen werden, dass die Mauer auch in diesem Fall einen Gleichgewichtszustand finden kann. Die horizontalen Lasten werden dabei massgeblich über die Bogenwirkung der Mauer in die seitlichen Widerlager, die bis in die Meeresmolasse reichen, eingeleitet. Die Stabilität der seitlichen Widerlager gegenüber Gleiten der Mauer ist auch bei offener Basisfuge nachgewiesen. Die Nebenanlagen der Bogenstaumauer, wie Wasserfassung, Grundablässe und Hochwasserentlastung, wurden nicht betrachtet, da diese keine Signifikanz bezüglich der Hochwassersicherheit des KKM haben. Der Nachweis der Erdbebensicherheit ist für die Bogenstaumauer Schiffenen somit für die neuen Gefährdungsannahmen erbracht /26/

Im Falle der Bogenstaumauer Rossens wird die dynamische Druckfestigkeit des Betons unter statischer und dynamischer Beanspruchung in keinem Fall überschritten. Die vertikalen und horizontalen Zugspannungen hingegen weisen im unteren Bereich höhere Werte als die dynamische Zugfestigkeit auf. Eine mögliche Rissentwicklung wurde deshalb eingehender analysiert. Die Resultate zeigen, dass sich keine Risse über die ganze Breite entwickeln können. Die verminderte Tragfähigkeit wird durch Bogenwirkung mit Vergrösserung der Druckspannungen kompensiert. Mit Ausnahme von lokal erhöhten Zugspannungen ist die Beanspruchung der Mauer im Erdbebenfall als gering einzustufen und weist genügende Reserven auf. Die Gleitsicherheit konnte mittels Analyse der Kontaktflächen Mauer-Widerlager nachgewiesen werden. Die Nebenanlagen der Bogenstaumauer, wie Wasserfassung, Grundablässe und Hochwasserentlastung, wurden nicht betrachtet, da diese keine Signifikanz bezüglich der Hochwassersicherheit des KKW Mühleberg haben. Der Nachweis der Erdbebensicherheit ist für die Bogenstaumauer Rossens somit für die neuen Gefährdungsannahmen erbracht /27/

Beurteilung des ENSI und des BFE

Die Zuständigkeit für die Aufsicht über die betrachteten Stauanlagen liegt gemäss Stauanlagenverordnung beim Bundesamt für Energie. Die Nachweise des Betreibers werden grundsätzlich gemäss BWG-Richtlinien zur Sicherheit von Stauanlagen geführt. Aus diesem Grund hat das Bundesamt für Energie auf Nachfrage des ENSI die Hauptprüfung der Nachweise übernommen. Da aber die Festlegung der seismischen Gefährdungsannahmen gemäss der Verfügung des ENSI vom 1. April 2011 /106/ in Abweichung von der BWG-Richtlinie erfolgte, hat das ENSI die Aspekte der Nachweise geprüft, die mit Erdbebengefährdung zusammenhängen

Das ENSI überprüfte, ob die Gefährdungsannahmen des Betreibers für die betrachteten Stauwerke den Vorgaben des ENSI aus der Verfügung vom 1. April 2011 /106/ entsprechen. Weiter überprüfte das ENSI die Vorgehensweise bei der Bestimmung der Erdbebeneinwirkung (Zeitverläufe der Bodenbeschleunigung) und die Bestimmung der Bodenkennwerte.



Erdbebeneinwirkung

Für die dynamischen Berechnungen hat ENSI verlangt, dass die Erdbebeneinwirkung auf Basis von aktuellsten Ergebnissen aus der PRP Studie bestimmt wird. Für den Standort der Staumauer ist keine separate Erdbebengefährdungsstudie vorhanden. Aus diesem Grund hat der Betreiber die Resultate (Antwortspektren der Bodenbeschleunigung) für den benachbarten Standort KKW Mühleberg verwendet. Durch Analyse der lokalen Untergrundeigenschaften im Bereich der Stauanlage wurde für die Berechnung der Erdbebensicherheit ein UH Spektrum für eine Widerkehrperiode von 10'000 Jahren, eine Dämpfung von 5% und für Kote -14 m (Felsniveau) verwendet /38/. Dabei liegt die Maximale Bodenbeschleunigung (PGA) bei 0.24 g. Die Spektren der Vertikalschleunigung wurden aus dem Horizontalspektrum abgeleitet durch Skalierung mit Faktor 2/3 wie das z.B. in der SIA Norm 261 vorgegeben wird. Das ENSI findet diese Annahmen plausibel.

Die mitgelieferten Berechnungen der Zeitverläufe /88/ und /89/ sind gemäss einer qualitativen Kontrolle des ENSI plausibel, vollständig und auf dem Stand der Technik. Für die verwendeten Zeitverläufe hat das ENSI stichprobenartig Antwortspektren ermittelt. Der Vergleich mit dem Zielspektrum zeigt eine gute Übereinstimmung, woraus geschlossen wird, dass die Erzeugung der Input-Beschleunigungszeitverläufe durch den Betreiber richtig erfolgt ist. Die Wahl der Starkbebenzeit von bis ca. 8 s findet das ENSI plausibel.

Das ENSI stellt abschliessend fest, dass die Erdbebeneinwirkung für die untersuchten Stauwerke korrekt ermittelt wurde und eine plausible Grundlage für die Erbringung der geforderten Nachweise darstellt. Das ENSI weist darauf hin, dass die Berechnungen des Betreibers nach dem Abschluss des PRP und neuen Festlegung der Erdbebeneinwirkung revidiert werden müssen. Dabei werden auch die neuen Vorgaben zur Erzeugung der Beschleunigungszeitverläufe für die Zeitschrittberechnungen berücksichtigt werden müssen.

Bodenkennwerte

Es wurden neue detaillierte Bodenuntersuchungen durchgeführt und die schon vorhandenen Untersuchungen ausgewertet. Die angenommenen Werte der Materialkennziffer des Bodens sind grundsätzlich nachvollziehbar. Da die Werte der Bodenfestigkeit einen grossen Einfluss auf die Standsicherheit haben, hat das ENSI vorgeschlagen Sensitivitätsanalysen durchzuführen um die Relevanz der Berechnungsannahmen besser schätzen zu können. Der Betreiber hat die entsprechenden Studien durchgeführt und gezeigt, dass für die gewählte Gleitfläche die Stabilität der Mauer auch mit reduzierten Werten der Bodenfestigkeit nachgewiesen werden kann.

Stauanlage Mühleberg

Der Bericht der Stucky AG vom 4. Mai 2012 /22/, welcher den Bericht vom 31. Januar 2012 /21/ ergänzt, ist grundsätzlich nachvollziehbar. Das Vorgehen entspricht den Anforderungen des BWG Basisdokuments zum Nachweis der Erdbebensicherheit, Stand März 2003. Die meisten Fragen gemäss Zwischenbeurteilung des BFE vom 27. Februar 2012 wurden mit Bericht // für BFE geklärt. Unter anderem wurde die Funktionstuchtigkeit der Sicherheitsrelevanten Nebenanlagen unter Erdbebeneinwirkung nachgewiesen.

„Die Schlussfolgerung in den eingereichten Erdbebensicherheitsnachweisen lautet, dass die überprüften Anlagen einem Erdbeben gemäss den vom ENSI vorgegebenen Gefährdungsannahmen ohne lokale oder globale Instabilität widerstehen können“

„Das BFE kommt zum Schluss, dass die geprüften Unterlagen den Anforderungen an die Erdbebensicherheit von Stauanlagen weithin genügen. Zur Vervollständigung der Nachweise sind einzelne ergänzende Erläuterungen und Aussagen notwendig“ /Brief BFE vom 26.06.2012/.

Namentlich:

- Der Einfluss der Wahl der Lage und der Neigung der Gleitfläche auf die Gleitsicherheit ist zu quantifizieren. Insbesondere sind auch horizontal und höher gelegene Gleitflächen zu untersuchen.
- Die Zulässigkeit des verwendeten Modells des Maschinenhauses für eine horizontale Anregung in Querrichtung des Flusses ist zu begründen. (Modellierung für eine Anregung in Flussrichtung kann nachvollzogen werden)
- Der Spannungszustand unter dynamischer Einwirkung ist auch global zu betrachten und im Hinblick auf die Ziele der Stauanlagensicherheit zu interpretieren.
- Es fehlt eine Aussage über die Stabilität der Uferbereiche des Stauraums

Stauanlage Schiffenen

Der Bericht vom März 2012 /26/ ist nachvollziehbar. Das Vorgehen entspricht den Anforderungen des BWG Basisdokuments zum Nachweis der Erdbebensicherheit, Stand März 2003. Es wird im Bericht aufgezeigt, dass unter der angesetzten Erdbebeneinwirkung die Spannungen in der Staumauer begrenzt bleiben bzw. dass eine zulässige Spannungsumlagerung erfolgt, dass die Gesamtstabilität der Staumauer gegeben ist und dass keine Instabilität im Stauraum und somit keine Gefahr aus potentiellen Rutschmassen besteht.

„Die Schlussfolgerung in den eingereichten Erdbebensicherheitsnachweisen lautet, dass die überprüften Anlagen einem Erdbeben gemäss den vom ENSI vorgegebenen Gefährdungsannahmen ohne lokale oder globale Instabilität widerstehen können.“

„Das BFE kommt zum Schluss, dass die geprüften Unterlagen den Anforderungen an die Erdbebensicherheit von Stauanlagen weithin genügen. Zur Vervollständigung der Nachweise sind einzelne ergänzende Erläuterungen und Aussagen notwendig“ /Brief BFE vom 26.06.2012/.

Namentlich:

- Aussage über die Funktionstüchtigkeit des Grundablasses nach einem Erdbebenereignis
- Aufzeigen des Einflusses der Modellausdehnung auf die Resultate

Stauanlage Rossens

Der Bericht der vom März 2012 /27/ ist nachvollziehbar. Das Vorgehen entspricht den Anforderungen des BWG Basisdokuments zum Nachweis der Erdbebensicherheit, Stand März 2003. Es wird in Bericht gezeigt, dass unter der angesetzten Erdbebeneinwirkung die Spannungen in der Staumauer begrenzt bleiben bzw. dass eine zulässige Spannungsumlagerung erfolgt, und dass die Gesamtstabilität der Staumauer gegeben ist.

„Die Schlussfolgerung in den eingereichten Erdbebensicherheitsnachweisen lautet, dass die überprüften Anlagen einem Erdbeben gemäss den vom ENSI vorgegebenen Gefährdungsannahmen ohne lokale oder globale Instabilität widerstehen können.“

„Das BFE kommt zum Schluss, dass die geprüften Unterlagen den Anforderungen an die Erdbebensicherheit von Stauanlagen weithin genügen. Zur Vervollständigung der Nachweise sind einzelne ergänzende Erläuterungen und Aussagen notwendig“ /Brief BFE vom 26.06.2012/.



Namentlich:

- Aussage über die Funktionstüchtigkeit der Grundablässe nach einem Erdbebenereignis
- Aufzeigen, dass keine Gefahr aus potentiellen Rutschmassen im Stauraumbereich ausgeht
- Bestätigung, dass der Rand des Berechnungsmodells in allen Richtungen als unverschieblich angenommen wurde
- Bestätigung, dass der Untergrund als masselos angenommen wurde

Abschliessende Beurteilung des ENSI

Gestützt auf die Stellungnahmen des BFE (/117/, /119/, /120/, /121/) und auf die eigenen Überprüfungen kommt das ENSI zum folgenden Schluss:

Die Aussage des Betreibers, dass infolge eines 10'000-jährlichen Erdbebens eine unkontrollierte Wasserabgabe ausgeschlossen ist, kann durch das ENSI nachvollzogen werden. Das ENSI betrachtet somit der Nachweis der Beherrschung der Kombination von Erdbeben und dem durch das Erdbeben ausgelöste Versagen der Stauanlagen im Einflussbereich des Kernkraftwerkes als erbracht gemäss Variante 1 in der Verfügung vom 1. April 2011 /106/.

Der Betreiber hat die Berechnungen gemäss der Bemerkungen des BFE (siehe /119/, /120/, /121/) zu vervollständigen. Die ergänzten Unterlagen werden von BFE einer abschliessenden Kontrolle unterzogen.

Forderung 3: *Der Betreiber hat die Berechnungen der Erdbebensicherheit für Stauanlagen im Einflussbereich des KKM gemäss Angaben in Prüfberichten des BFE zu vervollständigen. Die überarbeiteten Unterlagen sind dem BFE und dem ENSI bis zum 31. Oktober 2012 einzureichen.*

6.2 Radiologische Auswirkungen

Angaben des Betreibers

Es konnte nachgewiesen werden, dass eine unkontrollierte Wasserabgabe von Stauanlagen, die das KKM gefährden könnten (Mühleberg, Rossens und Schiffenen), für das betrachtete 10'000-jährliche Erdbeben ausgeschlossen ist.

Beurteilung des ENSI

Da sich somit kein neues Schadensbild aufgrund der Kombination Erdbeben und Überflutung ergibt, erübrigt sich auch nach Auffassung des ENSI eine radiologische Analyse.



7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

7.1 Zusammenfassung

Gegenstand und Grundlage der Beurteilung

Mit Briefen vom 29. März 2012 /4/ und vom 30. März 2012 /2/ hat das KKM dem ENSI die in der Verfügung vom 1. April 2011 /106/ geforderten Nachweise zur Beherrschung eines 10'000-jährlichen Erdbebens sowie der Kombination von Erdbeben und Hochwasser fristgerecht eingereicht. Bereits vorgängig mit Brief vom 27. November 2011 /1/ sind die Erdbebenfestigkeitsnachweise (Fragilities) für alle relevanten Bauwerke, Systeme und Komponenten eingereicht worden. Neben der Sicherheit des Kernreaktors, des Primärkreislaufs und des Containments war gemäss der ENSI-Verfügung vom 5. Mai 2011 /107/ auch die Auslegung der Brennelementlagerbecken, -gebäude und -kühlsysteme zu überprüfen und die Einhaltung der zulässigen Dosislimiten für diese Störfälle nachzuweisen. Im zusammenfassenden deterministischen Nachweis /6/ hat das KKM dargelegt, dass diese Störfälle unter Einhaltung der vom ENSI vorgegebenen Randbedingungen und des nach StSV /124/ zulässigen Grenzwerts von 100 mSv beherrscht werden.

Prüfverfahren des ENSI

Nach einer Grobprüfung der am 27. November 2011 /1/ eingereichten Unterlagen hat das ENSI weitere Dokumente eingefordert, die das KKM mit Briefen vom 27. Januar 2012 /7/ (Seismische Robustheit der Abschaltfunktion), vom 31. Januar 2012 /5/ (Erdbebenfestigkeitsnachweis für das Wasserkraftwerk Mühleberg) und am 28. März 2012 /3/ (Überprüfung der Auslegung der Brennelementbecken) nachgereicht hat. Aus Inspektionen und Fachgesprächen, die das ENSI zur Klärung offener Punkte und Fragen durchgeführt hatte, resultierte ein weiterer Bedarf an zusätzlicher Dokumentation. Diesen Forderungen ist das KKM im Mai 2012 nachgekommen. Insgesamt umfasst die vom KKM eingereichte Dokumentation rund 100 Berichte im Gesamtumfang von mehreren tausend Seiten sowie etliche elektronische Dateien.

Das ENSI hat die vom KKM eingereichten Analysen und Berechnungsmodelle hinsichtlich der Erfüllung der in der Verfügung vom 1. April 2011 /106/ definierten Randbedingungen und hinsichtlich der Akzeptanz und Korrektheit sowie der Plausibilität der Ergebnisse überprüft. Aufgrund des grossen Umfangs der KKM-Dokumentation, speziell im Bereich der Nachweise der Erdbebenfestigkeiten, wurden vom ENSI mehrheitlich stichprobenartige Überprüfungen der zur Störfallbeherrschung erforderlichen Strukturen und Komponenten durchgeführt.

Im Bereich der systemtechnischen Voraussetzungen und Anforderungen wurden vom ENSI die vom KKM genannten, zur Störfallbeherrschung erforderlichen Systeme und Komponenten eingehend überprüft. Ebenso sind die Erdbebeneinwirkungen, auf ihrem Weg vom Fels über den Baugrund via Gebäude bis hin zu den einzelnen Komponenten, im Detail geprüft worden. Dies gilt auch für die Analysen zu den radiologischen Auswirkungen des 10'000-jährlichen Erdbebens sowie zur Beherrschung der Kombination vom Erdbeben und Hochwasser. Bei der letzteren Überprüfung wurde das ENSI vom für die Stauanlagen zuständigen Bundesamt (BFE) unterstützt.

Bewertung der Gefährdungsannahmen

Das KKM hat die Erdbebenberechnungen zuerst mit der PEGASOS Gefährdung durchgeführt und nachträglich die berechneten Erdbebenfestigkeiten von Strukturen, Systemen und Komponenten auf das PRP-IH Niveau umgerechnet. Auf diese Weise sind die Nachweise des KKM konform mit der Verfügung vom 1. April 2011 /106/ wonach die PRP-IH Gefährdung als Grundlage der Nachweise vorgegeben wird. Alle Berechnungsschritte von der Bestimmung der Zeitverläufe

über Analysen zur Boden-Bauwerk Interaktion bis zur Bestimmung der Etagenspektren wurden vom ENSI unter Einbezug von Experten geprüft. Die vom KKM bestimmten Erdbebeneinwirkungen konnten bestätigt werden.

Für ein 10'000-jährliches Erdbeben gemäss PRP-IH Gefährdung liegt die maximale horizontale Bodenbeschleunigung (PGA) auf dem Niveau des Reaktorgebäudefundamentes (-14 m) bei 0.24 g. Dieser Wert gilt als Referenz für die Erdbebenfestigkeitsnachweise.

Bestimmung der Erdbebenfestigkeiten und Nachweisführung

Für die Bestimmung der Erdbebenfestigkeiten der Strukturen, Systeme und Komponenten (SSK) hat das KKM probabilistische Methoden nach EPRI angewendet. Als Kenngröße für die Beurteilung, ob eine Struktur ein System oder Komponente den Erdbebeneinwirkungen standhält, dient der in den seismischen Versagenswahrscheinlichkeitskurven („fragility curves“) ausgewiesene, auf der Referenzniveau -14 m bezogene Erdbebenfestigkeitswert (HCLPF). Ist der HCLPF der SSK höher als die maximale Bodenbeschleunigung infolge des 10'000-jährlichen Erdbebens auf Fundamentniveau des Reaktorgebäudes (-14 m), gilt der Nachweis als erfüllt.

Für die zur Kern- und Beckenkühlung während 72 h erforderlichen SSK weist das KKM die genügenden Erdbebenfestigkeiten resp. HCLPF-Werte nach. In der Regel hat das KKM für die Gebäude umfangreiche Erdbebennachweise mit Finite-Element-Modellen durchgeführt. Die HCLPF Werte für mechanische und elektrotechnische Komponenten basieren auf Berechnungen, Auslegungsunterlagen, Rütteltischversuchen oder auf generischen Werten, die auf Abschätzungen von den an Anlagenbegehungungen beteiligten Experten beruhen oder aus EPRI-Guides und Datenbanken entnommen wurden. Aufgrund eigener Vergleichsrechnungen, Vergleichen mit der ursprünglichen Auslegung oder mit Ergebnissen aus Rütteltischversuchen sowie Plausibilitätsbetrachtungen unter Einbezug der EPRI-Guides kommt das ENSI zum Schluss, dass das methodische Vorgehen des KKM korrekt ist und die Ergebnisse plausibel sind.

Die Überprüfung durch das ENSI bestätigt die Aussage des KKM, dass ein Strukturversagen der untersuchten relevanten Bauten (Reaktorgebäude, SUSAN Gebäude, Hochkamin) infolge eines 10'000-jährlichen Erdbebens mit PGA von 0.24 g bezogen auf das Fundamentniveau des Reaktorgebäudes (-14 m) ausgeschlossen werden kann.

Erforderliche SSK für die Kernkühlung und Brennelementbeckenkühlung

Das KKM hat dargelegt, dass zur Sicherstellung der Kernkühlung primär die besonders gegen äussere Einwirkungen geschützten Notstandssysteme eingesetzt werden. Die Funktionstüchtigkeit der Notstandssysteme wurde unter Berücksichtigung eines unabhängigen Einzelfehlers und unter Annahme des Ausfalls der externen Stromversorgung bei einem 10'000-jährlichen Erdbeben bestätigt. Die Wasserfassung für die Kühlwasserversorgung der Notstandssysteme ist nicht gefährdet, da ein erdbebenbedingtes Versagen des Staudamms und eine damit verbundene Flutwelle ausgeschlossen werden kann.

Für die Brennelementbeckenkühlung sind innerhalb von 72 Stunden keine Massnahmen notwendig, nach Ablauf dieser Frist wird die Kühlung mit internen Notfallschutzmassnahmen aufrechterhalten. Im Rahmen eines laufenden Geschäfts wird das KKM ein durchgehend für Erdbeben und Überflutung qualifiziertes Brennelementbeckenkühlsystem nachrüsten.

Das KKM hat die zur Kern- und Brennelementbeckenkühlung erforderlichen Strukturen, Systeme und Komponenten (SSK) identifiziert, inklusive der benötigten Sicherheitsfunktionen und internen Notfallschutzmassnahmen. Das ENSI hat die diesbezüglichen Darlegungen des KKM eingehend geprüft und kommt zum Schluss, dass die vom KKM genannten SSK vollständig und korrekt erfasst wurden und dass die vorgesehenen Fahrweisen geeignet sind, die Nachwärmeabfuhr aus



dem Reaktorkern und dem Brennelementlagerbecken während einer Zeitdauer von mindestens 72 h zu gewährleisten.

Nachweis Kombination von Erdbeben und Hochwasser

Beim Nachweis der Beherrschung der Kombination vom Erdbeben und dem durch das Erdbeben ausgelöste Versagen der Stauanlagen im Einflussbereich des Kernkraftwerkes Mühleberg hat der Betreiber die in der Verfügung /106/ beschriebene Nachweisvariante 1 gewählt. Für die drei Stauanlagen, welche das KKM potenziell gefährden können (Mühleberg, Schiffenen, Rossens), wurde deterministisch nachgewiesen, dass bei einem 10 000-jährlichen Erdbeben eine unkontrollierte Wasserabgabe ausgeschlossen werden kann. Die die von ENSI und BFE durchgeführte Überprüfung konnte diese Aussage bestätigen, wobei die Nachweise vom KKM noch vervollständigt werden müssen (Siehe 7.2)

Radiologische Auswirkungen

Die radiologischen Berechnungen des KKM berücksichtigen Dosisbeiträge aus dem Integritätsverlust der nicht gegen das betrachtete Erdbeben ausgelegten Teile der Abgasanlage, Frischdampf- und Speisewasserleitungen. Sie weisen eine Dosis weit unterhalb des zulässigen Grenzwerts von 100 mSv aus. Ferner hat der Betreiber plausibel dargelegt, dass zusätzliche Beiträge aus Sammel- und Vorratsbehältern sowie weitere Dosisbeiträge aus den Analysen für das BE-Becken im Verhältnis zur Gesamtdosis und zum Dosisgrenzwert verhältnismässig klein ausfallen. Das ENSI hat die angewandte Methodik und die Berechnungen des KKM überprüft und durch eigene abdeckende Berechnungen auf der Basis der vom KKM angenommenen Auswirkungen bestätigt gefunden. Das ENSI kommt zum Schluss, dass der Dosisgrenzwert von 100 mSv nach StSV /124/ deutlich eingehalten wird.

7.2 Schlussfolgerungen

Aufgrund der Prüfung der vom KKM eingereichten Dokumentation kommt das ENSI zum Schluss, dass die Kernkühlung und die Kühlung des Brennelementlagerbeckens unter Einwirkung eines 10'000-jährlichen Erdbebens und der Kombination von Erdbeben und erdbebenbedingtem Hochwasser einzelfehlersicher gewährleistet bleiben. Die Dosislimite von 100 mSv wird bei diesen Störfällen eingehalten. Das Kriterium gemäss Art. 3 der Ausserbetriebnahmeverordnung /122/ wird nicht erreicht.

Aus der Stellungnahme des ENSI zum Nachweis des KKM und der oben zusammenfassend dargestellten Beurteilung der KKM-Angaben durch das ENSI resultieren die nachfolgend genannten Forderungen. Diese Forderungen stellen die Prüfergebnisse des ENSI nicht in Frage. Deren Umsetzung wird vom ENSI in separaten Verfahren weiterverfolgt.

Forderung 1: *Der Betreiber hat die Sicherheit gegen das Anheben und seitliche Versetzen der Brennelemente infolge von vertikaler Erdbebenbeschleunigung zu untersuchen, das zur Verhinderung des Steuerstabeinschissens führen könnte. Die Resultate der Untersuchung sind dem ENSI bis zum 31. Dezember 2012 zur Beurteilung einzureichen.*

Forderung 2: *Das KKM hat hinsichtlich der Verbesserung der Dichtfunktion der Dammplatte eine Analyse durchzuführen und die Ergebnisse der Analyse dem ENSI bis zum 31. Dezember 2012 zur Beurteilung einzureichen.*

Forderung 3: *Der Betreiber hat die Berechnungen der Erdbebensicherheit für Stauanlagen im Einflussbereich des KKM gemäss Angaben in Prüfberichten des BFE zu vervollständigen. Die überarbeiteten Unterlagen sind dem BFE und dem ENSI bis zum 31. Oktober 2012 einzureichen.*



8 Referenzen

- /1/ BKW Brief „Stellungnahme zur Forderung 3.1-1 der Verfügung vom 1. April 2011 Ihr Zeichen SGE/FLP - 11/11/003“, BR-AM-2011/440, A. Bruder / MASYL vom 27. November 2011
- /2/ BKW Brief „Ihre Verfügung vom 1. April 2011 - Stellungnahme zur Forderung 3.1“, BR-AM-2012/122, BRUAN/TANEL vom 30 März 2012
- /3/ BKW Brief „Bericht zur Verfügung des ENSI vom 5. Mai 2011: Stellungnahme zu Forderung 4“; BR-NT-2012/117, SUMAR/ULRNI vom 28. März 2012
- /4/ BKW Brief „Ihre Verfügung vom 1. April 2011 - Stellungnahme zur Forderung 3.3“ AM-2012/124 BAYYA vom 29. März 2012
- /5/ BKW Brief „Stellungnahme zur Forderung 3.4 der Verfügung vom 10. Januar 2012, Ihr Zeichen SGE – 10KEX.STRESSTEST, Erdbebenfestigkeitsnachweis für das Wasserkraftwerk Mühleberg“ BR-AM-2012/024, vom 31. Januar 2012
- /6/ BKW Aktennotiz „Deterministischer Nachweis der Beherrschung des 10'000-jährlichen Erdbebens für das KKM“ AN-UM-2012/052 vom 28.03.2012
- /7/ BKW Brief „Verfügung vom 10. Januar 2012, Forderung 3.3, Seismische Robustheit der Abschaltfunktion“, BR-UM-2012/023, BIEUL/LEHSA vom 27.01.2012
- /8/ BKW Aktennotiz „Stellungnahme zur seismischen Robustheit der Abschaltfunktion“ AN-UM-2012/004 vom 23.01.2012
- /9/ BKW Aktennotiz, „Deterministischer Nachweis zur Beherrschung des 10'000-jährlichen Hochwassers,“ AN-UM-2011/062 vom 30.06.2011
- /10/ BKW Aktennotiz „Deterministischer Nachweis der Beherrschung der Kombination von Erdbeben und Hochwasser für das KKM“ AN-AM-2012/058 vom 29.03.2012
- /11/ BKW Brief „Stellungnahme zur Forderung 3.1-1 der Verfügung vom 1. April 2011 Ihr Zeichen SGE/FLP - 11/11/003“ BR-AM-2011/440, A. Bruder / MASYL vom 27. November 2011
- /12/ BKW Brief „Stellungnahme zur Forderung 3.1-1 der Verfügung vom 1. April 2011 Ihr Zeichen SGE/FLP - 11/11/003“ BR-AM-2011/453, A. Bruder/A. Kamber vom 8. Dezember 2011
- /13/ BKW Aktennotiz „Erdbebenfestigkeitsnachweise (Fragilities) für die Beherrschung des 10 000-jährlichen Erdbebens im KKM“ AN-AM-2011/129, Rev. a vom 08.12.2011
- /14/ KKM Aktennotiz „Brennelementbecken Nachbespeisung, System 319, Installation von zwei Zuführungsleitungen zur externen Bespeisung des BEB, Hierarchiestufe H1,“ AN-MM-2011/055 vom 27. Juni 2011
- /15/ BKW Aktennotiz „Bericht zur Verfügung des ENSI vom 5. Mai 2011: Überprüfung der Auslegung der Brennelementlagerbecken, -gebäude und -kühlsysteme“ AN-NT-2012/055 vom 28.03.2012
- /16/ BKW, Berechnungen zu AN-NT-2012/055, AN-NT-2012/059, 29. März 2012
- /17/ BKW Aktennotiz „Ergänzende Angaben zu unserer Stellungnahme zur Forderung 3.1 aus der Verfügung vom 1. April 2011 betreffend Folgedosen aus radioaktiven Abgabenaus dem Brennelementbecken“ AN-CH-2012/081 vom 14. Juni 2012
- /18/ BKW Aktennotiz „Bericht zur Verfügung des ENSI vom 18. März 2011“ AN-UM-2011/025 vom 30. März 2011
- /19/ BKW Aktennotiz “Critical internal flooding heights for location RG-11.0.00“ AN-STAB-2011/026, vom 4. April 2011
- /20/ BKW „Deterministische Sicherheitsstatusanalyse DSSA, Bericht 8 der Periodischen Sicherheitsüberprüfung des KKM PSÜ2010“. Oktober 2010

- /21/ Stucky AG „Wasserkraftwerk Mühleberg, Überprüfung der Erdbebensicherheit, Stabilitätsnachweis“ Bericht Nr. CSE/TM/JO 5092/4001, vom 31 Januar 2012.
- /22/ Stucky AG „Wasserkraftwerk Mühleberg, Überprüfung der Erdbebensicherheit, Bericht Nr. CSE/TM/JO 5092/4003, März 2012.
- /23/ GEOTEST AG Bericht „Geologisch-geotechnische Untersuchungen 2011“, Bericht Nr. 1511096.1. (2012)
- /24/ AMEC “Evaluation of the Strength of the Foundation Materials at Wasserkraftwerk Mühleberg“ Project No. 0140660000.00012. (2012)
- /25/ BKW FMB Energie AG Bern, Engineering Kraftwerke „WKW Mühleberg / Stauanlage Mühleberg Überwachung Talsperre, Protokoll Jahreskontrolle 2011“ (2012).
- /26/ Lombardi AG, „Erdbebensicherheitsnachweis, Bogenstaumauer Schiffenen,“ Berechnungsbericht Nr. 7009.R-3-03A, März 2012.
- /27/ Lombardi AG, „Erdbebensicherheitsnachweis, Bogenstaumauer Rossens,“ Berechnungsbericht Nr. 7009.R-3-02A, März 2012.
- /28/ John A. Blume & Associates, Engineers “Recommended Earthquake Criteria, Muehleberg Nuclear Power Plant, prepared for General Electric Company“ San Francisco, CA, 1967.
- /29/ de Rossi, M.S. “Programma dell'osservatorio ed archivio centrale geodinamico presso il R. Comitato Geologico d'Italia“ Bultettino del Vulcanismo Italiano, 10, 3-128, 1983
- /30/ Medvedev, S., Sponheuer, W. and Karnik, V., „Neue seismische Skala Intensity scale of earthquakes“. 7. Tagung der Europäischen Seismologischen Kommission vom 24.9. bis 30.9.1962. In: Jena, Veröff. Institut für Bodendynamik und Erdbebenforschung in Jena, Deutsche Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 77, 69-76, 1964
- /31/ Bernische Kraftwerke AG „Kernkraftwerk Mühleberg, Sicherheitsbericht 1989“, Ausgabe 31. August 1990
- /32/ Emch+Berger “Seismic Analysis of Reactor Building” Document No. 91.07.31-1, Revision 0, Bern, Switzerland, 1991.
- /33/ Emch+Berger “Dynamic Earthquake Analysis of Turbine Building“ Report No. 174.233.8, Bern, Switzerland, 1979.
- /34/ Emch+Berger “Dynamic Earthquake Analysis of Control Building, Floor Response Spectra Generation“ Bern, Switzerland, 1980.
- /35/ Nagra “Probabilistic seismic hazard analysis for Swiss nuclear power plant sites. Final Report, Unterausschuss Kernenergie der Überlandwerke (UAK), Juli 2004.
- /36/ Hauptabteilung der Sicherheit der Kernanlagen HSK „Neubestimmung der Erdbebengefährdung an den Kernkraftwerkstandorten in der Schweiz (Projekt PEGASOS)“ HSK-AN-6252, Würenlingen, Juni 2007.
- /37/ Swissnuclear (2011) “Intermediate Seismic Hazard (May 2011) - Evaluation of an Intermediate Seismic Hazard for the Existing Swiss Nuclear Power Plants“ Technical Report FGK- 11-039.GS, Rev. 1, vom 27.06.2011.
- /38/ Interoil E&P Switzerland AG (2011) “Intermediate Soil Hazard Results for Mühleberg – July 2011“ Technical report: IO11-TA0389, Rev. 1.
- /39/ BKW, Bericht zur Verfügung des ENSI vom 18. März 2011, AN-UM-cci vom 30.03.2011.
- /40/ BKW, Kernkraftwerk Mühleberg „Langzeitbetrieb, Grobprüfung der Unterlagen Stellungnahme zu der Nachforderung 5-1,“ AN-STAB-2011/094 vom 26.08.2011.
- /41/ BKW Aktennotiz „Stellungnahme zur seismischen Robustheit der Abschaltfunktion,“ AN-UM-2012/004 vom 31.01.2012
- /42/ KKM „KKM Sicherheitsbericht 2010. Bericht 1 der Periodischen Sicherheitsüberprüfung des KKM PSÜ2010“ Dezember 2010.
- /43/ NEDC-24989A Revision 1 "System Design Analysis for KKM SUSAN Project" December 1982; Supplement 1, "System Design Analysis for KKM SUSAN Project - Supplemental

Analysis to Address Power Uprating Program" October 1988; Supplement 2, "System Design Analysis for KKM SUSAN Project Supplemental Report to Address Postulated Events with Loss of Coolant to the Turbine Building" February 1992.

- /44/ BKW FMB Energie AG, Kemkraftwerk Mühleberg, Mühleberg Safety Analysis – MUSA 2010, Probabilistic Safety Assessment Level 1, Revision 3, Mühleberg, 2010
- /45/ Simpson Gumpertz & Heger, "Seismic Walkdown of the Mühleberg Nuclear Power Plant" Report No. 088074-R-01 Revision 3, vom April 2012.
- /46/ BKW FMB Energie AG, Kernkraftwerk Mühleberg, SUSAN: Ermittlung der Entladezeit der Batterien im Anforderungsfall, HWE 09/2002, Revision 1.
- /47/ BKW „Berechnung der Strahlenexposition in der Umgebung des KKM nach Auslegungsstörfällen,“ AN-SU-2010/028 Rev. b.
- /48/ BKW „Berechnung der Strahlenexposition in der Umgebung des KKMs nach Auslegungsstörfällen, Teil 2.“ AN-SU-2010/064 Rev. b
- /49/ BKW „Technische Spezifikation. 3. Auflage“ vom 05.06.1997
- /50/ Bernische Kraftwerke AG, Atomkraftwerk Mühleberg, Definitiver Sicherheitsbericht 1976.
- /51/ BKW „Berechnung von Folgedosen aus externen Überflutungsszenarien,“ AN-SU-2011/053 Rev. a, 12.12.2011.
- /52/ BKW „Folgedosis in der Umgebung des KKMs bei Freisetzung von 1 Mg Frischdampf unter Störfallbedingungen,“ AN-SU-2011/045 Rev. a, 6.3.2012.
- /53/ Bericht KKM, EU-Stress Test Kernkraftwerk Mühleberg, Oktober 2011, AN-BM-2011/121
- /54/ Simpson Gumpertz & Heger Inc., Seismic Fragility Evaluation of Scram Solenoid Valves 03V53 & 03V54, Calculation No. 088074-CA-18, Revision 0, Newport Beach, In: Appendix S.5 Seismic Fragility Evaluation of the Mühleberg Nuclear Power Plant Structures, Kapitel 9, Mühleberg PSÜ 2010.
- /55/ Simpson Gumpertz & Heger Inc., Seismic Fragility Evaluation of the SUSAN Building Cable Trays at the Transition between the SUSAN and Reactor Buildings, Calculation No. 088074- CA-20, Revision 1, Newport Beach, In: Appendix S.5 Seismic Fragility Evaluation of the Mühleberg Nuclear Power Plant Structures, Kapitel 9, Mühleberg PSÜ 2010.
- /56/ Simpson Gumpertz & Heger Inc., Seismic Fragility Evaluation of the Stack, Calculation No. 088074-CA-28, Revision 1, Newport Beach, In: Appendix S.5 Seismic Fragility Evaluation of the Mühleberg Nuclear Power Plant Structures, Kapitel 9, Mühleberg PSÜ 2010
- /57/ Simpson Gumpertz & Heger Inc., Seismic Fragility Evaluation of SUSAN Building Water Resistance, Calculation No. 088074-CA-29, Revision 1, Newport Beach, In: Appendix S.5 Seismic Fragility Evaluation of the Mühleberg Nuclear Power Plant Structures, Kapitel 9, Mühleberg PSÜ 2010.
- /58/ Simpson Gumpertz & Heger Inc., Seismic Fragility Evaluation of the Control Rod Drive Catwalk Frame, Calculation No. 088074-CA-32, Revision 0, Newport Beach, In: Appendix S.5 Seismic Fragility Evaluation of the Mühleberg Nuclear Power Plant Structures, Kapitel 9, Mühleberg PSÜ 2010.
- /59/ Simpson Gumpertz & Heger Inc., Updated Seismic Fragility Evaluation of the SUSAN Cooling Water System Pumps, Calculation No. 088074-CA-53, Revision 0, Newport Beach, In: Appendix S.5 Seismic Fragility Evaluation of the Mühleberg Nuclear Power Plant Structures, Kapitel 9, Mühleberg PSÜ 2010.
- /60/ Simpson Gumpertz & Heger Inc., Updated Seismic Fragility Evaluation of the Reactor Core Isolation Cooling Pumps, Calculation No. 088074-CA-56, Revision 0, Newport Beach, In: Appendix S.5 Seismic Fragility Evaluation of the Mühleberg Nuclear Power Plant Structures, Kapitel 9, Mühleberg PSÜ 2010.
- /61/ Simpson Gumpertz & Heger Inc., Updated Seismic Fragility Evaluation of the SUSAN Diesel Fuel and Day Tanks, Calculation No. 088074-CA-61, Revision 1, Newport Beach,

- In: Appendix S.5 Seismic Fragility Evaluation of the Mühleberg Nuclear Power Plant Structures, Kapitel 9, Mühleberg PSÜ 2010.
- /62/ Simpson Gumpertz & Heger Inc., Updated Seismic Fragility Evaluation of the SUSAN Intermediate Cooling Water System Pumps, Calculation No. 088074-CA-62, Revision 0, Newport Beach, In: Appendix S.5 Seismic Fragility Evaluation of the Mühleberg Nuclear Power Plant Structures, Kapitel 9, Mühleberg PSÜ 2010.
- /63/ Simpson Gumpertz & Heger Inc., Updated Seismic Fragility Evaluation of the Alternate Low- Pressure System Pumps, Calculation No. 088074-CA-67, Revision 0, Newport Beach, In: Appendix S.5 Seismic Fragility Evaluation of the Mühleberg Nuclear Power Plant Structures, Kapitel 9, Mühleberg PSÜ 2010.
- /64/ Simpson Gumpertz & Heger Inc., Seismic Fragility Evaluation of Battery Set 1T012, Calculation No. 088074-CA-78, Revision 0, Newport Beach, In: Appendix S.5 Seismic Fragility Evaluation of the Mühleberg Nuclear Power Plant Structures, Kapitel 9, Mühleberg PSÜ 2010.
- /65/ Simpson Gumpertz & Heger Inc., Seismic Fragility Evaluation of Battery Charger Groups 1, 2, and 3 and Selected Inverters, Calculation No. 088074-CA-79, Revision 1, Newport Beach, In: Appendix S.5 Seismic Fragility Evaluation of the Mühleberg Nuclear Power Plant Structures, Kapitel 9, Mühleberg PSÜ 2010.
- /66/ Simpson Gumpertz & Heger Inc., Seismic Fragility Evaluation of Distribution Panel Group 2 and AC Bus Group 4, Calculation No. 088074-CA-81, Revision 1, Newport Beach, In: Appendix S.5 Seismic Fragility Evaluation of the Mühleberg Nuclear Power Plant Structures, Kapitel 9, Mühleberg PSÜ 2010.
- /67/ Simpson Gumpertz & Heger Inc., Seismic Fragility Evaluation of the Torus Cooling System Heat Exchanger 110A002, Calculation No. 088074-CA-91, Revision 0, Newport Beach.
- /68/ Simpson Gumpertz & Heger Inc., Seismic Fragility Evaluation of Torus Cooling System Pumps 110A001A and 210A001B, Calculation No. 088074-CA-92, Revision 0, Newport Beach.
- /69/ Simpson Gumpertz & Heger Inc., Seismic Fragility Evaluation of SUSAN Intermediate Cooling Water System Heat Exchanger 150A011, Calculation No. 088074-CA-96, Revision 0, Newport Beach
- /70/ Simpson Gumpertz & Heger Inc., Seismic Fragility Evaluation of SUSAN Ventilators, Calculation No. 088074-CA-112, Revision 1, Newport Beach.
- /71/ Simpson Gumpertz & Heger Inc., Seismic Fragility Evaluation of the Reactor Building and Reactor Vessel Support Anchorage, Calculation No. 088074-CA-118, Revision 0, Newport Beach.
- /72/ Simpson Gumpertz & Heger Inc., Seismic Fragility Evaluation of the Suppression Chamber, Calculation No. 088074-CA-119, Revision 1, Newport Beach.
- /73/ Simpson Gumpertz & Heger Inc., Seismic Fragility Evaluation of the SUSAN Building, Calculation No. 088074-CA-120, Revision 0, Newport Beach.
- /74/ Simpson Gumpertz & Heger Inc., Seismic Fragility Evaluation of the Reactor Vessel Internals, Calculation No. 088074-CA-123, Revision 0, Newport Beach.
- /75/ Simpson Gumpertz & Heger Inc., Seismic Fragility Evaluation of SUSAN Diesel Generators 190A 0001A and 290A 0001B, Calculation No. 088074-CA-126, Revision 0, Newport Beach.
- /76/ Simpson Gumpertz & Heger Inc., Seismic Fragility Evaluation of Panels ISTI3, 1ST33 to 1ST36, 1ST38, 1ST39, 2ST13, 2ST33 to 2ST36, 2ST38, and 2ST39, Calculation No. 088074- CA-128, Revision 0, Newport Beach.
- /77/ Simpson Gumpertz & Heger Inc., Development of Screening-Based Seismic Fragilities, Calculation No. 088074-CA-131, Revision 1, Newport Beach.
- /78/ Simpson Gumpertz & Heger Inc., Seismic Fragility Evaluation of the Reactor Building Internal Structure by Nonlinear Analysis, Calculation No. 088074-CA-130, Revision 0, Newport Beach.



- /79/ Simpson Gumpertz & Heger Inc., Seismic Response Analysis of the Suppression Chamber, Calculation No. 088074-CA-127, Revision 0, Newport Beach.
- /80/ Simpson Gumpertz & Heger Inc., Seismic Fragility Evaluation For Control Rod Insertion, Calculation No. 088074-CA-132, Revision 0, Newport Beach.
- /81/ /Simpson Gumpertz & Heger Inc., Updated Seismic Fragility Evaluation of SUSAN Scram Solenoid Valves 103V400A, 203V400B, 103V401A, and 203V401B, Calculation No. 088074-CA-63, Revision 0, Newport Beach.
- /82/ Simpson Gumpertz & Heger Inc., Seismic Fragility Evaluation of Bounding Case Valves for the Core Spray System, Alternate Low Pressure System and Shutdown Torus Cooling System, Calculation No. 088074-CA-138, Revision 0, Newport Beach.
- /83/ Simpson Gumpertz & Heger Inc., Seismic Evaluation of the Cooling Water Intake and Discharge Structures, Calculation No. Q88074-CA-40, Revision 0, Newport Beach.
- /84/ Simpson Gumpertz & Heger Inc., Seismic Fragility Evaluation of the Reactor Building Fuel Pool, Calculation No. 088074-CA-108, Revision 0, Newport Beach.
- /85/ Simpson Gumpertz & Heger Inc., Seismic Fragility Evaluation of Fuel Pool Dam, Calculation No. 088074-CA-109, Revision 0, Newport Beach. 28. März 2011
- /86/ Simpson Gumpertz & Heger Inc., Seismic Fragility Evaluation of the Reactor Cavity Bellows Seals, Calculation No. 088074-CA-111, Revision 0, Newport Beach.
- /87/ Simpson Gumpertz & Heger Inc., Development of Seismic Fragilities for the Interim PEGASOS Revision Project Uniform Hazard Spectra at Elevation (-)14 m, Calculation No. 088074-CA-141, Revision 0, Newport Beach.
- /88/ Simpson, Gumpertz & Heger (2011). „Development of Earthquake Acceleration Time Histories Compatible with the Interim PEGASOS Revision Project Uniform Hazard Spectra for the Rossens and Schiffenen Dams“, Technical Report 088074-CA-134.
- /89/ Simpson, Gumpertz & Heger (2011) Development of Earthquake Acceleration Time Histories Compatible with the Interim PEGASOS Revision Project Uniform Hazard Spectra for Deterministic Seismic Evaluation of the Mühleberg Dam, Technical Report 088074-CA-133
- /90/ Simpson, Gumpertz & Heger Inc., Seismic Fragility Evaluation of the Mühleberg Nuclear Power Plant, Technical Report 088074-R-03
- /91/ Simpson, Gumpertz & Heger Inc., Seismic Fragility Evaluation of the Reactor Building Dome, Calculation No 088074-CA143, Revision 0, Newport Beach
- /92/ Simpson Gumpertz & Heger Inc., Probabilistic Seismic Response Analysis of the SUSAN Building, Calculation No. 088074-CA-05, Newport Beach, California, 2009.
- /93/ Simpson, Gumpertz & Heger Inc., Seismic Walkdown of the Mühleberg Nuclear Power Plant, Technical Report 088074-R-01, Revision 3
- /94/ ARES Corporation, Seismic Fragility Evaluation of the Mühleberg Nuclear Power Plant, CS and ALPS Piping with Heavy Valves in Reactor Building, Calculation No. 0846301.01-S004, Revision 1, Santa Ana, In: Appendix S.5 Seismic Fragility Evaluation of the Mühleberg Nuclear Power Plant Structures, Kapitel 9, Mühleberg PSÜ 2010.
- /95/ ARES Corporation, Seismic Fragility Evaluation of the Mühleberg Nuclear Power Plant, SUSAN Building ICWS Vertical Riser, Calculation No. 0846301.01-S002, Revision 1, Santa Ana, In: Appendix S.5 Seismic Fragility Evaluation of the Mühleberg Nuclear Power Plant Structures, Kapitel 9, Mühleberg PSÜ 2010.
- /96/ ARES Corporation, Seismic Fragility Evaluation of the Mühleberg Nuclear Power Plant, SUSAN Building CWS Piping in Interface Area Between SUSAN and Reactor Buildings, Calculation No. 0846301.01-S001, Revision 1, Santa Ana, In: Appendix S.5 Seismic Fragility Evaluation of the Mühleberg Nuclear Power Plant Structures, Kapitel 9, Mühleberg PSÜ 2010.
- /97/ CCI AG „Berechnung der Leitungen des Brennelementbecken-Kühlkreislaufs (Zulauf, Pumpendruckseite)“ Berechnungsbericht 3 SA-024.386, Revision 0, Mai 2011



- /98/ CCI AG „Berechnung der Externen BEB-Kühlleitung,“ Berechnungsbericht 3 SA-024.389, 4. August 2011
- /99/ NAGRA „Probabilistische Erdbeben-Gefährdungs-Analyse für die KKW Standorte in der Schweiz (PEGASOS Projekt)“ 2004
- /100/ Simpson Gumpertz & Heger Inc., Seismic Response Analysis of Mühleberg Nuclear Power Plant Structures, Report No. 088074-R-02, Revision 1, 13 July 2010, Newport Beach
- /101/ Simpson Gumpertz & Heger Inc., Development of the Reactor Building Structure Model, Calculation No. 088074-CA-06, Revision 0, 31 December 2008, Newport Beach
- /102/ AMEC Geomatrix, Revised Geotechnical Evaluation PSA KKW Mühleberg, Project 14066.000, 24. September 2009
- /103/ BKW/Emch+Berger, KKW Mühleberg, Seismische Nachrechnung des Reaktorgebäudes, Dok. Nr. 91.10.10-1, Rev.1, 18.11.1991; Dok. Nr. 91.10.10-2.1 und -2.2, Rev.0, 10.10.1991
- /104/ AREVA-Bericht “Behaviour of an ATRIUM 10XM Fuel Assembly during Operational Transients and Accidental Events”; A1C-1333318-0 vom 20.07.2007
- /105/ ENSI „Verfügung: Massnahmen aufgrund der Ereignisse in Fukushima,“ FLP/SAN - 11/11/003 vom 18. März.2011
- /106/ ENSI Brief „Verfügung: Vorgehensvorgaben zur Überprüfung der Auslegung bezüglich Erdbeben und Überflutung“ SGE/FLP -11/11/003 vom 1. April 2011
- /107/ ENSI „Verfügung: Stellungnahme zu Ihrem Bericht vom 31. März 2011,“ FLP-11/11/003 vom 5. Mai.2011
- /108/ ENSI „Nachforderungen zu den aktualisierten Erdbeben-Grenztragfähigkeitsnachweisen (Fragilities) des KKM, ENSI Geschäft Nr. 11/11/035,“ BUU/THK/SAS vom 19.03.2012
- /109/ ENSI Aktennotiz „Ergebnisse der Grobprüfung der Unterlagen zur PSÜ KKM 2010,, 11/1453 vom 8. August 2011
- /110/ ENSI, „Verfügung: Stellungnahme zu Ihrem Bericht zum EU-Stressstest,, SGE – 10KEX.STRESSTEST vom 10. Januar 2012
- /111/ ENSI Brief „Unsere Verfügung vom 10. Januar 2012,, SGE/GUJ-11KEX.STRESSTEST, vom 24.1.2012
- /112/ ENSI Brief „Kernkraftwerk Mühleberg Ankündigung einer Inspektion zum deterministischen Nachweis des 10'000-jährlichen Erdbebens,, EST/BUU/NEP-11/11/035 vom 11. Mai 2912
- /113/ ENSI Fachgespräch und Inspektion zum deterministischen Erdbeben nachweis (SSE) vom 25.05.2012
- /114/ Basler & Hofmann AG „KKW Mühleberg, MUSA2010, Teil Erdbeben-PSA, Prüfbericht,, Aktennotiz AN 3210.151-01, 13. Mai 2011
- /115/ Basler & Hofmann AG. „Zusammenstellung der aktuellen Erdbeben-Etagenspektren der schweizerischen Kernkraftwerke,, Aktennotiz AN3210.500-7, 30. September 2009
- /116/ BFE Brief „Überprüfung der Erdbebensicherheit der Stauanlagen Mühleberg Stellungnahme des BFE zum Nachweis der Stabilität unter Erdbebeneinwirkung“ 6.2 Wohlensee, vom 27. Februar 2012
- /117/ BFE Brief, „Überprüfung der Erdbebensicherheit der Stauanlagen Mühleberg, Schiffenen und Rossens Stellungnahmen des BFE zu den Erdbebensicherheitsnachweisen“ 6.2 Wohlensee, vom 26. Juni 2012
- /118/ BFE Bericht „Überprüfung der Erdbebensicherheit des Wasserkraftwerks Mühleberg, Stellungnahme des BFE zum Nachweis der Stabilität unter Erdbebeneinwirkung (Bericht Stucky AG vom 31. Januar 2012)“ vom 27. Februar 2012
- /119/ BFE Bericht „Überprüfung der Erdbebensicherheit des Wasserkraftwerks Mühleberg, Stellungnahme des BFE zum Erdbebensicherheitsnachweis (Bericht Stucky AG vom 4. Mai 2012) vom 26. Juni 2012

- /120/ BFE Bericht „Überprüfung der Erdbebensicherheit der Stauanlage Schiffenen, Stellungnahme des BFE zum Erdbebensicherheitsnachweis (Bericht Lombardi SA 7009.3-R-03A vom März 2012) vom 26. Juni 2012
- /121/ BFE Bericht „Überprüfung der Erdbebensicherheit der Stauanlage Rossens, Stellungnahme des BFE zum Erdbebensicherheitsnachweis (Bericht Lombardi SA 7009.3-R-02A vom März 2012) vom 26. Juni 2012
- /122/ SR 732.114.5 „Verordnung des UVEK vom 16. April 2008 über die Methodik und die Randbedingungen zur Überprüfung der Kriterien für die vorläufige Ausserbetriebnahme von Kernkraftwerken,“ Das Eidgenössische Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK)
- /123/ SR 732.112.2 „Verordnung des UVEK über die Gefährdungsannahmen und die Bewertung des Schutzes gegen Störfälle in Kernanlagen vom 17. Juni 2009“ (Stand am 1. August 2009)
- /124/ SR 814.501 „Strahlenschutzverordnung (StSV) vom 22. Juni 1994“ (Stand am 1. Januar 2008)
- /125/ SR 732.11 „Kernenergieverordnung (KEV) vom 10. Dezember 2004“ (Stand am 1. Mai 2012)
- /126/ SR 721.102 „Verordnung über die Sicherheit der Stauanlagen vom 7. Dezember 1998“ (Stauanlagenverordnung, StAV)
- /127/ IAEA Safety Standard “Evaluation of Seismic Safety for Existing Nuclear Installations“ Safety Guide No. NS-G-2.13
- /128/ Richtlinie ENSI-A01 „Anforderungen an die deterministische Störfallanalyse für Kernanlagen: Umfang, Methodik und Randbedingungen der technischen Störfallanalyse,“ Ausgabe Juli 2009
- /129/ Richtlinie ENSI-A05 „Probabilistische Sicherheitsanalyse (PSA): Qualität und Umfang,“ Ausgabe Januar 200
- /130/ Richtlinie ENSI-A08 „Quelltermanalyse: Umfang, Methodik und Randbedingungen,“ Ausgabe Februar 2010
- /131/ Richtlinie ENSI G14; Berechnung der Strahlenexposition in der Umgebung aufgrund von Emissionen radioaktiver Stoffe aus Kernanlagen, Ausgabe Februar 2008, Revision 1 vom 21. Dezember 2009
- /132/ HSK Richtlinie HSK-R-48/d, November 2001
- /133/ ENSI „Periodische Sicherheitsüberprüfung von Kernkraftwerken,“ ENSI R-048.
- /134/ EPRI “A Methodology for Assessment of Nuclear Power Plant Seismic Margin” EPRI NP-6041-SL, Revision 1, August 1991
- /135/ EPRI “Methodology for Developing Seismic Fragilities” TR-103959, June 1994
- /136/ EPRI “Seismic Fragility Application Guide. EPRI TR-1002988“ December 2002.
- /137/ Senior Seismic Hazard Analysis Committee “Recommendations for probabilistic seismic hazard analysis: Guidance on uncertainty and use of experts” NUREG/CR-6372, U.S. Nuclear Regulatory Commission, April 1997.
- /138/ NUREG-1433 Vol 2, Rev. 3.0 “Standard Technical Specifications General Electric Plants, BWR/4.”
- /139/ BWG „Sicherheit der Stauanlagen - Basisdokument zur konstruktiven Sicherheit,“ Berichte des BWG, Serie Wasser, Version 1.0, August 2002.
- /140/ BWG “Sicherheit der Stauanlagen - Richtlinien des BWG,“ Berichte des BWG, Serie Wasser, Version 1.1, November 2002.
- /141/ BWG „Sicherheit der Stauanlagen - Basisdokument zu dem Nachweis der Erdbebensicherheit,“ Berichte des BWG, Serie Wasser, Version 1.2, März 2003.

- /142/ HSK „Erdbebenrisikokarten der Schweiz“ Basler & Hofmann, Schweizer Erdbebendienst, September, 1977
- /143/ HSK „Erdbeben-Risiko am Standort des Kernkraftwerkes Mühleberg“ Basler & Hofmann Aktennotiz AN 777-11, 2. November, 1978.
- /144/ HSK „Erdbeben-Bemessungsspektren für Schweizerische Kernanlagen, Basler & Hofmann, SB 1244, Rev. 2, April 1984
- /145/ American Society of Mechanical Engineers “ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III”
- /146/ KTA „Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen,, Teil 1: Grundsätze, KTA 2201.1, Fassung 2011-11
Teil 2: Baugrund, KTA 2201.2, Fassung 06/90
Teil 3: Auslegung der baulichen Anlagen, KTA 2201.3, Fassung Juni 1990, Entwurf
Teil 4: Anforderungen an Verfahren zum Nachweis der Erdbebensicherheit für maschinen- und elekrotechnische Anlagenteile. KTA2201.4, Fassung 06/90
- /147/ IEEE “IEEE Recommended Practice for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations“ IEEE 344-2004 vom 13. Juni 2005