

KTA 2201.1

Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen

Teil 1: Grundsätze

Fassung 2011-11

Frühere Fassungen dieser Regel: 1975-06 (Banz. Nr. 130 vom 19. Juli 1975)
1990-06 (Banz. Nr. 20a vom 30. Januar 1991)

Inhalt

	Seite
Grundlagen	2
1 Anwendungsbereich	2
2 Begriffe	2
3 Festlegung der Erdbebeneinwirkung	4
3.1 Allgemeine Anforderungen	4
3.2 Deterministische Bestimmung des Bemessungserdbebens	4
3.3 Probabilistische Bestimmung des Bemessungserdbebens	5
3.4 Festlegung des Bemessungserdbebens	5
3.5 Ingenieurseismologische Kenngrößen des Bemessungserdbebens	5
4 Allgemeine Anforderungen an die Nachweisführung	6
4.1 Auslegungsanforderungen	6
4.2 Einwirkungskombinationen	6
4.3 Nachweisverfahren	6
5 Seismische Instrumentierung und Inspektionsniveau	7
6 Maßnahmen nach Erdbeben	7
7 Auswirkungen auf den Standort	8
Anhang: Bestimmungen, auf die in dieser Regel verwiesen wird	8

Grundlagen

(1) Die Regeln des Kerntechnischen Ausschusses (KTA) haben die Aufgabe, sicherheitstechnische Anforderungen anzugeben, bei deren Einhaltung die nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erforderliche Vorsorge gegen Schäden durch die Errichtung und den Betrieb der Anlage getroffen ist (§ 7 Absatz 2 Nr. 3 Atomgesetz - AtG), um die im AtG und in der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) festgelegten sowie in den „Sicherheitskriterien“ und den „Störfall-Leitlinien“ weiter konkretisierten Schutzziele zu erreichen.

(2) Nach den „Sicherheitskriterien“ Kriterium 2.6 sind Schutzmaßnahmen, soweit sie in Betracht zu ziehen sind, gegen Einwirkungen von Erdbeben vorzusehen. Nach Tabelle I der „Störfall-Leitlinien“ gehören Erdbeben zu der Störfallgruppe, gegen die anlagentechnische Schadensvorsorge getroffen werden muss und die bezüglich ihrer radiologischen Auswirkungen auf die Umgebung relevant sind. Die Grundsätze dieser Vorsorge sind in der Regelreihe KTA 2201 festgelegt.

(3) Die Regel KTA 2201.1 der Reihe KTA 2201 "Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen" behandelt die Grundsätze für die Erdbebenauslegung von Kernkraftwerken. Zur Regelreihe gehören als weitere Teile:

Teil 2: Baugrund

Teil 3: Bauliche Anlagen

Teil 4: Anlagenteile

Teil 5: Seismische Instrumentierung

Teil 6: Maßnahmen nach Erdbeben

(4) Bei der Anwendung dieser Regel wird vorausgesetzt, dass der Standort hinsichtlich seiner Geologie und Tektonik, insbesondere bezüglich der Existenz von aktiven Verwerfungen und bleibenden Verschiebungen des Bodens untersucht wurde.

1 Anwendungsbereich

Diese Regel ist auf Kernkraftwerke mit Leichtwasserreaktoren anzuwenden.

Sie gilt der Auslegung von Anlagenteilen und baulichen Anlagen gegen Erdbebeneinwirkungen zur Erfüllung der Schutzziele

- Kontrolle der Reaktivität,
- Kühlung der Brennelemente,
- Einschluss der radioaktiven Stoffe und
- Begrenzung der Strahlenexposition.

2 Begriffe

(1) Anlagenteil

Anlagenteile sind elektro- oder maschinentechnische Einrichtungen, die die Nutzung der kerntechnischen Anlage ermöglichen.

Hinweis:

Diese Definition dient der Unterscheidung von „Anlagenteilen“ und „Baulichen Anlagen oder Bauwerken“.

(2) Antwortspektrum

Das Antwortspektrum ist die Darstellung der maximalen Amplituden (Betrag) der Schwingungen von gedämpften Einmassenschwingern (Beschleunigungen, Geschwindigkeiten, Verschiebungen) unterschiedlicher Eigenfrequenz und konstantem Dämpfungsgrad als Antwort auf eine Anregung beschrieben durch einen Zeitverlauf am Fußpunkt. Wenn nicht anders angegeben, ist das Antwortspektrum der Beschleunigung gemeint (spektrale Beschleunigungen). Als

Antwortspektrum wird hier das Antwortspektrum eines elastischen Schwingers verstanden, das keine Effekte duktiler Verformung enthält.

Hinweis:

Es wird bei der Erdbebenanalyse von Bauwerken unterschieden zwischen Bodenantwortspektren oder Freifeldantwortspektren (Primärspektren), Bauwerkantwortspektren (Sekundärspektren) und Komponentenantwortspektren (Tertiärspektren). In geglätteter und verbreiteter oder einhüllender Form werden sie der Bemessung zugrunde gelegt.

(3) Bauliche Anlagen

Bauliche Anlagen oder Bauwerke sind mit dem Erdboden verbundene, aus Bauprodukten (Baustoffe und Bauteile) hergestellte Anlagen.

Hinweis:

Für eine „Bauliche Anlage“ kann der Nachweis der Erdbebensicherheit sowohl im Ganzen als auch in Teilen („Bauteile“) erforderlich werden.

(4) Bauteil

Ein Bauteil ist in der Bautechnik ein Teil einer baulichen Anlage (eines Bauwerks).

Ein Bauteil ist in der Anlagentechnik der aus Erzeugnisformen hergestellte kleinste Teil einer Baugruppe.

(5) Bauwerkantwortspektrum

Das Bauwerkantwortspektrum ist das Antwortspektrum an einem Punkt oder auf einer Etage im Bauwerk (entspricht Etagenantwortspektrum).

(6) Bemessungserdbeben

Das Bemessungserdbeben ist das für die Auslegung gegen seismische Einwirkungen maßgebende Erdbeben. Auf der Grundlage des Bemessungserdbebens werden die ingenieurseismologischen Kenngrößen festgelegt. Unter Bemessungserdbeben können auch mehrere maßgebliche Beben oder die für die Auslegung maßgeblichen Bodenbewegungen am Standort der Anlage verstanden werden.

(7) Bodenantwortspektrum

Das Bodenantwortspektrum ist das aus einer Bodenbewegung abgeleitete Antwortspektrum für einen Bezugshorizont im Bodenprofil.

(8) Dämpfungsgrad

Der Dämpfungsgrad D (Lehrsches Dämpfungsmaß) ist ein dimensionsloser Kennwert eines (geschwindigkeitsproportional) gedämpften Schwingungssystems mit einem Freiheitsgrad. Der Dämpfungsgrad D ist wie folgt definiert:

$$D = \frac{c}{c_{\text{kritisch}}} \quad (2-1)$$

mit

c : Dämpfungskonstante,

c_{kritisch} : kritische Dämpfungskonstante

$$c_{\text{kritisch}} = 2 \cdot \sqrt{k \cdot m} \quad (2-2)$$

mit

k : Steifigkeit,

m : Masse.

Der Fall D gleich 1 kennzeichnet den aperiodischen Grenzfall und wird kritische Dämpfung genannt. Daher wird z. B. D gleich 0,05 als 5 % der kritischen Dämpfung bezeichnet.

(9) Deaggregation

Die Deaggregation (engl.) ist die innerhalb der Probabilistischen Seismischen Gefährdungsanalyse (PSGA) vorzunehmende

mende Bestimmung der Anteile, mit denen Erdbeben diskreter Epizentralintensitäts- oder Magnituden- und Entfernungsintervalle zur Gesamtgefährdung eines Standortes beitragen.

(10) Einwirkungen

Einwirkungen im Sinne dieser Regel sind mechanische Einwirkungen. Einwirkungen sind auf bauliche Anlagen und Anlagenteile einwirkende Kraft- und Verformungsgrößen. Diese können ständig vorhanden (z. B. Eigenlasten), veränderlich (z. B. Nutzlasten, Verkehrslasten, Wind) oder außergewöhnlich (z. B. Hochwasser, Erdbeben) sein.

(11) Einwirkungen von außen (EVA)

EVA sind außergewöhnliche naturbedingte (z. B. Hochwasser, Erdbeben) oder zivilisationsbedingte (z. B. Flugzeugabsturz, Explosionsdruckwelle) Einwirkungen von außen.

(12) Einwirkungen von innen (EVI)

EVI sind außergewöhnliche Einwirkungen resultierend aus anlageninternen Ereignissen (z. B. Differenzdrücke, Strahl- und Reaktionskräfte, anlageninterne Überflutung infolge Bruch oder Leck druckführender Komponenten, Lastabsturz).

(13) Energieinhalt

Der Energieinhalt eines Erdbebenzeitverlaufes ist definiert als Integral der Quadrate der Beschleunigungen über die Zeitdauer des Erdbebens.

(14) Energiekriterium

Unter dem 90-%-Energiekriterium (70-%-Energiekriterium) wird die Zeitdauer der Bodenbewegungen zwischen dem Erreichen von 5 % und 95 % (5 % und 75 %) des Energieinhalts verstanden.

(15) Epizentralintensität

Die Epizentralintensität ist die Intensität des Erdbebens im Epizentrum.

(16) Epizentrum

Das Epizentrum ist die lotrechte Projektion des Ortes des Bruchbeginns (Hypozentrum) eines Erdbebens auf die Erdoberfläche, Angabe durch geographische Koordinaten.

(17) Freifeldantwortspektrum

Das Freifeldantwortspektrum ist das Bodenantwortspektrum für einen Bezugshorizont im Baugrund, dessen Schwingungseigenschaften nicht durch Bauwerke beeinflusst werden.

Auch: Antwortspektrum des Bemessungserdbebens.

(18) Funktionsfähigkeit

Die Funktionsfähigkeit ist die Fähigkeit eines Systems oder einer Komponente, über die Tragfähigkeit und Integrität hinaus die vorgesehenen Aufgaben durch entsprechende mechanische oder elektrische Funktion zu erfüllen.

Hinweis:

Die Definition ist auf Anlagenteile bezogen. Für bauliche Anlagen ist der adäquate Begriff „Gebrauchstauglichkeit“.

(19) Gebrauchstauglichkeit

Die Gebrauchstauglichkeit ist die Fähigkeit von baulichen Anlagen, unter den zugrunde gelegten Einwirkungen die planmäßige Nutzung zu ermöglichen.

Hinweis:

Die Definition wird nur auf bauliche Anlagen bezogen. Für Anlagenteile ist der adäquate Begriff „Integrität“ oder „Funktionsfähigkeit“.

(20) Gefährdungskurve

Eine Gefährdungskurve ist die graphische Darstellung der jährlichen Wahrscheinlichkeit des Überschreitens eines ausgewählten Parameters der seismischen Einwirkung an einem Standort. Gefährdungskurven werden in der PSGA berech-

net. Als Parameter werden makroseismische Intensitäten oder Bodenbewegungen (spektrale Beschleunigungen, Maximalbeschleunigung) verwendet.

(21) Grenzfrequenz, obere

Die obere Grenzfrequenz ist diejenige Frequenz, oberhalb derer keine signifikante Vergrößerung der Erdbebenantwort mehr auftritt (Starrkörperbeschleunigung). Bei der oberen Grenzfrequenz erreichen Beschleunigungsantwortspektren die maximale Beschleunigung des zugehörigen Zeitverlaufs als Asymptote.

Hinweis:

In der Praxis gilt als obere Grenzfrequenz diejenige Frequenz, ab der das Beschleunigungsantwortspektrum das 1,1-fache der Starrkörperbeschleunigung nicht mehr überschreitet.

(22) Herdtiefe

Die Herdtiefe ist die Tiefe des Hypozentrums eines Erdbebens unter der Erdoberfläche.

(23) Hypozentrum

Das Hypozentrum ist der Punkt auf der Bruchfläche eines Erdbebens, an dem der Bruchprozess beginnt, beschrieben durch die Lage des Epizentrums und die Herdtiefe.

(24) Ingenieurseismologische Kenngrößen

Die ingenieurseismologischen Kenngrößen sind Antwortspektrum, Starkbewegungsdauer und weitere Parameter der Bodenbewegungen am Standort.

(25) Integrität

Integrität ist die Fähigkeit eines Anlagenteils, über die Tragfähigkeit hinaus den Anforderungen nach Dichtheit oder Verformungsbeschränkungen zu genügen.

Hinweis:

Die Definition ist auf Anlagenteile bezogen. Für bauliche Anlagen ist der adäquate Begriff „Gebrauchstauglichkeit“.

(26) Intensität

Die Intensität ist die Klassifizierung der Stärke der Bodenbewegung auf der Grundlage beobachteter Wirkungen in einem begrenzten Gebiet, wie z. B. einer Ortschaft. Als Grundlage der Intensitätsbestimmung dienen phänomenologisch beschriebene Wirkungen auf Menschen, Objekte und Bauwerke. Die Intensität ist ein robustes Maß der Stärkeklassifizierung, unterteilt in 12 Intensitätsgrade, die in makroseismischen Skalen (z. B. MSK-64, EMS-98) definiert sind.

(27) Korrelationskoeffizient

Der Korrelationskoeffizient ρ_{xy} zweier Erdbebenzeitverläufe $x(t)$ und $y(t)$ ist definiert als Kovarianz σ_{xy} bezogen auf die Standardabweichungen s_x und s_y der beiden Zeitreihen:

$$\rho_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{\{s_x \cdot s_y\}} \quad (2-3)$$

Der Korrelationskoeffizient kann Werte zwischen -1 und +1 annehmen, sein Wert beträgt Null, wenn kein linearer Zusammenhang zwischen $x(t)$ und $y(t)$ besteht.

(28) Magnitude

Die Magnitude ist ein von Charles Richter 1935 eingeführtes quantitatives Maß zur Stärkebestimmung von Erdbeben. Die Magnitude wird klassisch aus dem Logarithmus des maximalen Ausschlages von registrierten Seismogrammen unter Berücksichtigung der Entfernung zum Erdbebenherd bestimmt. Unterschieden werden u. a. Lokal-, Raumwellen-, Oberflächenwellen- und Momentmagnitude.

(29) Maximale Bodenbeschleunigung

Die maximale Bodenbeschleunigung ist die maximale Amplitude (Betrag) der horizontalen oder vertikalen Beschleuni-

gungskomponenten des Erdbebenzeitverlaufs (Seismogramm). Sie entspricht der Starrkörperbeschleunigung (peak ground acceleration – PGA) des Bodenantwortspektrums („Einhängewert“).

(30) Paläoseismologie

Die Paläoseismologie ist eine Methode zur Suche nach Anzeichen früherer Beben im geologischen Untergrund einschließlich der Abschätzungen derer Magnitude und Altersbestimmung der erdbebenbedingten Verschiebungen. Die Paläoseismologie dient der zeitlichen Erweiterung von Befunden zu Beben in die jüngste geologische Vergangenheit.

Hinweis:

Die Paläoseismologie beschränkt sich im Allgemeinen auf geologische Terrains kontinuierlicher Sedimentation der letzten Jahrzehnttausende.

(31) Seismische Quellregion

Die seismische Quellregion bezeichnet eine Fläche oder Linie, in der eine Gleichverteilung der Seismizität angenommen wird. Die Abgrenzung von seismischen Quellregionen erfolgt anhand der geologisch-tektonischen Entwicklung und der Seismizität.

(32) Seismogramm

Das Seismogramm ist eine Aufzeichnung der Bodenbewegung (proportional zu Verschiebung, Geschwindigkeit oder Beschleunigung) an einem Ort bei einem Erdbeben. Auch als Registrierung oder Zeitverlauf bezeichnet. Meistens in drei orthogonalen Komponenten aufgezeichnet, davon zwei in horizontaler Richtung.

(33) Seismotektonische Einheit (auch Seismotektonische Region)

Eine seismotektonische Einheit ist ein Gebiet, in dem Gleichartigkeit hinsichtlich der Erdbebenitätigkeit, der geologischen Struktur und Entwicklung und der tektonischen, insbesondere der neotektonischen Verhältnisse angenommen wird. Eine seismotektonische Einheit kann auch eine seismische Quellregion sein.

(34) Starkbewegungsdauer (auch Dauer der Starkbewegungsphase)

Die Starkbewegungsdauer wird definiert über die Zeitdauer, in der ein bestimmter Prozentsatz des Energieinhalts an einem Standort erreicht wird (z. B. das 90%-Energiekriterium).

(35) Starrkörperbeschleunigung

Die Starrkörperbeschleunigung ist die maximale Amplitude (Betrag) des dem Antwortspektrum zugrunde liegenden Beschleunigungszeitverlaufs; sie entspricht dem Wert des Antwortspektrums im hohen Frequenzbereich.

(36) Tektonik

Die Tektonik ist die Lehre vom Aufbau, den Kräften sowie den Bewegungen und Formveränderungen der Erdkruste und Teilen des Erdmantels. Die Tektonik umfasst globale, regionale und lokale Aspekte. Die Neotektonik befasst sich mit der Tektonik der jüngsten geologischen Vergangenheit (Quartär).

(37) Tragfähigkeit (Standicherheit)

Die Tragfähigkeit ist die Fähigkeit von baulichen Anlagen und Anlagenteilen, den zugrunde gelegten Einwirkungen durch Festigkeit, Stabilität und Lagesicherheit standzuhalten.

(38) Überschreitenswahrscheinlichkeit

Die Überschreitenswahrscheinlichkeit ist die Wahrscheinlichkeit, mit der an einem Standort innerhalb eines vorgegebenen Zeitraumes (üblicherweise 1 Jahr) eine bestimmte seismische Bodenbewegung (Maximalbeschleunigung, Spektralwerte der Beschleunigung, o. a.) oder Intensität erreicht oder überschritten wird. Der Kehrwert der jährlichen Über-

schreitenswahrscheinlichkeit wird auch als mittlere Wiederkehrperiode (return period) bezeichnet. Die graphische Darstellung der Überschreitenswahrscheinlichkeit ist die Gefährdungskurve.

(39) Unsicherheiten

In dieser Regel werden zwei Arten von Unsicherheiten betrachtet: epistemische und aleatorische Unsicherheiten. Die epistemische Unsicherheit bezeichnet die Unsicherheit infolge unvollständiger Kenntnis, z. B. von Modellen oder Parametern. Die epistemische Unsicherheit kann durch zusätzliche Daten, Informationen oder verbesserte Modellkenntnisse reduziert werden (z. B. Unsicherheit bei der Festlegung der Quellregionen). Die aleatorische Unsicherheit bezeichnet die Unsicherheit, die mit zufällig auftretenden Phänomenen oder Prozessen inhärent verbunden ist (z. B. Abnahme der Beschleunigungsamplituden mit der Entfernung). Die aleatorische Unsicherheit lässt sich nicht reduzieren.

(40) Vollständige quadratische Überlagerung (CQC)

Die vollständige quadratische Überlagerung (Complete Quadratic Combination CQC) ist eine auf stochastischer Basis beruhende modale Überlagerungsbeziehung für Schwingungssysteme, um die Kopplung von Eigenformen zu berücksichtigen.

(41) Zeitverlauf-Hüllfunktion

Die Zeitverlauf-Hüllfunktion beschreibt typische mittlere Einhüllende über die relevante Zeitdauer von Seismogrammen. Sie besteht aus einer Anstiegsphase, einer Starkbewegungsphase (siehe auch Starkbewegungsdauer) und einer Abklingphase und dient der Generierung von zu den seismischen Einwirkungen kompatiblen künstlichen Seismogrammen.

3 Festlegung der Erdbebeneinwirkung

3.1 Allgemeine Anforderungen

(1) Das Bemessungserdbeben wird beschrieben durch die seismischen Einwirkungen am Standort, die insbesondere durch die Intensität und die Bodenbewegungen charakterisiert werden. Das Bemessungserdbeben ist auf der Grundlage deterministischer und probabilistischer Analysen zu ermitteln und festzulegen. Dabei ist die Umgebung des Standortes bis mindestens 200 km Entfernung zu berücksichtigen wobei zu prüfen ist, ob Erkenntnisse vorliegen, die eine Einbeziehung darüber hinausgehender Entfernungen standortabhängig erforderlich macht.

(2) Für die deterministische Bestimmung des Bemessungserdbebens ist auf Grundlage aufgetretener Ereignisse ein Erdbeben mit den für den Standort größten anzunehmenden seismischen Einwirkungen zu Grunde zu legen, das nach wissenschaftlichen Erkenntnissen zu erwarten ist.

(3) Die probabilistische Bestimmung der Kenngrößen des Bemessungserdbebens ist für eine Überschreitenswahrscheinlichkeit von $10^{-5}/a$ vorzunehmen.

(4) Das Bemessungserdbeben ist unter Bewertung der deterministischen und probabilistischen Bestimmungen festzulegen. Die zugehörigen seismischen Einwirkungen dürfen jeweils für den 50%-Fraktilewert angegeben werden, wenn die Überschreitenswahrscheinlichkeit der Kenngrößen des Bemessungserdbebens bei $10^{-5}/a$ liegt.

(5) Das Bemessungserdbeben ist mindestens mit der Intensität VI festzulegen.

3.2 Deterministische Bestimmung des Bemessungserdbebens

(1) Grundlage für die deterministische Bestimmung des Bemessungserdbebens sind die stärksten Erdbeben, die unter

Berücksichtigung der in 3.1 (1) genannten Umgebung des Standortes aufgetreten sind. Paläoseismologische Befunde sind zu berücksichtigen.

Hinweis:

Die Stärke historischer Erdbeben wird in der Regel durch ihre Intensität beschrieben. Bezüglich besonders relevanter historischer Erdbeben mit unsicherer Datenlage kann es notwendig sein, zusätzliche Untersuchungen durchzuführen.

(2) Das Bemessungserdbeben ist deterministisch unter Berücksichtigung der geologischen und tektonischen Gegebenheiten wie folgt zu bestimmen, wobei die verwendeten seismotektonischen Einheiten zu begründen sind:

- a) Befindet sich das Epizentrum eines maßgebenden Erdbebens entsprechend Absatz 1 in der gleichen seismotektonischen Einheit wie der Standort, so ist anzunehmen, dass dieses Erdbeben in der Nähe des Standorts, Epizentralentfernung bis maximal 10 km, eintritt und am Standort die gleiche Intensität hervorruft.
- b) Befindet sich das Epizentrum eines maßgebenden Erdbebens entsprechend Absatz 1 in einer anderen seismotektonischen Einheit als der Standort, so ist anzunehmen, dass das Epizentrum eines gleichartigen Erdbebens an dem standortnächsten Punkt auf der Grenze der seismotektonischen Einheit liegt, in der es aufgetreten ist.

(3) Bei der Bestimmung des Bemessungserdbebens sind die Unsicherheiten der verwendeten Daten und Modelle sowie die Unvollständigkeit und Begrenztheit des Erdbebenkatalogs zu berücksichtigen.

Hinweis:

Dies erfolgt im Regelfall in Form eines Zuschlags zur Stärke der aufgetretenen Erdbeben.

3.3 Probabilistische Bestimmung des Bemessungserdbebens

(1) Mittels einer Probabilistischen Seismischen Gefährdungsanalyse (PSGA) sind die jährlichen Überschreitenswahrscheinlichkeiten seismischer Einwirkungen am Standort sowie die Unsicherheiten dieser Angaben zu bestimmen.

(2) Alle Elemente der PSGA sind in geeigneter Form zu beschreiben und zu dokumentieren. Die Elemente der PSGA umfassen die verwendeten Erdbebenkataloge, die seismischen Quellregionen mit ihren charakteristischen Kenngrößen, Dämpfungsfunktionen sowie den Einfluss des lokalen geologischen Untergrundes, die Vorgehensweisen und Methoden.

(3) Die Unsicherheiten der verwendeten Daten, Modelle und Methoden sind zu berücksichtigen. Ihr Einfluss auf das Ergebnis ist zu bestimmen und zu bewerten.

(4) Gefährdungskurven sind für Überschreitenswahrscheinlichkeiten von $10^{-2}/a$ bis $10^{-6}/a$ einschließlich ihrer Fehlerbandbreiten darzustellen.

(5) Eine Deaggregation ist durchzuführen. Hierzu ist der Beitrag verschiedener Erdbebenstärken (Magnituden, Epizentralintensitäten), Entfernungsbereiche und seismischer Quellregionen auf die gesamte Gefährdung insbesondere für die Überschreitenswahrscheinlichkeit $10^{-5}/a$ zu bestimmen und anzugeben.

3.4 Festlegung des Bemessungserdbebens

(1) Die Ergebnisse der deterministischen und der probabilistischen Bestimmungen sind zu vergleichen. Insbesondere sind die aus den jeweiligen Bestimmungen ermittelten ingenieurseismologischen Kenngrößen gegenüberzustellen.

(2) Plausibilität, Belastbarkeit und Aussagesicherheit der Ergebnisse aus den deterministischen und probabilistischen Bestimmungen sind zu bewerten.

(3) Auf der Basis der als plausibel, belastbar und aussagesicher bewerteten Ergebnisse der deterministischen und probabilistischen Bestimmungen ist das Bemessungserdbeben festzulegen und zu begründen.

(4) Für das Bemessungserdbeben sind die Intensität und entsprechend den zugehörigen seismotektonischen Bedingungen auch maßgebende Magnituden-, Entfernungsbereiche und Herdtiefenbereiche zur Ermittlung der ingenieurseismologischen Kenngrößen anzugeben.

3.5 Ingenieurseismologische Kenngrößen des Bemessungserdbebens

(1) Für den Nachweis der Erdbebensicherheit von baulichen Anlagen und Anlagenteilen sind die Erdbebeneinwirkungen durch ingenieurseismologische Kenngrößen, insbesondere Bodenantwortspektren mit den zugehörigen Starrkörperbeschleunigungen (maximale Bodenbeschleunigungen) und die Starkbewegungsdauer, zu beschreiben.

(2) Für die Bestimmung der ingenieurseismologischen Kenngrößen dürfen magnituden- und entfernungs-basierte Erdbebenregistrierungen oder empirische Beziehungen verwendet werden.

(3) Die Bodenantwortspektren sind als Freifeldantwortspektren für einen standortbezogen einheitlichen Bezugshorizont des Baugrunds anzugeben. Das zugehörige Bodenprofil des geologischen Untergrundes und des Baugrundes mit den dynamischen Bodenkennwerten in ihren Streubreiten ist zu berücksichtigen.

Hinweis:

Der Bezugshorizont ist üblicherweise die Geländeoberkante, er kann in begründeten Fällen aber auch eine Schichtgrenze einer ausreichend steifen Bodenschicht oder die Felsoberfläche sein.

(4) Es ist jeweils ein Bodenantwortspektrum für die beiden als gleich groß angenommenen horizontalen Komponenten und eines für die vertikale Komponente der Erdbebenanregung festzulegen. Das Antwortspektrum für die horizontale resultierende Erdbebenanregung darf so festgelegt werden, dass das Antwortspektrum für eine horizontale Komponente mit dem Faktor 1,2 multipliziert wird. Liegen keine seismologischen Angaben zur Vertikalkomponente vor, so ist diese mit $2/3$ einer Horizontalkomponente anzusetzen. Beide Horizontalkomponenten und die Vertikalkomponente sind als gleichzeitig wirkend anzunehmen.

(5) Die Bodenantwortspektren sind im Frequenzbereich von 0,2 Hz bis zu einer oberen Grenzfrequenz, d. h. bis zum Beginn der Starrkörperbeschleunigung, die von den Untergrundverhältnissen am Standort abhängt, anzugeben.

(6) Die Bodenantwortspektren sind für 5 % der kritischen Dämpfung anzugeben. Die Umrechnung des 5-%-Spektrums (D gleich 0,05) auf Spektren mit anderen Dämpfungsgraden D darf im ansteigenden Spektralbereich, beginnend bei kleinen Frequenzen, und im Überhöhungsbereich des Spektrums mit dem Faktor $\sqrt{7/(2+D \cdot 100)}$ und auf den Faktor 1 zum Starrkörperbereich übergehend erfolgen.

(7) Die Starkbewegungsdauer für das Bemessungserdbeben ist unter Nennung des verwendeten Energiekriteriums einschließlich der Zeitverlauf-Hüllfunktion zur Ermittlung synthetischer Seismogramme anzugeben.

(8) Wurden registrierte Beschleunigungszeitverläufe zur Bestimmung der ingenieurseismologischen Kenngrößen herangezogen, so sind diese vollständig anzugeben.

(9) Es sind registrierte Beschleunigungszeitverläufe für Strukturberechnungen anzugeben, deren charakteristische Kenngrößen wie Antwortspektrum, Starkbebedauer und Energieinhalt denen des Bemessungserdbebens ähneln.

Hinweis:

Eine Skalierung von Zeitverläufen mit dem Faktor ca. 0,5 bis 2,0 ist möglich.

4 Allgemeine Anforderungen an die Nachweisführung

Hinweis:

Im Folgenden ist unter Erdbeben das Bemessungserdbeben gemeint.

4.1 Auslegungsanforderungen

4.1.1 Klassifizierung

Die Anlagenteile und die baulichen Anlagen sind hinsichtlich der Erdbebenauslegung in drei Klassen zu unterteilen:

Klasse I

Anlagenteile und bauliche Anlagen, die zur Erreichung der unter Abschnitt 1 genannten Schutzziele und zur Begrenzung der Strahlenexposition erforderlich sind.

Klasse IIa

Anlagenteile und bauliche Anlagen, die nicht zur Klasse I gehören, die aber durch bei einem Erdbeben an ihnen möglicherweise entstehenden Schäden und deren Folgewirkungen Anlagenteile oder bauliche Anlagen der Klasse I in ihrer sicherheitstechnischen Funktion beeinträchtigen können.

Klasse IIb

Alle sonstigen Anlagenteile und baulichen Anlagen.

4.1.2 Nachweis der Erdbebensicherheit

(1) Anlagenteile und bauliche Anlagen der Klasse I sind hinsichtlich ihrer

- a) Tragfähigkeit
- b) Integrität
- c) Funktionsfähigkeit

so nachzuweisen, dass sie ihre jeweilige sicherheitstechnische Aufgabe im Falle eines Erdbebens erfüllen.

Hinweis:

Zur Erfüllung dieser Anforderungen können für bauliche Anlagen zusätzliche Nachweise (z. B. Verformungs- und Rissbreitenbegrenzungen) erforderlich werden.

(2) Für Anlagenteile und bauliche Anlagen der Klasse IIa ist nachzuweisen, dass Anlagenteile und bauliche Anlagen der Klasse I bei Erdbeben nicht so beeinträchtigt werden, dass diese ihre sicherheitstechnischen Aufgaben nicht mehr erfüllen.

(3) Anlagenteile und bauliche Anlagen der Klasse IIb müssen nicht gegen das Bemessungserdbeben nach dieser Regel ausgelegt werden.

4.2 Einwirkungskombinationen

(1) Für den Nachweis der Erdbebensicherheit der Anlagenteile und baulichen Anlagen sind Erdbebeneinwirkungen mit ständigen und veränderlichen Einwirkungen nach den anlagenspezifisch festgelegten Auslegungsanforderungen und den fachspezifischen Regeln zu kombinieren.

(2) Erdbebenbedingte Folgeeinwirkungen sind zu berücksichtigen.

(3) Kombinationen von Erdbebeneinwirkungen mit anderen unabhängigen Einwirkungen von außen oder innen sind dann zu unterstellen, wenn ihr gleichzeitiges Eintreten auf Grund von Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen unterstellt werden muss.

Hinweis:

Kombinationen von Erdbebeneinwirkungen mit Hochwasserereignissen werden in KTA 2207 und mit Brandereignissen in KTA 2101.1 behandelt.

4.3 Nachweisverfahren

4.3.1 Allgemeines

(1) Zum Nachweis der Erdbebensicherheit von Anlagenteilen und baulichen Anlagen sind rechnerische Nachweise, experimentelle Nachweise, Analogienachweise oder Plausibilitätsnachweise durchzuführen.

(2) Die Anregung ist entweder in drei orthogonalen Richtungen als gleichzeitig wirkend oder getrennt nach den drei Richtungen anzusetzen oder es ist jeweils eine resultierende horizontale und die vertikale Anregung anzusetzen.

(3) Die Überlagerung gleichgerichteter Beanspruchungsgrößen aus verschiedenen Erregungsrichtungen darf nach der Wurzel aus der Summe der Quadrate erfolgen. Alternativ dazu dürfen alle drei der folgenden Kombinationen zur Berechnung der Beanspruchungsgrößen verwendet werden:

- a) $1,0 E_x \oplus 0,3 E_y \oplus 0,3 E_z$
- b) $0,3 E_x \oplus 1,0 E_y \oplus 0,3 E_z$
- c) $0,3 E_x \oplus 0,3 E_y \oplus 1,0 E_z$

wobei $\oplus$ „zu kombinieren mit“ bedeutet und E_x , E_y und E_z die Beanspruchungsgrößen infolge der Erdbebeneinwirkung in den Richtungen x, y und z bedeuten.

(4) Die sich aus der Einwirkungskombination nach 4.2 ergebenden Beanspruchungen sind den entsprechenden Grenzzuständen der Tragfähigkeit, Integrität und Funktionsfähigkeit gegenüberzustellen.

Hinweis:

Einzelheiten dazu enthalten KTA 2201.3 und KTA 2201.4 sowie die komponentenspezifischen KTA-Regeln.

4.3.2 Modellbildung

(1) Für die dynamische Berechnung sind das Bauwerk einschließlich Baugrund sowie die Anlagenteile mit ihren Stützkonstruktionen durch mathematisch-mechanische Modelle abzubilden, die in der Lage sind, das Strukturverhalten in dem bei Erdbeben maßgebend angeregten Frequenzbereich zu beschreiben.

(2) Die für die Modellbildung erforderlichen Parameter und Randbedingungen (z. B. Steifigkeit, Massen und Dämpfungsgrade) sind abhängig von den Nachweiszielen zu wählen.

Hinweis:

Entsprechende Vorgaben sind für bauliche Anlagen in KTA 2201.3 und für Anlagenteile in KTA 2201.4 enthalten.

(3) Bei einer Modellbildung durch äquivalente biege- und Schubelastische Balken sind maßgebliche Torsionseinflüsse aus Exzentrizitäten zwischen Massenschwerpunkten und Steifigkeitsmittelpunkten zu berücksichtigen. Ferner sind vorhandene Nachgiebigkeiten von Einzelbauteilen, die in einem Balkenmodell nicht erfasst sind und bei Erdbeben einen relevanten Einfluss auf deren Strukturverhalten oder daran befestigter Anlagenteile haben, beim Nachweis der Bau- und Anlagenteile zu berücksichtigen.

(4) In einem räumlichen Flächentragwerksmodell für ein Bauwerk mit hinreichend detaillierter Abbildung aller relevanten Einzelbauteile sind die Entkopplungskriterien Bauteil oder Anlagenteil besonders zu beachten.

Hinweis:

Einzelheiten hierzu sind in KTA 2201.3 geregelt.

(5) Strukturen dürfen unterteilt oder als entkoppelt betrachtet werden, wenn die Wechselwirkung zwischen den Teilstrukturen berücksichtigt wird oder das Schwingungsverhalten und die Beanspruchungen nicht unzulässig verändert werden.

(6) Bei der Massenzusammenstellung für Rechenmodelle zur dynamischen Berechnung von Bauwerken und Anlagenteilen ist vom Normalbetrieb auszugehen. Massen aus veränderlichen Einwirkungen dürfen bei der globalen Bauwerksberechnung mit 1/4 berücksichtigt werden, sofern an anderer Stelle keine genaueren Regelungen getroffen sind.

Hinweis:

Genauere Regelungen können z. B. KTA 2201.3 entnommen werden.

Sind andere Betriebszustände über mehr als 30 Tage pro Jahr mit signifikant anderer Massenbelegung vorhanden, so ist der Einfluss der unterschiedlichen Massenbelegung zu bewerten. Erforderlichenfalls sind Modellvarianten zu untersuchen und die Ergebnisse einzuhüllen.

(7) Der Einfluss der Wechselwirkung zwischen Bauwerk und Baugrund (Boden-Bauwerk-Wechselwirkung) ist zu erfassen.

(8) Die Bodenkennwerte sind in einem angemessenen Bereich zu variieren. Wenn keine Angaben vorliegen, soll zur Abdeckung von Unschärfen der Bodenparameter und der Modellbildung der mittlere Wert der Baugrundsteifigkeit um einen Faktor 1,5 nach oben und unten variiert werden. Die Ergebnisse der Berechnung mit unterer, mittlerer und oberer Baugrundsteifigkeit sind einzuhüllen.

Hinweis:

Eine Variation um den Faktor 1,5 deckt in der Regel auch die gegenseitige Beeinflussung benachbarter Gebäude über den Baugrund (Bauwerk-Boden-Bauwerk-Wechselwirkung) ab. Nähere Angaben enthalten KTA 2201.2 und KTA 2201.3.

(9) Die Dämpfung der Strukturen darf als viskose (geschwindigkeitsproportionale) Dämpfung angesetzt werden. Die Dämpfungsgrade D sind für die Nachweise der Baustrukturen, für die Berechnung von Bauwerkantwortspektren und für die Nachweise der Anlagenteile anwendungsbezogen anzunehmen.

Hinweis:

Die Dämpfungsgrade sind KTA 2201.3 und KTA 2201.4 zu entnehmen.

4.3.3 Beschleunigungszeitverläufe

(1) Für Zeitverlaufsrechnungen sind in der Regel künstliche Beschleunigungszeitverläufe zu verwenden, deren Antwortspektren mit dem Bodenantwortspektrum nach 3.5 kompatibel sind. Alternativ dürfen registrierte Beschleunigungszeitverläufe nach 3.5 (8) verwendet werden.

(2) Zeitverläufe sind mit dem Bodenantwortspektrum nach 3.5 als kompatibel anzusehen, wenn das für den Dämpfungsgrad D gleich 0,05 berechnete Antwortspektrum an nicht mehr als 10 % der Kontrollfrequenzen das Zielspektrum um höchstens 10 % unterschreitet.

(3) Bei linearen Berechnungen von Anlagenteilen und baulichen Anlagen sind mindestens 3 statistisch unabhängige Beschleunigungszeitverläufe zu verwenden. Aus diesen sind durch Vertauschung mindestens 3 Belastungssituationen zu bilden, die nacheinander auf die Struktur anzusetzen sind. Die Ergebnisse der Berechnungsdurchgänge dürfen gemittelt werden.

(4) Bei nichtlinearen Berechnungen von Anlagenteilen und baulichen Anlagen sind mindestens 7 statistisch unabhängige künstliche Zeitverläufe zu verwenden und zu kombinieren. Eine geringere Zahl von Kombinationen ist zulässig, wenn dies begründet wird. Die Ergebnisse der Berechnungsdurchgänge sind einzuhüllen.

(5) Künstliche Zeitverläufe dürfen als statistisch unabhängig angesehen werden, wenn der Betrag des Korrelationskoeffi-

zienten für je zwei Zeitverläufe kleiner als 0,3 und der Mittelwert der Beträge aller Korrelationskoeffizienten kleiner als 0,2 sind.

(6) Für die Berechnung der Anlagenteile dürfen auch die Antwortzeitverläufe der Bauwerksberechnung verwendet werden.

(7) Alternativ zu künstlichen Zeitverläufen dürfen registrierte Beschleunigungszeitverläufe aus 3.5 (8) verwendet werden, wobei mindestens 5 Zeitverläufe anzusetzen sind. Dabei sollen die Antwortspektren aus diesen Zeitverläufen im für die berechnete Struktur maßgebenden Frequenzbereich mit dem Bodenantwortspektrum kompatibel sein. Die Ergebnisse der Berechnungsdurchgänge dürfen bei linearen Berechnungen gemittelt werden.

4.3.4 Berechnungsverfahren

(1) Als Berechnungsverfahren sind in der Regel dynamische Berechnungsverfahren (Spektrrenverfahren, lineare und nicht-lineare Zeitverlaufverfahren, Frequenzgangverfahren) zu verwenden. Vereinfachte Berechnungen (z. B. quasistatische Verfahren) sind zulässig.

(2) Werden lineare modale Rechenverfahren verwendet, so ist bei der Überlagerung der modalen Anteile deren Phasenlage zu berücksichtigen. Beim modalen Spektrrenverfahren erfolgt dies grundsätzlich mittels der vollständigen quadratischen Überlagerung (CQC). In begründeten Fällen dürfen auch andere Überlagerungsarten (z. B. Wurzel aus der Quadratsumme) angewendet werden.

(3) Bauwerkantwortspektren sind unter Berücksichtigung von 4.3.2 zu ermitteln. Die Frequenzschrittweite soll je Oktave maximal 1/50 der Oktaven-Untergrenze, jedoch nicht weniger als 0,02 Hz betragen.

(4) Berechnungsergebnisse sind hinsichtlich der Auswirkung unsicherer Eingangsdaten zu bewerten. Erforderlichenfalls sind hierfür Sensitivitätsuntersuchungen durchzuführen. Dies gilt in besonderem Maße für nichtlineare Berechnungen.

5 Seismische Instrumentierung und Inspektionsniveau

(1) Es ist eine seismische Instrumentierung zu installieren, die in der Lage ist, die Überschreitung von Beschleunigungsgrenzwerten für das Inspektionsniveau der Anlage anzuzeigen. Darüber hinaus muss die Instrumentierung einen Vergleich der aus den registrierten Erdbebenzeitverläufen ermittelten Antwortspektren mit den dem Inspektionsniveau zugrunde liegenden Antwortspektren ermöglichen.

(2) Das Inspektionsniveau der Anlage entspricht den 0,4-fachen Starrkörperbeschleunigungen und den mit dem Reduktionsfaktor 0,4 skalierten Boden- oder Bauwerkantwortspektren des Bemessungserdbebens. Ein höheres Inspektionsniveau ist zulässig, wenn der Nachweis geführt wurde, dass der bestimmungsgemäße Betrieb der Anlage auch nach dem Auftreten eines Erdbebens dieser Höhe möglich ist.

Hinweis:

Einzelheiten zur seismischen Instrumentierung enthält KTA 2201.5. Näheres zum Inspektionsniveau siehe KTA 2201.6.

6 Maßnahmen nach Erdbeben

Nach Registrierung eines Erdbebens durch die seismische Instrumentierung in der Anlage ist eine Anlagenkontrolle durchzuführen. Nach einer Überschreitung von Beschleunigungsgrenzwerten des Inspektionsniveaus sind zur Beurteilung der Erdbebenauswirkungen im Hinblick auf den Weiterbetrieb weitergehende Untersuchungen zu den aufgetretenen Beanspruchungen erforderlich. Bei einer maßgeblichen Überschreitung des Inspektionsniveaus oder wenn sich die Anlage nicht mehr im bestimmungsgemäßen Zustand befindet, ist die Anlage abzufahren.

Hinweis:

Einzelheiten zu Maßnahmen nach Erdbeben enthält KTA 2201.6.

Erdrutsche, Setzungen) oder der Umgebung (z. B. Damm- oder Deichbrüche, Zerstörungen von Ver- und Entsorgungsleitungen) oder Bodenversätze infolge von Erdbeben dürfen die Erfüllung der sicherheitstechnischen Schutzziele nicht unzulässig beeinträchtigen.

7 Auswirkungen auf den Standort

Die Auswirkungen des Bemessungserdbebens auf den Baugrund und die Umgebung des Standortes sind zu betrachten. Veränderungen des Baugrundes (z. B. Bodenverflüssigung,

Hinweis:

Einzelheiten zu Veränderungen des Baugrundes enthält KTA 2201.2.

Anhang**Bestimmungen, auf die in dieser Regel verwiesen wird**

(Die Verweise beziehen sich nur auf die in diesem Anhang angegebene Fassung. Darin enthaltene Zitate von Bestimmungen beziehen sich jeweils auf die Fassung, die vorlag, als die verweisende Bestimmung aufgestellt oder ausgegeben wurde.)

AtG		Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz - AtG) in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 31. Juli 2011 (BGBl. I S. 1704) geändert worden ist
StrlSchV		Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung – StrlSchV) vom 20. Juli 2001 (BGBl. I S. 1714; 2002 I S. 1459), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 4. Oktober 2011 (BGBl. I S. 2000) geändert worden ist
Sicherheitskriterien	(1977-10)	Sicherheitskriterien für Kernkraftwerke vom 21. Oktober 1977 (BANz. Nr. 206 vom 3. November 1977)
Störfall-Leitlinien	(1983-10)	Leitlinien zur Beurteilung der Auslegung von Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktoren gegen Störfälle im Sinne des § 28 Abs. 3 StrlSchV (Störfall-Leitlinien) vom 18. Oktober 1983 (Beilage zum BANz. Nr. 245 vom 31. Dezember 1983)