Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI

Aktennotiz

Datum: 03.03.2014 Seiten: 25 Anhänge: - Beilagen: -
Verteiler intern: KASI, [redacted], KOMM
Verteiler extern: KKB, KKG, KKL, KKM
Sachbearbeiter: [redacted]
Visum
Visum Vorgesetzte

Klassifizierung keine
Aktenzeichen 10KEX.APFUKU1 - 10/12/012
Referenz ENSI-AN-8567
Schlagwörter Deterministische Erdbebennachweise für Kernkraftwerke, Störfallkategorie 3, Störfallkategorie 2

435

Methodik deterministischer Nachweise der Schweizer Kernkraftwerke für Erdbeben der Störfallkategorien 2 und 3

Inhalt

1 Einleitung 3

2 Seismische Auswirkungen 4

2.1 Bodenerschütterungen 4

2.2 Weitere Auswirkungen 4

2.2.1 Weitere geologische Auswirkungen 4

2.2.2 Externe Überflutung 6

3 Betrachtungsumfang der Strukturen, Systeme und Komponenten 7

3.1 Strukturen, Systeme und Komponenten für die technische Störfallanalyse 7

3.2 Strukturen, Systeme und Komponenten für die radiologische Störfallanalyse 7

4 Bestimmung der seismisch bedingten Auswirkungen auf die Strukturen, Systeme und Komponenten 8

4.1 Auswirkungen aus Bodenerschütterungen 8

4.1.1 Bauwerksstrukturen 8

4.1.2 Systeme und Komponenten 10

4.2 Weitere Auswirkungen 10

4.2.1 Weitere geologische Auswirkungen 10

4.2.2 Externe Überflutung 11

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat
Industriestrasse 19, 5200 Brugg
Tel. +4156 460 8400, Fax +4156 460 8499
www.ensi.ch

4.2.3 Besondere indirekte Auswirkungen innerhalb der Anlage auf die Strukturen, Systeme und Komponenten 11

5 Nachweis der ausreichenden Erdbebenkapazitäten der Strukturen, Systeme und Komponenten 12

5.1 Bauwerksstrukturen 13
5.1.1 Grundlagen 13
5.1.2 Konzept der Grenzzustände 13
5.1.3 Nachweis der Tragsicherheit 13
5.1.4 Tragsicherheitsnachweis bei nichtlinearen Verfahren 14
5.1.5 Tragsicherheitsnachweis der Verankerungen der Komponenten 14
5.1.6 Materialfestigkeiten 14
5.1.7 Nachweis der Gebrauchs- resp. Funktionstauglichkeit 14
5.1.8 Nicht-klassisch deterministische Nachweismethoden 15
5.1.9 Bestimmung des Schadensbildes 15

5.2 Mechanische Ausrüstungen 15

5.3 Elektrische Ausrüstungen 16

5.4 Reaktorkern, Brennelemente und Steuerelemente 16

5.5 Bestimmung des HCLPF 17
5.5.1 Definition des HCLPF 17
5.5.2 Ausreichender HCLPF-Wert 17
5.5.3 Methoden zur Bestimmung des HCLPF 17

6 Technische und radiologische Störfallanalysen 18

6.1 Technische Störfallanalyse 19
6.1.1 Allgemeine Vorgehensweise 19
6.1.2 Vorgaben 19
6.1.3 Analyse der Integrität des Primärcontainments 20

6.2 Radiologische Störfallanalyse 20
6.2.1 Bestimmung des Quellterms 20
6.2.2 Dosisberechnung 21

7 Qualität der Dokumentation 21

8 Begriffsbestimmungen 22

9 Richtlinien, Leitfäden, Literatur 23

1 Einleitung

In diesem Dokument werden die methodischen Anforderungen an den deterministischen Nachweis des ausreichenden Schutzes gegen den Störfall Erdbeben für die bestehenden Schweizer Kernkraftwerke beschrieben. Diese Anforderungen konkretisieren die Verordnung des UVEK über die Gefährdungsannahmen und die Bewertung des Schutzes gegen Störfälle in Kernanlagen (SR 732.112.2) /1/ – im Folgenden als „Gefährdungsannahmenverordnung" bezeichnet – in Bezug auf Erdbeben. Für den Nachweis des ausreichenden Schutzes gegen durch Erdbeben ausgelöste Störfälle hat der Bewilligungsinhaber die Gefährdung mit einer Häufigkeit grösser gleich 10^{-4} pro Jahr zu berücksichtigen. Ferner sind für den Störfall Erdbeben mindestens die folgenden Auswirkungen zu berücksichtigen: Bodenerschütterungen, Bodensetzungen, Erdrutsche, Zerstörung in der Nähe befindlicher Anlagen, welche die Sicherheit der Kernanlage gefährden können, sowie Verlust von nicht erdbebenfesten Systemen, Brand und Überflutung (siehe Art. 5 der „Gefährdungsannahmenverordnung").

Für den ausreichenden Schutz ist die Einhaltung der grundlegenden Schutzziele zur Gewährleistung der nuklearen Sicherheit nach Art. 1 Bst. d der „Gefährdungsannahmenverordnung" nachzuweisen:

1. die Kontrolle der Reaktivität,
2. die Kühlung der Kernmaterialien und der radioaktiven Abfälle,
3. der Einschluss der radioaktiven Stoffe,
4. die Begrenzung der Strahlenexposition.

Der Nachweis ist als Teil der deterministischen Sicherheitsstatusanalyse im Rahmen der PSÜ entsprechend Art. 34 der Kernenergieverordnung KEV (SR 732.11) /2/ und bei neuen oder geänderten Gefährdungsannahmen entsprechend Art. 13 der „Gefährdungsannahmenverordnung" zu aktualisieren und die Auswirkungen auf die Sicherheit der Anlage und insbesondere auf das Risiko sind zu bewerten.

Zum Nachweis der ausreichenden Vorsorge ist die Beherrschung der Nachweiserdbeben der Störfallkategorien 3 (NESK3) und 2 (NESK2) zu zeigen, siehe Tabelle 1.1.

Bezeichnung	Überschreitungshäufigkeit [pro Jahr]	Bodenerschütterung	Störfallkategorie [SR 732.112.2]
Nachweiserdbeben der Störfallkategorie 3 (NESK3)	10^{-4}	Aktuell gültige Resultate entsprechend Kap. 2 (Mean-Werte entsprechend der jährlichen Überschreitungshäufigkeit)	3
Nachweiserdbeben der Störfallkategorie 2 (NESK2)	10^{-3}	Aktuell gültige Resultate entsprechend Kap. 2 (Mean-Werte entsprechend der jährlichen Überschreitungshäufigkeit)	2

Tabelle 1.1: Nachweiserdbeben

Es sind die vom ENSI festgelegten aktuellen Gefährdungsannahmen zu verwenden, und es ist der aktuelle Zustand der Anlage zu berücksichtigen. Für die beiden Nachweiserdbeben gelten entsprechend ihrer Störfallkategorie (2 bzw. 3) gemäss „Gefährdungsannahmenverordnung" bzw. Strahlenschutzverordnung (StSV) unterschiedliche Nachweiskriterien: Entsprechend Art. 7 der „Gefährdungsannahmenverordnung" und Art. 94 Ziff. 4 bzw. 5 StSV ist nachzuweisen, dass die aus dem NESK2 resultierende Dosis für nichtberuflich strahlenexponierte Personen höchstens 1 mSv beträgt bzw. aus dem NESK3 resultierend höchstens 100 mSv. Zudem gelten für das NESK2 die zusätzlichen technischen Kriterien von Art. 10 der „Gefährdungsannahmenverordnung" bzw. für das NESK3 diejenigen von Art. 11.

Die Nachweiserdbeben werden über die seismischen Bodenerschütterungen definiert und führen neben den Erschütterungen zu weiteren seismischen Auswirkungen (Kap. 2). Aus den seismisch bedingten Auswirkungen (Kap. 4) auf die zu betrachtenden Strukturen, Systeme und Komponenten (Kap. 3) wird zusammen mit den jeweiligen Kapazitäten (Kap. 5) der Zustand der Anlage nach dem Erdbeben, einschliesslich aller betrieblichen Lager und Zwischenlager, bestimmt. Darauf stützt sich schliesslich die technische Bewertung des Störfallablaufes mit seinen allfälligen radiologischen Auswirkungen (Kap. 6). Vorgaben an die Qualität der Dokumentation finden sich in Kap. 7.

2 Seismische Auswirkungen

2.1 Bodenerschütterungen

Die seismische Bodenerschütterung ist definiert durch standortspezifische, für Freifeldbedingungen ermittelte Antwortspektren der Bodenbeschleunigung (Uniform Hazard Spectra, UHS). Die UHS sind für das geometrische Mittel der beiden Horizontalkomponenten und für die Vertikalkomponente der Bodenbeschleunigung sowie für die drei Referenzpunkte freie Geländeoberfläche, Fundamentniveau des Reaktorgebäudes und Referenzfels gegeben. Als Beschleunigungswerte gelten die Mittelwerte (Mean) der vom ENSI für den Nachweis als aktuell gültig erklärten Erdbebengefährdungsresultate.

2.2 Weitere Auswirkungen

2.2.1 Weitere geologische Auswirkungen

Es sind mindestens die folgenden zusätzlichen geologischen Auswirkungen standortspezifisch in die Nachweisführung zu integrieren:

2.2.1.1 Gravitative Massenbewegung (Stein- und Blockschlag, Fels- und Bergsturz, Rutschung)

a. Es sind aktuelle kantonale Gefahrenkarten zu berücksichtigen, Bereiche mit kritischen Hangneigungen auszuweisen, das Volumen potenziell mobilisierbarer Fest- und Lockergesteinsmassen abzuschätzen sowie mögliche Sturz-, Fliess- bzw. Kriechwege zu evaluieren.

b. Die Uferbereiche angrenzender Gewässer sind in die Nachweisführung bezüglich Massenbewegungen daraufhin mit einzubeziehen, inwieweit es durch schnelle gravitative Massenbewegungen in das Gewässer aufgrund der Massenverdrängung zu seismisch induzierten externen Überflutungen der Anlage kommen kann (Kap. 2.2.2).

2.2.1.2 Bodenverflüssigung

a. Es sind sämtliche Lockergesteinsmassen bis auf das Felsniveau zu berücksichtigen und deren Strukturempfindlichkeit gemäss geltenden Normen (z. B. KTA 2201.2 /3/, SIA 267 /4/, SIA 267/1 /5/) zu bestimmen.

2.2.1.3 Kompaktion/Setzung

a. Es sind sämtliche Lockergesteinsmassen bis auf das Felsniveau zu berücksichtigen und deren Kompaktions-/Setzungsverhalten gemäss geltender Normen (z. B. KTA 2201.2 /3/, SIA 267 /4/, SIA 267/1 /5/) zu bestimmen.

2.2.1.4 Bodenabsenkung

a. Es ist der Untergrund bezüglich natürlicher und künstlicher Hohlräume zu charakterisieren.

2.2.1.5 Nachweisführung

a. Die Nachweise zu den geologischen Auswirkungen „Gravitative Massenbewegung" und „Kompaktion/Setzung" können grundsätzlich auf zwei Arten geführt werden:

   Variante 1

   Für die Auswirkung ist nachzuweisen, dass diese nach dem Stand der Technik für das betrachtete Nachweiserdbeben deterministisch gemäss geltender Normen (z. B. KTA 2201.2 /3/, SIA 267 /4/, SIA 267/1 /5/ ausgeschlossen werden kann. Dazu ist deterministisch darzulegen, dass aufgrund der lokalen Fels-, Boden- und Baugrundeigenschaften im Anlagenbereich keine Gefahr besteht.

   Variante 2

   Wenn die Auswirkung nicht deterministisch ausgeschlossen werden kann, ist der deterministische Nachweis für die Beherrschung der Kombination der nicht ausgeschlossenen Auswirkungen zu führen. Dazu muss die entsprechende seismisch bedingte Auswirkung auf die Anlage aufgrund standortspezifischer Untersuchungen festgelegt werden (z. B. differentielle Setzung oder zusätzliche Auflast infolge Erdbewegungen).

b. Für die Auswirkungen „Bodenverflüssigung" und „Bodenabsenkung" ist nur der Nachweis gemäss Variante 1 (siehe oben) zulässig.

c. Die für Gefährdungsstudien und zu Nachweisführungen notwendige Untersuchung der Eigenschaften von Fels, Boden und Baugrund sowie die dazugehörigen Prüfverfahren sind entsprechend geltenden Normen (z. B. SIA 267 /4/ oder KTA 2201.2 /3/) auszuführen und zu dokumentieren. Die Dokumentation ist mit Kartenmaterial im Massstab von mindestens 1:5000 sowie sinnvoll gewählten geologischen Schnitten und Bodenprofilen zu vervollständigen.

2.2.2 Externe Überflutung

a. Der Nachweis der Beherrschung der Kombination von Erdbeben und einer daraus induzierten externen Überflutung kann auf zwei verschiedene Arten geführt werden:

Variante 1

Für alle in Anlagennähe befindlichen Stauanlagen, welche die Kernkraftwerke potenziell gefährden können, ist deterministisch nachzuweisen, dass bei einem Nachweiserdeben ein unkontrollierter Abfluss aufgrund des Versagens der Stauanlage ausgeschlossen werden kann. Der deterministische Erdbebennachweis ist gemäss der BWG-Richtlinie (heute Bundesamt für Energie) /6/ zur Sicherheit von Stauanlagen zu führen. In Abweichung von der BWG-Richtlinie sind die seismischen Gefährdungsannahmen entsprechend Kap. 2.1 zu verwenden.

Variante 2

Falls ein unkontrollierter Wasserabfluss aufgrund des Versagens der Stauanlage deterministisch nicht ausgeschlossen wird oder werden kann, ist der deterministische Nachweis für die Beherrschung der Kombination von Erdbeben und Versagen der in Anlagennähe befindlichen Stauanlagen zu führen. Dabei gelten neben den allgemeinen Randbedingungen aus Kap. 6 folgende Randbedingungen:

- Es ist das instantane, vollständige Versagen aller Teile einer Stauanlage, deren Integrität nicht nachgewiesen ist, zum ungünstigsten Zeitpunkt zu unterstellen. Kaskadenartige Brüche von Stauanlagen werden für diese deterministische Analyse nicht betrachtet.
- Es ist der Ausfall der von der Flutwelle betroffenen Kühlwasserfassungen zu unterstellen. Bei wasserbaulichen Einrichtungen ist die (n-1)-Regel anzuwenden, d. h. das leistungsfähigste Entlastungsorgan ist als ausgefallen anzunehmen.
- Es ist der Ausfall der Turbinierung von Wasserkraftwerken zu unterstellen.

b. Es gelten folgende Vorgaben:

- Die Nachweise der Stabilität von Uferbereichen im Zusammenhang mit dem Nachweis der seismisch induzierten Überflutung werden, gemäss der BWG-Richtlinie zur Sicherheit von Stauanlagen /6/ geführt.
- Für die Beurteilung der Überflutungssituation ist der Nahbereich des betrachteten Standorts mit Hilfe eines 2D-Überflutungsmodells zu analysieren. Weiter entfernte Flussabschnitte können mit Hilfe eines 1D-Modells abgebildet werden. Feststofftransport ist soweit möglich integriert, d. h. mit einem gekoppelt hydrodynamisch-morphologischen Überflutungsmodell unter Beachtung der Kornverteilung des Sohlmaterials, zu berücksichtigen. Der Umfang des Einbezugs von Feststofftransport ist zu begründen.
- Der Flutwelle aufgrund eines seismisch bedingten Versagens einer wasserbaulichen Einrichtung ist der für die Situation am Standort ungünstigere der beiden Abflüsse Qm (mittlerer Abfluss) und Q347 (Niedrigabfluss) zu überlagern.
- Als Ergebnisse der Flutwellenanalyse sind (im Nahbereich grafisch sowie an für den Standort kritischen Punkten in tabellarischer Form) die maximale Überflutungshöhe, maximale Fliessgeschwindigkeiten, maximale Schubspannungen sowie Feststoffanlandungen auszuweisen.
- Die Genauigkeit der Ergebnisse ist zu diskutieren.

3 Betrachtungsumfang der Strukturen, Systeme und Komponenten

a. Für alle Strukturen, Systeme und Komponenten (SSK), deren Funktion, Integrität oder Standfestigkeit in der technischen oder radiologischen Störfallanalyse (Kap. 6) vorausgesetzt werden, sind die entsprechenden Nachweise für die zu betrachtende Erdbebenbelastung (NESK3 und NESK2) zu führen.

3.1 Strukturen, Systeme und Komponenten für die technische Störfallanalyse

a. Zur Festlegung des Umfangs der SSK sind die folgenden Analyseschritte nachvollziehbar durchzuführen und zu dokumentieren:

- Die für den Nachweis der Störfallbeherrschung (Kap. 6) erforderlichen Sicherheitsfunktionen und Sicherheitssysteme, einschliesslich deren Hilfssysteme, sind zu identifizieren.
- Zu den identifizierten Funktionen und Systemen sind die zugehörigen, erforderlichen Strukturen und Komponenten zu ermitteln und auszuweisen.
- Die SSK, deren erdbebenbedingtes Versagen zu einer Beeinträchtigung der oben identifizierten SSK führen kann, sind zu ermitteln und auszuweisen. Hierzu gehören insbesondere Gebäude, Komponenten mit brennbaren Materialien, Lager von Gasen (z. B. Wasserstoff und Sauerstoff) sowie Behälter und Leitungssysteme, die Wasser oder andere Flüssigkeiten beinhalten.
- Die für den Erdbebennachweis erforderlichen Aufgaben der ermittelten SSK (Funktion, Integrität oder Standfestigkeit) sind zu bestimmen und auszuweisen.

3.2 Strukturen, Systeme und Komponenten für die radiologische Störfallanalyse

In den Betrachtungsumfang sind neben den aus der technischen Störfallanalyse zu betrachtenden SSK weitere SSK aufzunehmen und zu dokumentieren:

a. Alle klassierten SSK, die radioaktive Stoffe in einer Menge oberhalb eines der unten genannten Schwellenwerte enthalten oder enthalten können.

b. Alle SSK, deren erdbebenbedingtes Versagen zu einer Beschädigung der unter a. identifizierten SSK oder anderweitig zu Freisetzungen radioaktiver Stoffe aus SSK mit Inventaren oberhalb der Schwellenwerte führen kann.

Als Schwellenwerte sind jeweils die Aktivitätswerte für gesamt Iod von 10^6 Bq und für gesamt Cs von 10^7 Bq heranzuziehen.

4 Bestimmung der seismisch bedingten Auswirkungen auf die Strukturen, Systeme und Komponenten

4.1 Auswirkungen aus Bodenerschütterungen

4.1.1 Bauwerksstrukturen

a. Die Auswirkungen infolge Erdbeben sind mit gleichzeitig auftretenden Auswirkungen (Kap. 2) entsprechend dem Art. 4.4.3.5 der SIA 260 /7/ für aussergewöhnliche Bemessungssituationen zu überlagern. Mit Ausnahme der Erdbebeneinwirkungen sind die Einwirkungen nach der Norm SIA 261 /8/ zu bestimmen.

b. Ständig installierte Ausrüstungen sind als Auflast zu betrachten.

4.1.1.1 Modellbildung

a. Bei der Festlegung des Berechnungsmodells der Bauwerksstrukturen sind realistische Annahmen besonders in Bezug auf mitwirkende Masse und Steifigkeit der Elemente der Struktur entsprechend dem betrachteten Beanspruchungsniveau zu treffen. Ohne genaue Berechnung dürfen für die Dämpfung von Stahlbetonstrukturen 7 % der kritischen Dämpfung für NESK3 und 4 % für NESK2 angesetzt werden.

b. Bei unsymmetrischen Tragsystemen sind grundsätzlich 3D-Berechnungsmodelle vorzuziehen. Vereinfachte Modelle sind zulässig, solange sie nachweisbar zu konservativen Resultaten führen oder der Plausibilitätskontrolle der Ergebnisse der 3D-Modelle dienen.

4.1.1.2 Boden-Bauwerks-Interaktion

a. Der Einfluss der Interaktion zwischen dem Boden und dem jeweiligen Bauwerk ist zu erfassen. Dabei ist ein Bodenmodell mit mittleren Werten der Baugrundeigenschaften zu verwenden, welches auf den aktuell gültigen Resultaten der lokalen Bodenuntersuchungen (Messwerte) basiert und im Vergleich mit Bodenprofilen aus der aktuell akzeptierten Gefährdungsstudie plausibel ist. Die Streuung der Bodenkennwerte ist durch eine angemessene Variation der Parameter zu berücksichtigen.

b. Bei der klassischen deterministischen Vorgehensweise sind grundsätzlich Berechnungen mit mittleren Werten sowie mit Faktor 1,5 erhöhten und Faktor 1,5 reduzierten Werten für die Baugrundsteifigkeit durchzuführen (d. h. mit drei Bodenmodellen, KTA 2201.1, Kap. 4.3.2 /3/).

c. Die Dehnungsabhängigkeit des dynamischen Schubmoduls und der Materialdämpfung des Baugrundes ist zu berücksichtigen.

d. Die Materialdämpfung und die Abstrahlungsdämpfung (geometrische Dämpfung) im Baugrund dürfen entsprechend den Baugrund- und Gründungsverhältnissen eingesetzt werden. Dabei sind die Festlegungen der KTA 2201.3 /3/ zu beachten.

e. Der Referenzpunkt für die Boden-Bauwerks-Interaktion ist auf der Geländeoberkante oder auf dem Fundamentniveau zu wählen. In diesem Punkt muss die Freifeld-Bodenerschütterung den vom ENSI festgelegten aktuellen Gefährdungsannahmen (Erdbebeneinwirkung) entsprechen.

4.1.1.3 Lineare dynamische Strukturanalyse

a. Die kraftbasierte lineare Berechnung der Beanspruchung der Tragstruktur eines Bauwerkes unter Erdbebeneinwirkung erfolgt in der Regel mit Hilfe des Antwortspektrenverfahrens (ASV) oder mit einer linearen Zeitverlaufsberechnung (ZVV).

b. Die Erdbebeneinwirkung ist in drei Richtungen gleichzeitig wirkend anzunehmen. Bei der Verwendung des Antwortspektrenverfahrens sind die Auswirkungen aus den einzelnen Eigenschwingungsformen mit Hilfe der Square Root of the Sums of the Squares (SRSS) oder der Complete Quadratic Combination (CQC)-Methode zu überlagern. Die Überlagerung von Erdbebenauswirkungen aus drei orthogonalen Einwirkungsrichtungen erfolgt in der Regel ebenfalls mit Hilfe der SRSS-, der CQC-Methode mit drei Komponenten (CQC3) oder mit der 100/40/40-Regel.

c. Bei der linearen Zeitverlaufsberechnung und zur Bestimmung von Etagenantwortspektren sind künstliche zu den UHS gemäss Kap. 2.1 kompatible Erdbebenzeitverläufe zu verwenden. Die Erdbebenzeitverläufe müssen für alle Richtungen statistisch unabhängig sein. Es sind für ein Berechnungsmodell (d. h. für jedes der drei Bodenmodelle) mindestens 3 Sets mit jeweils 3 statistisch unabhängigen Erdbebenzeitverläufen zu verwenden. Die Ergebnisse aus den Berechnungsdurchgängen der einzelnen Sets pro Berechnungsmodell dürfen gemittelt werden.

4.1.1.4 Berücksichtigung der Überfestigkeit und des nichtlinearen Verhaltens der Bauwerksstruktur

a. Das plastische Verformungs- und Energiedissipationsvermögen der Bauwerksstruktur sowie die Fähigkeit der Bauwerksstruktur, der Erdbebeneinwirkung im nichtlinearen Bereich mit Überfestigkeit zu widerstehen, dürfen wie folgt berücksichtigt werden:

- Bei der Verwendung des Antwortspektrenverfahrens dürfen als Vereinfachung, analog wie in der Norm SIA 261 /9/ oder im EC 8 /10/, die elastischen Uniform Hazard Antwortspektren für die Berechnung der Schnittkräfte mit dem Verhaltensbeiwert $q = 1{,}5$ reduziert werden. In diesem Fall ist auch die Überfestigkeit bereits im Faktor q enthalten. Zur Bestimmung von Schadensbildern und für Gebrauchstauglichkeitsnachweise ist die Verwendung des Verhaltensbeiwerts q nicht zulässig.

- Bei der Verwendung der Zeitverlaufsberechnung darf der pauschale Verhaltensbeiwert q nicht verwendet werden. Die Analyse darf aber mit Hilfe eines nichtlinearen Berechnungsmodells erfolgen. Das nichtlineare Verhalten kann entweder auf der Bauteilebene (Makroelemente) oder auf der Materialebene (Materialgesetz) berücksichtigt werden. Dabei ist der hysteretischen Dämpfung besondere Beachtung zu schenken. Basierend auf den aktuell gültigen Erdbebengefährdungsresultaten ist eine ausreichende Anzahl von mit der Gefährdung konsistenten Zeitverlaufssets, mit je drei statistisch unabhängigen Zeitverläufen, zu erarbeiten oder auszuwählen und für die nichtlineare Zeitverlaufsberechnung (NL ZVV) anzuwenden. Die Spektren der Zeitverläufe haben in ihrer Summe das Uniform Hazard-Antwortspektrum der Erdbebengefährdung abzudecken.

- Die statischen, nichtlinearen, verformungsbasierten Berechnungsmethoden zur Bestimmung der Erdbebenauswirkung (z. B. Pushover Analyse gemäss Merkblatt SIA 2018 /11/ oder EC 8 /10/) sind grundsätzlich zulässig, falls die Bedingungen zu ihrer Anwendung erfüllt sind und falls die resultierenden Duktilitäten (lokale und globale), respektive die effek-

tiven Dämpfungen physikalisch und aufgrund der konstruktiven Ausbildung der Bauwerksstruktur begründet werden können.

4.1.2 Systeme und Komponenten

a. Die Auswirkungen des Nachweiserdbebens auf Systeme und Komponenten sind basierend auf den seismischen Erschütterungen der Bauwerksstruktur am jeweiligen Aufstellort und den Eigenschaften (Masse, Steifigkeit, Dämpfung) der Systeme und Komponenten zu ermitteln.

b. Die Erdbebeneinwirkung ist für die Systeme und Komponenten entweder in Form von Zeitverläufen der Beschleunigung am Aufstellort oder der Etagenantwortspektren zu bestimmen.

c. Etagenantwortspektren werden in massgebenden Punkten der Bauwerksstruktur in drei Richtungen für verschiedene Dämpfungswerte bestimmt. Dabei müssen die dynamischen Eigenschaften der Struktur sowie die dynamische Boden-Bauwerks-Interaktion gemäss Kap. 4.1.1 berücksichtigt werden.

d. Aus den Etagenantwortspektren werden durch Umhüllung, Verbreitung und Glättung die Etagenbemessungsspektren konstruiert, siehe KTA 2201.3, Kap. 4.5.2 /3/.

e. Probabilistische, unter Anwendung von Sampling-Methoden ermittelte Etagenantwortspektren können für die geforderten klassischen deterministischen Nachweise verwendet werden, falls aufgezeigt wird, dass sie gleichwertig zu den deterministisch ermittelten Etagenbemessungsspektren sind. Ohne genauere Untersuchung dürfen dabei die 95 %-Fraktilwerte der probabilistischen Etagenantwortspektren verwendet werden. Bei der Bestimmung der Spektren sind mindestens 30 statistisch unabhängige Erdbebenzeitverläufe zu verwenden.

f. Die nichttragenden bzw. sekundären Bauteile (z. B. Mauerwerkswände oder Auskleidungen) sind grundsätzlich wie Komponenten zu behandeln.

g. Bei schweren Komponenten ist der Einfluss der Komponenten-Bauwerksstruktur-Interaktion abzuschätzen, oder es ist ein Gesamtberechnungsmodell zu verwenden.

4.2 Weitere Auswirkungen

4.2.1 Weitere geologische Auswirkungen

4.2.1.1 Bauwerksstrukturen

a. Für die festgelegte Auswirkung sind die Verschiebungen bzw. Verkippungen sowie die entsprechende Beanspruchung der Bauwerksstrukturen zu bestimmen.

b. Nachzuweisen sind die Gesamtstabilität, ausreichender Tragwiderstand der Strukturen oder ihrer Teile sowie die Gebrauchstauglichkeit (z. B. Integrität der Gebäudehülle).

4.2.1.2 Systeme und Komponenten

a. Die weiteren geologischen Auswirkungen auf Systeme und Komponenten sind zu bestimmen. Der Einfluss, insbesondere des Standorts im Gebäude und der Befestigung, ist im Hinblick auf allfällige Verschiebungen bzw. Verkippungen zu berücksichtigen.

4.2.2 Externe Überflutung

4.2.2.1 Bauwerksstrukturen

a. Der zeitliche Verzug zwischen Erdbeben und Überflutung ist zu berücksichtigen. Die Einwirkungen auf Gebäude, wie Auftrieb und Wasserdruck auf die Aussenwände und auf Abdichtungen der Öffnungen, sind aus der festgelegten Überflutungskote und allenfalls aus der Fliessgeschwindigkeit zu bestimmen.

b. Nachzuweisen ist die Gesamtstabilität, ausreichender Tragwiderstand der Strukturen oder ihrer Teile sowie die Gebrauchstauglichkeit (Dichtheit der Wände bzw. Abdichtungen).

4.2.2.2 Systeme und Komponenten

a. Die Auswirkungen der externen Überflutung auf die Systeme und Komponenten sind entsprechend denen der internen Überflutung (Kap. 4.2.3.1), unter Beachtung der unterschiedlichen Wasserqualitäten (Feststofftransport, Verunreinigungen), zu berücksichtigen.

4.2.3 Besondere indirekte Auswirkungen innerhalb der Anlage auf die Strukturen, Systeme und Komponenten

4.2.3.1 Interne Überflutungen

Der Nachweis der Beherrschung, respektive zum Ausschluss der Kombination von Erdbeben und daraus induzierten internen Überflutungen kann auf zwei verschiedene Arten geführt werden.

Variante 1

Es ist nachzuweisen, dass interne Überflutungen aufgrund fehlender oder nicht nennenswerter Leckagen von Gebäudeteilen, Becken, Behältern und Leitungen ausgeschlossen werden können.

Variante 2

Falls der Nachweis nach Variante 1 nicht erbracht werden kann, ist der deterministische Nachweis für die Beherrschung der Kombination von Erdbeben und interner Überflutung zu führen. Die möglichen Wasserquellen (z. B. Kühlwasser, Löschwasser) und die maximal zur Verfügung stehenden Wasservolumen in den Gebäuden sind anzugeben und zuzuordnen. Weiterhin sind für die Sicherheitseinrichtungen Überflutungshöhen und Überflutungsvolumen anzugeben, bis zu denen ein auslegungsgemässer Betrieb der Sicherheitseinrichtungen unterstellt werden kann.

Die folgenden Anforderungen sind zu berücksichtigen:

a. Aus der festgelegten Überflutungskote ergeben sich die statischen hydrostatischen Lasten auf die Wände und auf die Abschottungen und Dichtungen.

b. Nachzuweisen sind ein ausreichender Tragwiderstand der Tragstruktur oder ihrer Teile sowie die Gebrauchstauglichkeit (Dichtheit der Wände bzw. Abschottungen und Dichtungen).

c. Im Falle einer möglichen internen Überflutung von Räumen mit elektrischen Ausrüstungen ist von einer wirksamen Kurzschlussschutzauslösung auszugehen, so dass diese Ausrüstungen nach erfolgter Überprüfung (soweit die Handmassnahmen entsprechend Kap. 6.1.2 kreditiert werden können) wieder als gebrauchstauglich angesehen werden können.

d. Für den Nachweis sind nur jene SSK zu kreditieren, deren Funktion, Integrität oder Standfestigkeit für die besonderen Bedingungen bei einer Überflutung nachgewiesen wurde. Liegen keine Nachweise vor, ist für die Störfallanalyse vom Ausfall, vom Integritätsverlust oder vom Verlust der Standfestigkeit der SSK auszugehen.

4.2.3.2 Interne Brände

Der Nachweis der Beherrschung, respektive des Ausschlusses der Kombination von Erdbeben und daraus induzierten internen Bränden, kann auf zwei verschiedene Arten geführt werden.

Variante 1

Es ist nachzuweisen, dass interne, erdbebeninduzierte Brände ausgeschlossen werden können, da diese aufgrund fehlender Brandlasten, Zündquellen oder Sauerstoff nicht auftreten können.

Variante 2

Falls der Nachweis nach Variante 1 nicht erbracht werden kann, ist der deterministische Nachweis für die Beherrschung der Kombination von Erdbeben und internem Brand zu führen. Dieser Nachweis ist entsprechend der HSK-Richtlinie R-50 und der Brandschutzvorschriften der Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen (VKF) zu führen. Dabei gelten folgende Randbedingungen:

a. Es ist der Ausfall der internen Löschwasserversorgung zu unterstellen, sofern deren Erdbebenkapazität nicht nachgewiesen ist.

b. Es ist zu unterstellen, dass die internen und externen Verkehrswege nicht mehr befahrbar sind, sofern deren Erdbebenkapazität nicht nachgewiesen ist.

c. Wo Handlöschmassnahmen erforderlich sind, ist auszuweisen, dass diese Handmassnahmen gemäss Kap. 6.1.2 kreditiert werden können und insbesondere entsprechend ausgebildetes, einsatzbereites Personal rund um die Uhr auf dem Areal präsent ist.

5 Nachweis der ausreichenden Erdbebenkapazitäten der Strukturen, Systeme und Komponenten

Beurteilungsgrundlage für das wirksame Abtragen der Störfalllasten auf die Bauwerke und Anlageteile (Art. 8 der „Gefährdungsannahmenverordnung") bildet u. a. das für die Strukturen, Systeme und Komponenten (SSK) gültige Regelwerk (siehe Kap. 4 und 5).

a. Bei der Bewertung der Erdbebenkapazitäten der SSK ist die Gesamteinwirkung aus Betrieb (z. B. Eigengewicht und Betriebslasten) und Erdbeben entsprechend Kap. 4 (seismische Bodenerschütterungen und weitere Auswirkungen) zu berücksichtigen.

b. Für den Kapazitätsnachweis werden grundsätzlich klassische deterministische Verfahren, CDFM-Berechnungen und Fragility-Analysen entsprechend Kap. 5.1 bis 5.5 akzeptiert. Die Anwendbarkeit aller verwendeten Verfahren für die Kapazitätsnachweise zum betrachteten Aspekt (Funktion, Integrität, Standfestigkeit) der Analyse im Hinblick auf die Versagensgrenze ist zu belegen.

c. Für alle zur Störfallbeherrschung erforderlichen SSK ist ein HCLPF-Wert zu bestimmen (Kap. 5.5). Ausnahmen hierzu bestehen für Bauwerksstrukturen (Kap. 5.1) sowie im Bereich Reaktorkern, Brennelemente und Steuerelemente (Kap. 5.4).

d. Bei den Analyseverfahren ist sicherzustellen, dass eine belastbare quantitative Datenbasis als Ausgangspunkt der Berechnung zur Verfügung steht. Für die Datenbasis kommen vorhandene Auslegungsberechnungen, nachträglich erstellte Analysen oder experimentelle Nachweise mit quantitativ anderen Gefährdungsannahmen in Frage. Es ist sicherzustellen, dass keine nichtkonservativen Nachweisergebnisse generiert werden und dass alle relevanten Versagensmodi berücksichtigt sind.

5.1 Bauwerksstrukturen

5.1.1 Grundlagen

a. Nach Art. 8, Ziff. 2 der „Gefährdungsannahmenverordnung" ist für die Bauwerksstrukturen nachzuweisen, dass die Lasten, die sich aus dem Störfall Erdbeben ergeben, durch die Strukturen abgetragen werden können. Der Nachweis ist für alle in Kap. 3.1 identifizierten Bauwerke zu führen. Die Bestimmung des Tragwiderstands und des Verformungsvermögens der Struktur und seiner Teile sowie die Nachweise erfolgen gemäss entsprechenden SIA-Normen. Die Nachweise für Betonbauten sind nach SIA 262 /9/ und diejenigen für Stahlstrukturen nach SIA 263 /12/ zu führen. Die Themenbereiche, die in den SIA-Normen nicht oder nicht ausreichend detailliert geregelt sind, können unter Anwendung anderer Normen behandelt und nachgewiesen werden, falls dies methodisch konsistent zu den SIA-Normen erfolgt (z. B. Berechnung von Rissbreiten nach DIN 1045 /13/). Für die Nachweise von Befestigungen sind im Allgemeinen die Bestimmungen des GSKL-Konzepts für Befestigungen in Betonstrukturen /5/ zu beachten.

5.1.2 Konzept der Grenzzustände

a. Es wird zwischen Nachweisen der Tragsicherheit und Gebrauchs- bzw. Funktionstauglichkeit unterschieden. Zum Nachweis der Tragsicherheit gehören die Nachweise der Gesamtstabilität, des ausreichenden Tragwiderstandes des Tragwerks oder seiner Teile und des Tragwiderstandes des Baugrunds. Der Nachweis der Gebrauchs- bzw. Funktionstauglichkeit richtet sich nach den an die Struktur gestellten Anforderungen.

5.1.3 Nachweis der Tragsicherheit

a. Die durchzuführenden Nachweise sind grundsätzlich deterministisch, d. h. nach dem Konzept der Partialfaktoren gemäss SIA- oder entsprechenden EU-Normen zu führen. Dabei sind die Unsicherheiten bezüglich der Modellierung oder Streuung der Materialkennwerte (z. B. Festigkeit) durch Verwendung der Lastfaktoren (Erhöhung der Einwirkung) bzw. Widerstandsbeiwerte (Reduktion des Widerstandes) zu berücksichtigen.

b. Der deterministische Nachweis der Tragsicherheit einer Struktur oder eines ihrer Teile unter der Erdbebeneinwirkung, mit dazugehörigen ständigen und veränderlichen Einwirkungen, ist erfüllt, wenn der Bemessungswert des Tragwiderstandes (kraftbasiert) oder der Bemessungswert des Verformungsvermögens (verformungsbasiert) gleich oder grösser ist als der Bemessungswert der Auswirkung.

5.1.4 Tragsicherheitsnachweis bei nichtlinearen Verfahren

a. Bei einer nichtlinearen Zeitverlaufsberechnung gilt die ausreichende Erdbebenkapazität als nachgewiesen, wenn die Versagenskriterien über den gesamten Zeitverlauf des Erdbebens nicht erreicht werden. Als Versagenskriterien gelten z. B. Grenzwerte für die Schubverzerrung oder für Rotationen in den plastischen Gelenken der Bauteile.

b. Bei der Verwendung der statischen nichtlinearen verformungsbasierten Nachweismethoden (z. B. Pushover Analyse nach SIA 2018 /11/) wird die Kraft-Verformungskurve für das Bauwerk bestimmt. Es werden dazu die charakteristischen Materialeigenschaften verwendet. Der Nachweis wird durch den Vergleich des Bemessungswerts des Verformungsvermögens mit dem vom Erdbeben hervorgerufenen Verformungsbedarf geführt.

5.1.5 Tragsicherheitsnachweis der Verankerungen der Komponenten

a. Oft sind die Verankerungen massgebend bei der Bestimmung der Erdbebenfestigkeit der Komponenten. Der Tragsicherheitsnachweis für Verankerungen ist erfüllt, wenn der Bemessungswert des Tragwiderstands grösser ist als der Bemessungswert der Auswirkung. Die Rissbildung im Beton kann die Tragsicherheit der Verankerungen beeinträchtigen und ist deshalb bei den Nachweisen der Systeme und Komponenten zu berücksichtigen.

5.1.6 Materialfestigkeiten

a. Wenn die entsprechenden Angaben vorliegen, dürfen bei den Nachweisen der Tragsicherheit die effektiven, aus Messungen hergeleiteten Bemessungswerte der Materialfestigkeit verwendet werden.

5.1.7 Nachweis der Gebrauchs- resp. Funktionstauglichkeit

a. Die Kriterien für die Gebrauchstauglichkeit einer Struktur oder einer Teilstruktur sind abhängig von der Funktion, die sie zu erfüllen hat. Kriterien für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis sind insbesondere:

- ausreichende Dichtheit von Bauteilen mit Barrierefunktion,
- Begeh- und Benutzbarkeit von Räumen, die für die Störfallbeherrschung erforderlich sind,
- zulässige Rissbreiten in Verankerungszonen von sicherheitsrelevanten Komponenten,
- ausreichende Breite von Gebäudefugen,
- zulässige Verschiebungen von Kompensatoren bei Gebäudedurchdringungen,
- zulässige Verschiebungen an Schwingungsisolatoren.

b. Der Gebrauchstauglichkeitsnachweis ist erfüllt, wenn die obigen Kriterien der Gebrauchstauglichkeit eingehalten werden. Bei linear elastischen Berechnungen sind die Verschiebungen anhand realistischer Bauteilsteifigkeiten zu bestimmen, z. B. durch Reduktion des E-Moduls des Betons.

5.1.8 Nicht-klassisch deterministische Nachweismethoden

a. Alternativ zu den in Kap. 5.1.1 bis 5.1.7 vorgestellten Methoden kann die Erdbebenkapazität, ähnlich wie in der Fragility-Analyse (FA), als maximale Bodenbeschleunigung (PGA) oder maximale Spektralbeschleunigung (SA) eines Erdbebens (in einem Referenzpunkt), bei dem die Struktur oder eines ihrer Teile ihren Grenzzustand der Tragsicherheit oder der Gebrauchs- bzw. Funktionstauglichkeit erreichen, definiert werden. Diese bezogene Kapazität kann dann mit den Kennwerten der Erdbebeneinwirkung (im Referenzpunkt) verglichen werden.

b. Die CDFM-Methodik (Kap. 5.5.3.2) kann für den deterministischen Nachweis angewandt werden, solange sie mit den Vorgaben in Kap. 4.1 und in diesem Kapitel konsistent ist. Der mit der Verwendung der CDFM-Methode angestrebte Abbau der Konservativitäten wird durch Einhalten der in Kap. 4.1 und in diesem Kapitel beschriebenen Vorgaben für die Nachweisführung erreicht. Es wird dort erlaubt, sowohl die effektiven Festigkeiten (effektive Bemessungswerte und die Überfestigkeit (Verfestigung)) als auch die inelastische Energieabsorption (beim Antwortspektrenverfahren über den Verhaltensbeiwert) zu berücksichtigen. Alternativ kann der Einfluss der inelastischen Energieabsorption nach Ref. /15/ (Section 3) abgeschätzt werden, vorausgesetzt, dass die Anwendbarkeit der dort verwendeten Methoden für die vorhandene Erdbebeneinwirkung nachgewiesen wird.

c. Als Plausibilitätskontrolle der deterministischen Nachweise können auch die gemäss Kap. 5.5.3.1 bestimmten HCLPF-Werte verwendet werden.

5.1.9 Bestimmung des Schadensbildes

a. Bei einem nicht erfüllten Nachweis für die Bauwerksstruktur ist das Schadensbild zu bestimmen, damit die eventuellen radiologischen Auswirkungen und die Einhaltung der für den Nachweis erforderlichen technischen Kriterien für die gesamte Anlage beurteilt werden können (siehe Kap. 6).

5.2 Mechanische Ausrüstungen

a. Bei klassischen deterministischen Nachweisen mechanischer Komponenten wird in der Regel die Bemessungsgrösse (z. B. Spannung, Dehnung, Verschiebungen, Verformungen) mit dem zulässigen Wert verglichen. Wenn die Beanspruchung kleiner ist als die Beanspruchbarkeit des Materials, ist der Nachweis erbracht. Sicherheitsmargen aus den Bauvorschriften sind dabei nicht zu berücksichtigen. Gegebenenfalls sind weitere Nachweise (z. B. Standsicherheit) zu führen. Es ist aufzuzeigen und zu dokumentieren, dass die limitierende Versagensart der mechanischen Komponente für den betrachteten Aspekt (Funktion, Integrität oder Standfestigkeit) in den analysierten Versagensarten enthalten ist. Das dynamische Verhalten der mechanischen Komponente im relevanten Frequenzbereich, wie z. B. Eigenfrequenzen, ist zu berücksichtigen. Die Berechnungen können sowohl elastisch als auch elastisch-plastisch durchgeführt werden.

b. Wenn die entsprechenden Angaben vorliegen, dürfen durch normgerechte Messungen ermittelte 97,5 % Fraktilwerte der Materialfestigkeit verwendet werden. Ansonsten sind die Festigkeitswerte dem gültigen Werkstoffdatenblatt zu entnehmen.

c. Für den Nachweis der Komponenten des Primärkreislaufs (druckführende Umschliessung des Reaktorkühlsystems) ist eine numerische Analyse mit einem gekoppelten Gesamtmodell gemäss Vorgehen in Kap. 5.2 a durchzuführen. Das Gesamtmodell integriert den Reaktordruck-

behälter (RDB), die wesentlichen RDB-Einbauten und die Ausrüstungen der druckführenden Umschliessung des Reaktorkühlsystems bis und mit der zweiten Abschlussarmatur in das Modell des Reaktorgebäudes.

d. Für eine repräsentative Auswahl der zur Störfallbeherrschung erforderlichen mechanischen Komponenten ist ein klassischer deterministischer Nachweis gemäss Vorgehen in Kap. 5.2 a zu führen. Falls dieser Nachweis erbracht wird, kann für die restlichen Komponenten in der Störfallanalyse (Kap. 6) eine ausreichende Erdbebenkapazität angenommen werden.

e. Die repräsentative Auswahl muss die hinsichtlich Erdbebenfestigkeit schwächsten Komponenten umfassen. In die Auswahl aufzunehmen sind in jedem Fall mindestens ein Notstandsdieselgenerator, eine Armatur, eine Rohrleitung, ein Behälter und eine Pumpe.

f. Für die Festlegung der repräsentativen Auswahl können Berechnungen der HCLPF-Werte (Kap. 5.5) verwendet werden.

5.3 Elektrische Ausrüstungen

a. Für eine repräsentative Auswahl der zur Störfallbeherrschung erforderlichen elektrischen Komponenten, einschliesslich deren Verankerungen, ist ein klassischer deterministischer Nachweis nach den Vorgaben der IEEE 344 /16/ oder der deutschen KTA-Regel 2201.4 /3/ zu führen. Falls diese Nachweise erbracht werden, kann für die restlichen Komponenten in der Störfallanalyse (Kap. 6) eine ausreichende Erdbebenkapazität angenommen werden.

b. Die Nachweise müssen auf den Ergebnissen von Rütteltischversuchen oder Berechnungen gemäss IEEE oder KTA basieren.

c. Die repräsentative Auswahl muss die hinsichtlich Erdbebenfestigkeit schwächsten Komponenten umfassen. In die Auswahl aufzunehmen sind in jedem Fall mindestens eine Batterieanlage, eine Umformergruppe, ein Schaltschrank, ein Mess- und Elektronikschrank, ein Wartenpult, ein Messrack und ein Antrieb.

d. Erfolgskriterium für den Nachweis anhand von Testantwortspektren aus Rütteltischversuchen ist, dass dieses Antwortspektrum das jeweilige Etagenbemessungsspektrum (Kap. 4.1) überdeckt (nicht abdeckende Bereiche sind zu bewerten).

e. Für die Festlegung der repräsentativen Auswahl können Berechnungen der HCLPF-Werte (Kap. 5.5) verwendet werden.

5.4 Reaktorkern, Brennelemente und Steuerelemente

a. In Bezug auf den Reaktorkern (inkl. Kerneinbauten) bestehen störfallkategorie-spezifische Nachweisziele zu folgenden Aspekten, welche sich aus Art. 10 und 11 der „Gefährdungsannahmenverordnung“ ableiten:

- Hüllrohrintegrität,
- Abschaltbarkeit,
- kühlbare Geometrie.

b. Zur Bewertung der Nachweise für Brenn- und Steuerelemente stützt sich das ENSI auf die bisher akzeptierten Methoden. Diese folgen beispielsweise den Vorgaben im National Standard ANSI/ANS-57.5-1996 /17/ und NUREG 0800 SRP, Chapter 4.2, Fuel System Design

/18/. Demnach sind mechanische Beanspruchungen so zu begrenzen, dass das Einfahren der Steuerelemente und die Kühlbarkeit der Brennelemente nicht gefährdet sind. Ausserdem ist die vertikale und horizontale Verschiebung der Brennelemente zu begrenzen.

c. Für Brennelemente im Trockenlager und im Nasslager ist die Einhaltung einer kühlbaren Geometrie, der Unterkritikalität und der Hüllrohrintegrität (gemäss Art. 10 und 11 der „Gefährdungsannahmenverordnung") zu gewährleisten. Dies ist u. a. über die Integrität der Lagergestelle gewährleistet, für die ein Nachweis gemäss Kap. 5.1 bzw. 5.2 erbracht werden muss.

d. Für die Nachweisführung zu NESK2 und NESK3 sind freigegebene Methoden zu verwenden. Das ENSI akzeptiert die Anwendung der bestehenden Nachweismethoden zum bisherigen Sicherheitserdbeben (SSE). Änderungen in den Nachweismethoden im Bereich Reaktorkern, Brennelemente und Steuerelemente sind gemäss Art. 40 KEV freigabepflichtig. In der Nachweisführung sind die Ergebnisse des gekoppelten Gesamtmodells (Kap. 5.2) zu berücksichtigen, z. B. direkt als Anregungsfunktion bzw. als Validierung der verwendeten Anregungsfunktion.

5.5 Bestimmung des HCLPF

HCLPF-Kapazitätswerte können gemäss Kap. 5.1 bis 5.4 angewendet werden.

5.5.1 Definition des HCLPF

HCLPF ist die Abkürzung für High Confidence of low Probability of Failure. Der HCLPF-Kapazitätswert a_{HCLPF} ist der Wert der Erdbeben-Bodenbeschleunigung [in g] auf dem Referenzniveau (z. B. am Fundament des Reaktorgebäudes), bei dem eine SSK mit ca. 1 % Wahrscheinlichkeit versagt. Im Folgenden wird der Ausdruck HCLPF als Synonym für den HCLPF-Kapazitätswert a_{HCLPF} verwendet.

Der HCLPF-Wert wird aus den Fragility-Kurven (Kap. 5.5.3.1) oder mit der CDFM-Methode (Kap. 5.5.3.2) berechnet.

5.5.2 Ausreichender HCLPF-Wert

Soweit der HCLPF in diesem deterministischen Nachweis der Störfallbeherrschung angewandt wird, gilt als Erfolgskriterium:

$$a_{HCLPF} \geq a_{NE}$$

a_{NE} ist die Beschleunigung des Nachweiserdbebens (Spitzenbeschleunigung PGA oder Spektralbeschleunigung SA).

5.5.3 Methoden zur Bestimmung des HCLPF

5.5.3.1 Fragility-Analyse (FA)

Die Standard-FA-Methoden liefern die bedingte Versagenswahrscheinlichkeit einer SSK in Abhängigkeit eines repräsentativen Wertes für die Bodenbeschleunigung in Form von doppelt logarithmischen Fragility-Kurven mit den Parametern A_m, β_R und β_U. Der HCLPF-Kapazitätswert wird aus den Fragility-Kurven wie folgt berechnet:

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

A_m Mediankapazität

β_R Parameter der log. Standardabweichung der aleatorischen Unsicherheit

β_U Parameter der log. Standardabweichung der epistemischen Unsicherheit

Die FA-Methoden nach dem Prinzip der Zerlegung der Variablen der Fragility-Funktion (Separation of Variables), so wie sie für die PSA angewendet werden, sind z. B. in EPRI TR-103959 /15/ und EPRI 1002988 /19/ beschrieben.

5.5.3.2 Conservative Deterministic Failure Margin (CDFM)-Methode

Die CDFM-Methode zur direkten Ermittlung von HCLPF-Kapazitätswerten (ohne Fragility-Kurven) ist z. B. in EPRI TR-103959 /15/ und EPRI NP-6041 /20/ beschrieben. Die so ermittelten Kapazitätswerte sollen mit $HCLPF_{CDFM}$ gekennzeichnet werden.

5.5.3.3 Allgemeine Vorgaben

Die sog. Peak and Valley Variability (PV)-Korrektur nach EPRI 1019200 /21/ ist, sofern sie angewendet wird, fachtechnisch zu begründen. Der Verweis auf EPRI 1019200 ist für das ENSI keine ausreichende Begründung, da nach Ansicht des ENSI die Peak and Valley-Variabilität β_{rs} in den EPRI-Dokumenten uneindeutig und widersprüchlich definiert ist. Zur Begründung wäre

a. die in den Fragility-Analysen abgezogene Peak and Valley-Variabilität in den Gefährdungsresultaten eindeutig zu identifizieren und zu quantifizieren (Anwendbarkeit der PV-Korrektur für die Gefährdungsresultate gemäss Kap. 2.1); und

b. zu zeigen, dass mit der PV-Korrektur die Beschleunigungswerte a_{HCLPF} nicht mehr korrigiert werden als sich die Peak and Valley-Variabilität im Beschleunigungswert a_{NE} des Nachweiserdbebens ausdrückt.

6 Technische und radiologische Störfallanalysen

a. Zum Nachweis der Einhaltung der Kriterien erstellt der Betreiber gemäss „Gefährdungsannahmenverordnung" eine deterministische Störfallanalyse, bestehend aus einer technischen Störfallanalyse gemäss Richtlinie ENSI-A01 /22/ und einer radiologischen Störfallanalyse gemäss Richtlinie ENSI-A08 /23/.

b. Beim Nachweis sind die Anforderungen der Richtlinien ENSI-A01 /22/ und ENSI-A08 /23/ massgebend, sofern sie nicht in dieser Aktennotiz weiter konkretisiert sind.

c. Für die betrachteten Nachweiserdbeben sind jeweils mindestens die Betriebszustände „Leistungsbetrieb" und „kalt abgestellter Zustand" / Brennstoffwechsel (mit ausgeladenem Kern) zu betrachten. Der abdeckende Charakter dieser Betriebszustände für die anderen Betriebszustände ist zu bewerten.

d. Die Störfallabläufe sind bis zum Erreichen eines sicheren stabilen Anlagenzustands zu analysieren. Ein solcher Zustand der Anlage ist aus technischer und radiologischer Sicht unter den folgenden Bedingungen erreicht:

   - Die Unterkritikalität aller Brennelementkonfigurationen ist sichergestellt.

- Die Kühlung aller Brennelementkonfigurationen ist sichergestellt.
- Die Integrität der Barrieren ist gewährleistet, die Kontrolle geplanter radioaktiver Abgaben an die Umwelt ist sichergestellt und unbeabsichtigte Abgaben bleiben begrenzt.

e. Weiterhin ist ausgehend vom Leistungsbetrieb eines Kernkraftwerks nachzuweisen, dass die Anlage dauerhaft in den kalt abgestellten Zustand überführt werden kann.

6.1 Technische Störfallanalyse

Für die zu betrachtenden Erdbeben als auslösende Ereignisse ist eine deterministische Störfallanalyse für die Gesamtanlage, einschliesslich aller betrieblichen Lager und Zwischenlager, durchzuführen.

6.1.1 Allgemeine Vorgehensweise

a. Es ist nachzuweisen, dass die Anlage in einen sicheren stabilen Anlagenzustand überführt werden kann und dieser Zustand ohne Zuhilfenahme externer Notfallschutzmittel während mindestens 72 Stunden stabil gehalten werden kann.

b. Für den Nachweis der Störfallbeherrschung nach 72 Stunden können auch vorbereitete externe Mittel kreditiert werden.

c. Die technischen Störfallanalysen zu den zu betrachtenden Erdbeben haben neben den Nachweisen zur Einhaltung der technischen Kriterien auch den Störfallablauf und den technischen Zustand der Anlage (Schadensbild) als Eingangsbedingungen für die radiologischen Analysen zu beschreiben. Dazu sind die erforderlichen Parameter für die Bestimmung der radiologischen Auswirkungen (bzw. des Quellterms) darzulegen. Siehe auch Kap. 6.2.1.

d. Die Einhaltung der grundlegenden Schutzziele ist zu bewerten und auszuweisen.

6.1.2 Vorgaben

a. Für den Nachweis der einzelfehlersicheren Beherrschung des Störfalls sind nur jene Ausrüstungen und Strukturen zu kreditieren, deren Funktion, Integrität oder Standfestigkeit entsprechend Kap. 5 nachgewiesen wurde. Liegen keine Nachweise vor, ist für die Störfallanalyse vom Ausfall, vom Integritätsverlust oder vom Verlust der Standfestigkeit der SSK auszugehen. Dabei ist deren Folgewirkung zu untersuchen und nachzuweisen, dass keine andere SSK beeinträchtig wird, die für die Nachweisführung notwendig ist. Gelingt der Nachweis nicht, muss der Verlust der Funktion, der Integrität oder der Standfestigkeit gefährdeter Komponenten durch eine Folgewirkung unterstellt werden.

b. Der Ausfall der externen Stromversorgung zum ungünstigsten Zeitpunkt ist zu unterstellen. Es ist zudem davon auszugehen, dass dieser länger als 72 Stunden dauern kann. Der Ausfall ist sowohl für die Anlage als auch die betrachteten Einrichtungen ausserhalb des Areals (insbesondere Staudämme) anzunehmen.

c. Die nach technischer Spezifikation zugelassene Wartung von Anlagenteilen ist zu berücksichtigen. Für Anlagen, bei denen im Leistungsbetrieb Instandhaltungsmassnahmen an Strängen von Sicherheitssystemen zulässig sind, ist der Instandhaltungsfall zu unterstellen.

d. Handlungen des Betriebspersonals (Handmassnahmen) dürfen kreditiert werden /22/, wenn sie in Vorschriften festgehalten sind, genügend grosse Zeitfenster zur Diagnose und Durchführung vorhanden sind und die dafür erforderlichen Hilfsmittel auch nach den in Kap. 2 und

Kap. 4 beschriebenen Erdbebenauswirkungen zur Verfügung stehen. Die Durchführbarkeit der Handmassnahmen ist auch unter Berücksichtigung lokaler radiologischer Umgebungsbedingungen nachzuweisen.

e. Falls sich mehrere Reaktorblöcke auf einem Areal befinden, ist anzunehmen, dass alle Blöcke von der Erdbebengefährdung betroffen sind. Die mögliche gegenseitige Beeinflussung von Mehrblockanlagen und Nachbaranlagen ist zu bewerten, sowohl in technischer Hinsicht als auch im Hinblick auf die Auswirkungen auf Operateurhandlungen.

6.1.3 Analyse der Integrität des Primärcontainments

Über die Mindestanforderungen von Art. 11 der „Gefährdungsannahmenverordnung" hinaus ist für das NESK3 die Robustheit des Primärcontainments zu prüfen.

a. Die Analyse umfasst die Stahldruckschale wie auch die das Primärcontainment durchdringenden Leitungen und zugehörigen Abschlussarmaturen, soweit diese nicht bereits über den Nachweis der Isolation des Reaktorkühlkreises abgedeckt sind.

b. Es ist mindestens aufzuzeigen, dass die Erstabsperrarmatur (innerhalb des Primärcontainments) automatisch schliesst (selbsttätig oder durch Fremdmedium) und dass die Zweitabsperrarmatur per Hand geschlossen werden kann. Für die Kreditierung von Handmassnahmen gelten die Vorgaben von Kap. 6.1.2.

6.2 Radiologische Störfallanalyse

6.2.1 Bestimmung des Quellterms

a. Grundlage jeder radiologischen Analyse ist eine Quelltermanalyse. Die Anforderungen daran sind in der Richtlinie ENSI-A08 /23/ festgelegt.

b. Die aus den technischen Störfallanalysen resultierenden Störfallabläufe und technischen Zustände der Anlage (vgl. Kap. 6.1) sind zu beschreiben (Schadensbild). Die sich mit dem Schadensbild für die radiologischen Analysen ergebenden Eingangs- und Randbedingungen für die Quelltermanalyse sowie die für die Berechnungen des Quellterms verwendeten Eingabeparameter sind systematisch auszuweisen, zu beschreiben und zu begründen.

c. Für alle zu betrachtenden SSK, für die kein Nachweis ihrer Integrität für das zu betrachtende Erdbeben vorgelegt werden kann, ist der Verlust der Integrität zu unterstellen. Eine damit einhergehende mögliche Freisetzung von radioaktiven Stoffen in die Anlage ist zu unterstellen und die freigesetzten Inventare sind auszuweisen. Die Bestimmung der Radionuklidinventare von versagenden Behältern und deren Komponenten soll von 80 % ihres Fassungsvermögens ausgehen und von den höchsten zu erwartenden Aktivitätskonzentrationen.

d. Die Folgen des Integritätsverlusts sind hinsichtlich des Freisetzungsverhaltens zu beschreiben und die möglichen Freisetzungspfade anzugeben. Der Beitrag zum Quellterm ist zu bestimmen, insbesondere sind die verwendeten mathematischen Modelle vollständig anzugeben und deren Einflussgrössen (Eingabeparameter) systematisch auszuweisen und zu begründen. Der Quellterm ist bis zum Erreichen des sicheren stabilen Anlagenzustands zu bestimmen. Er ist mindestens für 72 Stunden und für 30 Tage zu ermitteln und in Intervallen, die von der Richtlinie ENSI-G14 /24/ vorgegeben werden, auszuweisen.

6.2.2 Dosisberechnung

a. Die Berechnung der Strahlenexposition in der Umgebung aufgrund der ermittelten Quellterme für die zu betrachtenden Erdbeben hat gemäss der Richtlinie ENSI-G14 /24/ zu erfolgen. Die resultierenden Dosen in der Umgebung sind für 72 Stunden und für 30 Tage auszuweisen. Für die zu betrachtenden Erdbeben ist die Einhaltung der radiologischen Kriterien gemäss Art. 7 der „Gefährdungsannahmenverordnung" nachzuweisen.

7 Qualität der Dokumentation

a. Die gesamte Nachweisführung muss nachvollziehbar sein. Die Darstellung muss transparent, nachvollziehbar und widerspruchsfrei erfolgen. Die Darstellung ist thematisch logisch zu gliedern und, soweit sinnvoll, an die Struktur des vorliegenden Dokuments anzupassen. Die Dokumentation umfasst die Beschreibung der Berechnungsannahmen, der Modellbildung, Eingabedaten (auch in elektronischer Form) und die Resultate der Computerberechnungen (insbesondere die Etagenbemessungspektren) sowie dazugehörige Handrechnungen und Plausibilitätskontrollen. Insbesondere sind die Anforderungen an die Berechnungsprogramme und Anlagemodelle in der Richtlinie ENSI-A01 /22/ Kap. 4.3 zu erfüllen. Die verwendeten mathematischen Modelle sind vollständig zu beschreiben und deren Einflussgrössen (Eingabeparameter) systematisch auszuweisen und zu begründen.

b. Die Anforderungen der Richtlinie ENSI-G07 /25/ Kap. 7.5 zum Qualitätsmanagement sind zu erfüllen. Insbesondere sind durch den Betreiber unabhängige Überprüfungen (Independent Verifications) der sicherheitsrelevanten Zuarbeiten externer Stellen durchzuführen. Ebenfalls sind die Anforderungen an die Beschaffung von externen Produkten und Dienstleistungen der Richtlinie ENSI-G07 /25/ Kap. 7.9 zu erfüllen.

c. Alle zur Beherrschung der Nachweiserdbeben erforderlichen SSK sind in einer Liste festzuhalten. Die Liste oder in der Liste referenzierte Berichte sollen insbesondere die folgenden Informationen enthalten:

    a. Anlagenkennzeichen,
    b. Komponente,
    c. Aufstellungsort (Gebäudebereich, Höhenkote),
    d. Erdbebenklasse,
    e. Grundlagen zur Bestimmung der seismischen Kapazität (Strukturanalysen, Versuchsresultate, generische Daten),
    f. seismische Kapazität inkl. Berechnung dieser seismischen Kapazität (und soweit vorhanden HCLPF, Mediankapazität, β-Werte),
    g. zugehörige Komponentengruppe (soweit definiert),
    h. Art des Nachweises (Funktion, Integrität, Standfestigkeit).

d. Die Datenbasis für die ausgewiesenen Erdbebenkapazitäten, z. B. Daten aus Auslegungsberechnungen, Rütteltischversuchen, Herstellerspezifikation, etc. ist eindeutig zu referenzieren. Die für die Berechnung relevanten Herleitungen sind auszugsweise aus den zugrunde liegenden Dokumenten zu übernehmen. Für die Parameter (z. B. generische Sicherheitsfaktoren F und bei Fragility-Analysen Unsicherheitsparameter β_R und β_U) sind die Quellen anzugeben.

Gegebenenfalls ist die Wahl der Werte aus Standards oder von den Standards abweichende Werte zu begründen.

e. Referenzierte Unterlagen sind – soweit nicht schon Teil der Dokumentation – ebenfalls dem ENSI einzureichen. Die Dokumentation ist in Papierform (1 Exemplar) und, soweit sinnvoll, in elektronischer Form einzureichen.

8 Begriffsbestimmungen

Bemessungsspektrum
Für die Betrachtung der Bemessungssituation Erdbeben verwendeter, auf dem elastischen Antwortspektrum beruhender (und auf die Erdbeschleunigung bezogener) Wert der horizontalen Bodenbeschleunigung, dargestellt in Funktion der Schwingzeit und des Verformungsverhaltens des Tragwerks /8/.

Bodenabsenkung
Absenkung des Bodens über natürlichen Hohlräumen.

Bodenverflüssigung
Scherfestigkeits- und Steifigkeitsverlust von locker gelagertem wassergesättigtem Boden infolge statischer oder dynamischer Einwirkung /4/.

Einwirkungen (Bautechnik)
Mechanische (Lasten, Kräfte), andere physikalische (Temperatur, Feuchtigkeit), chemische (Salze, Säuren und Laugen, organische Verbindungen) und biologische (Bakterien, Insekten, Pilze, Algen) Einwirkungen auf SSK, resultierend aus der Ausführung und der Nutzung sowie infolge von Umwelteinflüssen /7/.

Elastisches Antwortspektrum (Bautechnik)
Maximaler Ausschlag eines Einmassenschwingers mit bestimmter Dämpfungsrate und Eigenfrequenz unter einer gegebenen Anregung /8/.

Erdbebengefährdung (Kap. 2.1)
Häufigkeit, mit der gegebene seismische Bodenbeschleunigungen überschritten werden.

Gravitative Massenbewegung
Schwerkraftbedingte Massenverlagerung von Fest- oder Lockergesteinen durch Fallen, Stürzen, Gleiten, Fliessen und Kriechen.

Indirekte Auswirkung
Einwirkung des Erdbebens auf eine nicht zur Beherrschung des Erdbebens notwendige Einrichtung, die aufgrund ihres Versagens eine sicherheitstechnische Einrichtung beschädigt (Folgewirkung), die zur Gewährleistung einer Sicherheitsfunktion notwendig ist.

Kaskadenartige Brüche von Staudämmen
Eine Stauanlage, für die der Erdbebenkapazitätsnachweis nicht vorliegt, bricht und löst eine Flutwelle aus, die weitere durch Erdbeben vorgeschädigte Stauanlagen, für die auch keine Kapazitätsnachweise vorliegen, wegen der zusätzlichen Überflutung zum vollständigen Bruch bringt.

Kompaktion/Setzung
Vorgang der mit Volumenabnahme verbundenen Setzung eines Gesteins (Verdichtung). Die Stärke der Kompaktion/Setzung ist abhängig von der Zeitdauer des Vorgangs, dem Überlagerungsdruck, der Beschaffenheit und Anordnung der Gesteinsporen sowie der Gefügebestandteile des Gesteins.

Referenzfels
Referenzniveau mit vorgegebenem Wert der Scherwellengeschwindigkeit.

Sicherheitserdbeben (SSE)
Nachweiserdbeben der Störfallkategorie 3 (NESK3)

Strukturempfindlicher Boden
Boden, dessen Korngerüst als Folge statischer oder dynamischer Einwirkung zusammenbrechen und/oder in eine dichtere Lagerung gebracht werden kann, z. B. Seekreide /4/.

Überfestigkeit (Bautechnik)
Differenz zwischen charakteristischem Wert der Festigkeit und der bei Erdbebeneinwirkung angenommenen Festigkeit /9/.

Verhaltensbeiwert (Bautechnik)
Beiwert zur Berücksichtigung des Verformungsverhaltens eines Tragwerks unter Erdbebeneinwirkung /8/.

9 Richtlinien, Leitfäden, Literatur

/1/ Bundesamt für Energie,
Verordnung des UVEK über die Gefährdungsannahmen und die Bewertung des Schutzes über die Gefährdungsannahmen und die Bewertung des Schutzes gegen Störfälle in Kernanlagen, Erläuternder Bericht, Oktober 2008.

/2/ Kernenergieverordnung (KEV),
SR 732.11, vom 10. Dezember 2004 (Stand am 1. Januar 2010).

/3/ Sicherheitstechnische Regel des KTA,
KTA 2201.1, 2201.2, 2201.3, 2201.4,
Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen,
Teil 1: Grundsätze,
Teil 2: Baugrund,
Teil 3: Auslegung der baulichen Anlagen,
Teil 4: Anlagenteile,
Fassung 2012-11.

/4/ Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein,
SIA 267 (2003): Geotechnik.

/5/ Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein,
SIA 267/1 (2003): Geotechnik – Ergänzende Festlegungen.

/6/ Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG),
Sicherheit der Stauanlagen, Version 1.1,
Richtlinie des BWG.

/7/ Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein,
SIA 260 (2003): Grundlagen der Projektierung von Tragwerken.

/8/ Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein,
SIA 261 (2003): Einwirkungen auf Tragwerke.

/9/ Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein,
SIA 262 (2003): Betonbau.

/10/ Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein,
SIA 260.803 (2005): Eurocode 8 – Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 3: Beurteilung und Ertüchtigung von Gebäuden.

/11/ Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein,
Merkblatt 2018 (2004): Überprüfung bestehender Gebäude bezüglich Erdbeben.

/12/ Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein,
SIA 263 (2003): Stahlbau.

/13/ DIN Deutsches Institut für Normung,
DIN 1045-1, 1045-2, 1045-3, 1045-4,
Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton,
Teil 1: Bemessung und Konstruktion,
Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität, Anwendungen zu DIN EN 206-1,
Teil 3: Bauausführung,
Teil 4: Ergänzende Regeln für die Herstellung und Konformität von Fertigteilen,
Fassung 2008-08.

/14/ Gruppe der schweizerischen Kernkraftwerksleiter (GSKL),
Konzept für Befestigungen in Betonstrukturen, Rev. 1 vom 15.10.2008.

/15/ Electrical Power Research Institute,
Methodology for Developing Seismic Fragilities,
Technical Report TR-103959, June 1994.

/16/ Institute of Electrical and Electronics Engineers,
IEEE Recommended Practice for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations,
IEEE Standard 344, 2004.

/17/ National Standard ANSI/ANS-57.5-1996.

/18/ NUREG 0800 SRP, Chapter 4.2 Fuel System Design.

/19/ Electrical Power Research Institute,
Seismic Fragility Applications Guide,
EPRI Report 1002988, December 2002.

/20/ Electrical Power Research Institute,
A Methodology for Assessment of Nuclear Power Plant Seismic Margin (Revision 1),
EPRI NP-6041, Revision 1, August 1991.

/21/ Electrical Power Research Institute,
Seismic Fragility Applications Guide Update,
EPRI Report 1019200, December 2009.

/22/ ENSI,
Anforderungen an die deterministische Störfallanalyse für Kernanlagen:
Umfang, Methodik und Randbedingungen der technischen Störfallanalyse,
Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen, Richtlinie ENSI-A01, Ausgabe Juli 2009.

/23/ ENSI,
Quelltermanalyse: Umfang, Methodik und Randbedingungen,
Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen, Richtlinie ENSI-A08, Ausgabe Februar 2010.

/24/ ENSI,
Berechnung der Strahlenexposition in der Umgebung aufgrund von Emissionen radioaktiver Stoffe aus Kernanlagen,
Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen,
Richtlinie ENSI-G14, Ausgabe Februar 2008, Revision 1 vom 21. Dezember 2009.

/25/ ENSI,
Organisation von Kernanlagen,
Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen, Richtlinie ENSI-G07, Ausgabe Juli 2013.