

Mindestwert von 0,1g (ca. 1,0 m/s²) für die maximale horizontale Bodenbeschleunigung bei Erdbeben

INHALT

1	Anlass der Beratung	2
2	Beratungsgang	2
3	Sachstand	3
4	Beantwortung der Fragen des BMU	4
5	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	9
	Unterlagen	11
	Anhang A: Begriffsdefinitionen	13

1 Anlass der Beratung

Als Ergebnis des EU (ENSREG) Stresstests hat das Stress Test Peer Review Board¹ folgende Empfehlungen für die deutschen Anlagen formuliert:

“The PGA² values obtained for specific sites vary between 0.05 g and 0.21 g. For some sites, the PGA values are therefore below the IAEA SSG-9 recommended value of 0.1 g, which is explained by German experts to be due to the use of site specific response spectra. Nevertheless, the reviewers recommend that the German regulatory authority should consider the possible safety impact of using PGA that is below the internationally recommended value.”

Daraufhin bat das BMU den RSK-Ausschuss ANLAGEN- UND SYSTEMTECHNIK (AST) mit Schreiben RS I 3 – 13042-3/2, RS I 5 – 13043/03.01 vom 08.11.2012 um die Beratung folgender Fragen:

- 1 Welche sicherheitstechnischen Auswirkungen ergeben sich aus der Unterschiedlichkeit der beiden Herangehensweisen bei der Bestimmung der Mindestauslegung gegenüber Erdbeben, und zwar zum einen auf der Basis von IAEA NS-G-1.6 (2003) und SSG-9 (2010), zum anderen auf Basis der deutschen kerntechnischen Regeln (KTA 2201.1 Fassung 2011, Fassung 1990, Fassung 1975)?
- 2 Inwieweit stimmt die von der IAEA in SSG-9 (2010) definierte und in NS-G-1.6 (2003) verwendete Peak Ground Acceleration (PGA) überein, mit der in der KTA 2201.1 Fassungen 1975, 1990, 2011 als auch mit der Dokumentation der KTA 2201.1 Fassung 2011 jeweils beschriebenen Maximalbeschleunigung?
- 3 Werden durch diese drei hier in Bezug genommenen Herangehensweisen zumindest im Ergebnis äquivalente Mindestauslegungen erreicht und welche Schwankungsbreiten der Ergebnisse lassen sich jeweils ausweisen?
- 4 Wie lassen sich Bewertungen zur Mindestauslegung basierend auf dem bisherigen auf Beschleunigungswerten beruhendem Vorgehen in Deutschland (KTA 2201.1 Fassung 1975 und Fassung 1990) methodisch und im Ergebnis übertragen auf das intensitätsbasierte Vorgehen (KTA 2201.1 Fassung 2011)?

2 Beratungsgang

Der Ausschuss AST trat in seiner 84. Sitzung in die Beratung der o. g. Thematik ein, wurde über die der Erdbebenauslegung der Anlagen zugrunde liegenden Bodenantwortspektren und am Beispiel eines Erdbebenzeitverlaufes über die maximale Bodenbeschleunigung bzw. den PGA-Wert informiert und erhielt den diesbezüglichen Beratungsauftrag des BMU. In seiner 85. Sitzung am 20.12.2012 trat der Ausschuss in die Beratung des von einer Redaktionsgruppe vorbereiteten Entwurfs einer Stellungnahme ein. Er setzte die Beratung in seiner 87. Sitzung fort und schloss diese in seiner 87. Sitzung am 14.02.2013 ab. Die RSK beriet die Stellungnahme in ihrer 456. Sitzung am 21.03.2013 und verabschiedete sie in der 457. Sitzung am 11.04.2013.

¹ ENSREG, Post Fukushima Accident, Stress Test Peer Review Board, Peer review report, Stress tests performed on European nuclear power plants, Germany

² Peak Ground Acceleration

3 Sachstand

Der von der ENSREG angesprochene Begriff der maximalen horizontalen Bodenbeschleunigung bzw. PGA-Wert ist die maximale Amplitude eines Erdbebenzeitverlaufes (Seismogramm). Sie entspricht im Bodenantwortspektrum (Erläuterung im Zusammenhang mit Frage 2 des BMU) dem Wert im hohen Frequenzbereich (Starrkörperbeschleunigung). Das Bodenantwortspektrum (Beschleunigung in Abhängigkeit der Frequenz) liegt als seismische Lastannahme den ingenieurtechnischen Nachweisen der Erdbebensicherheit von Bauwerken und Anlagenteilen zugrunde.

Die IAEA sieht im Specific Safety Guide SSG-9 [1], in den Safety Guides No. NS-G-3.3 [6] und NS-G-1.6 [7] sowie im Safety Report No. 28 [12] im Rahmen der seismischen Auslegung neuer Anlagen bzw. der seismischen Nachbewertung existierender Anlagen die Verwendung eines Mindestwertes von 0,1 g für die maximale horizontale Bodenbeschleunigung vor. Diese Vorgabe soll Unsicherheiten in der seismologischen Standortbeurteilung berücksichtigen.

Nach der aktuellen deutschen Erdbebenregel KTA 2201.1 [2] ist als Mindestauslegung einer Anlage gegen seismische Einwirkungen ein Erdbeben der Intensität VI anzunehmen. Diese Festlegung entspricht den RSK-Empfehlungen zur Überarbeitung der KTA-Regel 2201.1 vom 27.05.2004 [4], wonach auch in Gebieten geringer Seismizität das Bemessungserdbeben so festgelegt werden sollte, dass die seismischen Einwirkungen mindestens der Intensität VI entsprechen. Die Intensität beschreibt die Stärke der Bodenbewegung auf der Grundlage beobachteter Wirkungen auf Menschen, Gebäude oder die Erdoberfläche in einem begrenzten Gebiet (z. B. nach der MSK- oder EMS-Skala). In Deutschland wurde anstelle einer Mindestbeschleunigung eine Mindestintensität festgelegt, da diese ein geeignetes integrales Maß für die Erdbebengefährdung darstellt. Aufgrund der guten Datenbasis und der geringen Seismizität in Deutschland wurde eine Mindestintensität vorgegeben, die im hohen Frequenzbereich zu geringeren Mindestbeschleunigungen führt, als die IAEA sie vorgibt. Unsicherheiten bei der Bestimmung des Bemessungserdbebens werden nach der KTA-Regel 2201.1 ebenfalls berücksichtigt, in der Regel in Form eines Zuschlags auf die ermittelte Stärke des Erdbebens.

Die PGA-Werte standortspezifisch ermittelter Bodenantwortspektren können in Deutschland aufgrund der hier vorliegenden Seismizität auch kleiner als 1,0 m/s² sein (vgl. Tab. 2-1 des BMU-Reports zum EU-Stresstest [9]). An acht der 12 KKW-Standorte in Deutschland beträgt die in seismologischen Gutachten ermittelte max. horizontale Bodenbeschleunigung für das Bemessungserdbeben bei einer Überschreitenswahrscheinlichkeit von $\leq 10^{-5}/a$ (1 Mal in 100.000 Jahren) weniger als 1 m/s², an den norddeutschen Standorten z. T. 0,5 m/s².³

Im Rahmen des Peer Reviews zu den deutschen Stresstest-Berichten wurden Begründungen für den in Deutschland verfolgten Weg des Ansatzes einer Mindestintensität und für die Nicht-Anwendung einer Mindestbeschleunigung gemäß IAEA SSG-9 eingebracht. Das Review hat ungeachtet dessen die Betrachtung der sicherheitstechnischen Auswirkungen (Safety Impacts) unter Ansatz einer Beschleunigung von 0,1 g empfohlen.

³ Für die norddeutschen Standorte liegt die seismische Standortgefährdung für eine Überschreitenswahrscheinlichkeit von $10^{-4}/a$ (84 %-Fraktile) bzw. $10^{-5}/a$ (Median) zumindest teilweise unter 0,5 m/s². Die als Bemessungsgrundlage gewählten 0,5 m/s² ergeben sich erst aus der Mindestauslegungsanforderung der „alten“ KTA 2201.1 (1990 und früher).

Um der Empfehlung des Peer Reviews nachzukommen, werden daher im Folgenden im Rahmen der Beantwortung der BMU-Fragen bestehende Unterschiede zwischen den Anforderungen der IAEA und des deutschen Regelwerks hinsichtlich der Erdbebeneinwirkungen dargelegt und unter Berücksichtigung der vorhandenen Auslegung (Lastseite, Widerstandsseite, gesamte Nachweiskette) die daraus resultierenden Auswirkungen im Hinblick auf die Anlagensicherheit bewertet.

4 Beantwortung der Fragen des BMU

Aufgrund ihrer Beratung beantwortet die RSK die Fragen des BMU wie folgt in einer geänderten Reihenfolge:

1 Inwieweit stimmt die von der IAEA in SSG-9 (2010) definierte und in NS-G-1.6 (2003) verwendete Peak Ground Acceleration (PGA) überein, mit der in der KTA 2201.1 Fassungen 1975, 1990, 2011 als auch mit der Dokumentation der KTA 2201.1 Fassung 2011 jeweils beschriebenen Maximalbeschleunigung? (BMU-Frage 2)

In IAEA SSG-9 (2010) [1] wird die Peak Ground Acceleration (PGA) einerseits definiert als der Betrag der maximalen Amplitude der Bodenbeschleunigung, wie sie in einem Seismogramm (Akzelerogramm) aufgezeichnet wird, andererseits als die größte von einem Erdbeben verursachte Bodenbeschleunigung an dem Standort. In einem Seismogramm wird die aufgetretene Bodenbeschleunigung über der Zeit typischerweise in zwei orthogonalen horizontalen (häufig in NS- und OW-Richtung) und einer vertikalen Richtung aufgezeichnet. Zur Charakterisierung der Stärke eines Erdbebens wird die max. Bodenbeschleunigung üblicherweise als Vielfaches der Erdbeschleunigung in g (z. B. 0,1 g entsprechend ca. 1,0 m/s²) angegeben und meistens nur die für die in der Regel maßgebende horizontale Komponente (PHGA). Der PGA-Wert ist damit einer der beiden horizontalen Beschleunigungskomponenten zugeordnet. Nach Auffassung der RSK ist der PGA-Wert in IAEA SSG-9 in dieser Weise zu verstehen.

Die beiden horizontalen Beschleunigungskomponenten können auch zu einer Resultierenden zusammengefasst werden. Die resultierende horizontale Bodenbeschleunigung unterscheidet sich betragsmäßig vom Wert der Maximalbeschleunigung der horizontalen Einzelkomponenten. Da die resultierende horizontale Bodenbeschleunigung erfahrungsgemäß unter dem theoretischen Maximalwert von 1,41 x PGA liegt (die Maximalwerte der beiden horizontalen Einzelkomponenten treten erfahrungsgemäß nicht zur gleich Zeit auf), ist es bei Verwendung einer resultierenden horizontalen Bodenbeschleunigung notwendig, über einen Resultierendenfaktor den rechnerischen Zusammenhang zwischen der Einzelkomponente und der resultierenden Horizontal-komponente festzulegen.

Aus dem in einem Seismogramm aufgezeichneten Erdbeben-Beschleunigungszeitverlauf kann ein Antwortspektrum bestimmt werden. Dazu werden die maximalen Amplituden (Betrag) der Schwingungen von gedämpften Einmassenschwingern unterschiedlicher Eigenfrequenz und konstantem Dämpfungsgrad als Antwort auf eine Anregung am Fußpunkt des Einmassenschwingers durch den Erdbeben-Zeitverlauf über der Eigenfrequenz der Einmassenschwinger aufgetragen.

In einem solchen Antwortspektrum der Beschleunigung entspricht der Wert im hohen Frequenzbereich der maximalen Amplitude (Betrag) des dem Antwortspektrum zugrunde liegenden Beschleunigungszeitverlaufs,

also dem PGA-Wert. Dieser Wert wird in der KTA 2201.1, Fassung 2011 [2] auch als „Starrkörperbeschleunigung“ oder „Maximale Bodenbeschleunigung“ bezeichnet. Der Begriff der Starrkörperbeschleunigung oder maximalen Bodenbeschleunigung der KTA 2201.1, Fassung 2011 entspricht also der „peak ground acceleration“ des IAEA SSG-9 [1].

Durch die Auswertung einer Vielzahl von Erdbebenzeitverläufen und die anschließende Glättung der zugehörigen Antwortspektren können sogenannte standardisierte Antwortspektren ermittelt werden. Durch die Vorgabe eines „Einhängewerts“, also des PGA-Wertes für ein solches standardisiertes Antwortspektrum kann dieses auf die jeweilige Standortgefährdung (ausgedrückt durch die Starrkörperbeschleunigung des zugrunde gelegten Bemessungserdbebens) skaliert werden.

Die IAEA gibt in SSG-9 [1] einen Mindestwert von 0,1 g als Einhängewert für ein horizontales standardisiertes Antwortspektrum vor. Dieser Ansatz soll gemäß [1] auch für existierende Kernkraftwerke angewandt werden. Methoden für die Durchführung seismischer Nachbewertungen existierender Kernkraftwerke sind im IAEA Safety Guide NS-G-2.13 [8] enthalten (siehe hierzu die Antwort zu 4.).

In der KTA 2201.1, Fassungen 1975 und 1990, wurde unter dem Begriff der „Maximalbeschleunigung“ der „Maximalwert der Resultierenden der Horizontalbeschleunigungskomponenten“ bzw. der „Betrag der vektoriellen Summe der maximalen Horizontalbeschleunigungen“ verstanden. Die KTA 2201.1, Fassung 2011 [2] definiert die maximale Bodenbeschleunigung als „maximale Amplitude (Betrag) der horizontalen oder vertikalen Beschleunigungskomponenten des Erdbebenzeitverlaufs (Seismogramm)“. Sie entspricht der Starrkörperbeschleunigung (peak ground acceleration – PGA) des Bodenantwortspektrums („Einhängewert“). In 3.5(4) der KTA 2201.1, Fassung 2011 ist darüber hinaus festgelegt: „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.“ Die „Maximalbeschleunigung“ im Sinne der KTA 2201.1, Fassungen 1975 und 1990 bezieht sich also auf die horizontale resultierende Erdbebenanregung und unterscheidet sich von der „maximalen Bodenbeschleunigung“ der KTA 2201.1, Fassung 2011, die sich auf eine der beiden horizontalen Komponenten der Erdbebenanregung bezieht, durch den resultierenden Faktor. Der Ansatz eines PGA-Wertes von 0,1 g entsprechend der Forderung des IAEA SSG-9 führt damit bei Anwendung der Vorgehensweise gemäß KTA 2201.1, Fassung 2011, zu einer resultierenden maximalen horizontalen Bodenbeschleunigung von 0,12 g.

2 Werden durch diese drei hier in Bezug genommenen Herangehensweisen zumindest im Ergebnis äquivalente Mindestauslegungen erreicht und welche Schwankungsbreiten der Ergebnisse lassen sich jeweils ausweisen? (BMU-Frage 3)

Die in IAEA SSG-9 [1] vorgegebene Mindestauslegung führt zur Verwendung eines standardisierten horizontalen Bodenantwortspektrums mit einem Einhängewert von 0,1 g. Wie in der Antwort zu Frage 4 (s. u.) festgestellt, ist hierbei ein für den Standort geeignetes Spektrum heranzuziehen. Die Festlegung der Mindestauslegung nach der KTA 2201.1, Fassung 2011 [2] führt zu einem standortspezifischen Antwortspektrum, das einer Intensität von $I = VI$ entspricht. Der daraus resultierende PGA Wert weist - abhängig von den standortspezifischen Untergrundverhältnissen - etwa einen Wert in der Größenordnung von $0,5 \text{ m/s}^2$ (ca. 0,05 g) auf.

In Hinblick auf die Herangehensweise der älteren Fassungen der KTA 2201.1 wird auf die Antwort unter 3. (s. u.) verwiesen.

Im Ergebnis liegt der PGA Wert des standortspezifischen Antwortspektrums nach KTA 2201.1, Fassung 2011, etwa um den Faktor zwei unter dem PGA Wert nach IAEA SSG-9 [1]. Derselbe Faktor gilt für die Beschleunigungen im gesamten spektralen Bereich (siehe die Antwort auf Frage 4 unten).

Insgesamt führen die unterschiedlichen Herangehensweisen auf der Einwirkungsseite nicht zu äquivalenten Mindestauslegungen, da die nach dem deutschen Regelwerk sich ergebenden Mindestwerte für die maximale horizontale Bodenbeschleunigung etwa um den Faktor zwei geringer sind als der nach IAEA-Anforderungen vorgegebene Mindestwert für die maximale horizontale Bodenbeschleunigung von 0,1 g (ca. 1,0 m/s²) und dieser Faktor darüber hinaus für die Beschleunigungen im gesamten spektralen Bereich gilt.

3 Wie lassen sich Bewertungen zur Mindestauslegung basierend auf dem bisherigen auf Beschleunigungswerten beruhendem Vorgehen in Deutschland (KTA 2201.1 Fassung 1975 und Fassung 1990) methodisch und im Ergebnis übertragen auf das intensitätsbasierte Vorgehen (KTA 2201.1 Fassung 2011)? (BMU-Frage 4)

Die Fassungen der KTA 2201.1 von 1975 und 1990 enthielten hinsichtlich einer Mindestauslegung jeweils die Festlegung, dass

- die Maximalbeschleunigung des Bemessungserdbebens mit max. $a = 0,5 \text{ m/s}^2$ anzunehmen ist, wenn ein Wert für max. a kleiner als $0,5 \text{ m/s}^2$ ermittelt wurde und
- die Maximalbeschleunigung des Bemessungserdbebens mit max. $a = 1,0 \text{ m/s}^2$ anzunehmen ist, wenn ein Wert für max. a zwischen $0,5 \text{ m/s}^2$ und $1,0 \text{ m/s}^2$ ermittelt wurde.

Bei diesem Ansatz wurde davon ausgegangen, dass ein Standard-Antwortspektrum für die resultierende horizontale Bodenbeschleunigung mit einem Einhängewert von mindestens $0,5 \text{ m/s}^2$ skaliert wird. Die früheren KTA-Festlegungen zur Anhebung der Beschleunigungen im Bereich zwischen $0,5 \text{ m/s}^2$ und $1,0 \text{ m/s}^2$ auf den Mindestwert von max. $a = 1,0 \text{ m/s}^2$ wurde auf der Basis einer RSK-Empfehlung [10] gemäß dem BMU-Schreiben vom 23.10.1998 an die Länderbehörden (AG RS I 4-14200/7, -14300/7) bei der Verwendung standortspezifischer Antwortspektren nicht mehr für gerechtfertigt gehalten und in der KTA 2201.1 von 2011 [2] nicht mehr verwendet.

Das intensitätsbasierte Vorgehen nach KTA 2201.1, Fassung 2011 legt unabhängig von der konkreten Standortgefährdung eine Mindestintensität des Bemessungserdbebens von $I = VI$ fest. Ausgehend vom Bemessungserdbeben sind die Erdbebeneinwirkungen durch ingenieurseismologische Kenngrößen, insbesondere Bodenantwortspektren mit den zugehörigen Starrkörperbeschleunigungen (maximale Bodenbeschleunigungen), zu beschreiben. Dazu werden in Deutschland im Rahmen von Standortgutachten ermittelte standortspezifische Bodenantwortspektren verwendet.

Das bedeutet, dass für eine Mindestintensität von $I = VI$ in Abhängigkeit vom standortspezifischen Untergrund (Fels, verfestigte Sedimente, Lockersedimente) ein Bodenantwortspektrum herangezogen wird, aus dem sich unmittelbar die dazu korrespondierende maximale Bodenbeschleunigung als Beschleunigungswert im hohen Frequenzbereich (Starrkörperbereich) ergibt. Dabei korreliert die Intensität $I = VI$ etwa mit einer maximalen Bodenbeschleunigung von $0,5 \text{ m/s}^2$ (z. B. [11]).

Im Ergebnis führt das intensitätsbasierte Vorgehen der KTA 2201.1, Fassung 2011, also zu Mindestbeschleunigungen, die etwa dem Mindestwert der KTA 2201.1, Fassungen 1975 und 1990 von $0,5 \text{ m/s}^2$ entsprechen. Eine darüber hinaus in den alten Fassungen der KTA 2201.1 vorgesehene Anhebung der Maximalbeschleunigungen im Bereich zwischen $0,5$ und $1,0 \text{ m/s}^2$ auf einen Wert von $1,0 \text{ m/s}^2$ entsprechend einer Mindestintensität von etwa $I = VII$ (z. B. [11]) ist in der Fassung 2011 nicht mehr enthalten.

4 Welche sicherheitstechnischen Auswirkungen ergeben sich aus der Unterschiedlichkeit der beiden Herangehensweisen bei der Bestimmung der Mindestauslegung gegenüber Erdbeben, und zwar zum einen auf der Basis von IAEA NS-G-1.6 (2003) und SSG-9 (2010), zum anderen auf Basis der deutschen kerntechnischen Regeln (KTA 2201.1 Fassung 2011, Fassung 1990, Fassung 1975)? (BMU-Frage 1)

Die Anforderung nach einer Mindestauslegung gegenüber Erdbeben mit einer komponentenbezogenen Starrkörperbeschleunigung von $0,1g$ (PGA) entsprechend IAEA NS-G-1.6 (2003) [7] für neue Anlagen sowie für Nachbewertungen bestehender Anlagen gemäß IAEA SSG-9 (2010) [1] und IAEA NS-G-2.13 [8] wird von den Kernkraftwerken KKE, KWB-A, -B, KKP-1, -2 und GKN-I, -II aufgrund des ihrer Auslegung zugrunde liegenden Bodenantwortspektrums mit einer Starrkörperbeschleunigung $\geq 1,0 \text{ m/s}^2$ erfüllt. Der Erdbebenauslegung der Anlagen KKB, KBR, KKK, KKKU, KWG, KKG, KKI-1 und -2 und KRB-II-B, -C liegen Bodenantwortspektren für das Bemessungserdbeben mit einer komponentenbezogenen Starrkörperbeschleunigung von $< 1,0 \text{ m/s}^2$ zugrunde. Für die letztgenannten Anlagen liegen keine Nachweise für Erdbebeneinwirkungen vor, die der IAEA-Anforderung nach einem Mindestwert für die komponentenbezogenen Starrkörperbeschleunigung von $0,1 \text{ g}$ genügen. Das Bemessungserdbeben weist gemäß RSK-SÜ [3] bei allen deutschen Anlagen eine Intensität $\geq VI$ auf.

Zur sicherheitstechnischen Bedeutung der für die oben genannten deutschen Anlagen vorliegenden Abweichung von den IAEA-Anforderungen ist aus Sicht der RSK zunächst grundsätzlich festzustellen:

- Die Gefährdung einer Anlage durch Erdbeben hängt von der Stärke des am Standort zu unterstellenden Erdbebens ab. Je stärker die anzunehmende Erdbebeneinwirkung ist, desto größer sind die möglichen Schäden. Die Erdbebenauslegung hat daher in Gebieten mit starker Seismizität eine wesentlich größere Bedeutung hinsichtlich der Gesamtauslegung der Anlage als in Gebieten mit niedriger Seismizität. Die o. g. ENSREG-Empfehlung betrifft nur Gebiete mit niedriger Seismizität. Basierend auf dem aktuellen Kenntnisstand zur Erdbebengefährdung in Deutschland – wie er sich aus den aktuellen standortspezifischen seismologischen Gutachten ergibt – führt die IAEA-Vorgabe nach einer Mindestbeschleunigung von $0,1 \text{ g}$ in diesen Gebieten, z. B. in Norddeutschland, zu Einwirkungen, die deutlich über dem Wert liegen, der für ein Erdbeben mit einer Überschreitenswahrscheinlichkeit von $10^{-5}/a$ (Medianwert) gemäß KTA 2201.1 [2] zu Grunde zu legen ist.
- Mit der geforderten Mindestauslegung gegen Erdbeben wird auch ein Grundschutz der Anlagen gegen dynamische Belastungen erreicht. Die im Leistungsbetrieb befindlichen deutschen Kernkraftwerke sind hinsichtlich der vitalen Funktionen auch gegen dynamische Einwirkungen infolge eines Flugzeugabsturzes und einer Explosionsdruckwelle ausgelegt.
- In ihrer anlagenspezifischen Sicherheitsüberprüfung deutscher Kernkraftwerke unter Berücksichtigung des Ereignisses in Fukushima (RSK-SÜ [3]) stellte die RSK fest, dass im Hinblick auf die Erdbeben-

auslegung z. T. erhebliche Reserven bestehen und die von den Betreibern diesbezüglich vorgebrachten Argumente grundsätzlich plausibel sind. Hintergrund dieser Einschätzung waren u. a. die in der Berechnungskette enthaltenen Konservativitäten und die Kenntnisse zu den bislang für einzelne Anlagen durchgeführten seismischen PSA. Die RSK sah das Potential für Reserven in Höhe einer Intensitätsstufe.

Nach diesen grundsätzlichen Feststellungen zur Erdbebenauslegung der deutschen Kernkraftwerke wird im Folgenden detaillierter auf die Auswirkungen der IAEA-Anforderungen auf die Anlagen eingegangen.

Die Frage der sicherheitstechnischen Auswirkungen der unterschiedlichen Festlegungen der Mindestauslegung im deutschen und IAEA-Regelwerk soll zunächst durch den direkten Vergleich der maximalen Bodenbeschleunigungen beantwortet werden. Der direkte Vergleich der maximalen Bodenbeschleunigungen ergibt - unter Anwendung empirischer Beziehungen (z. B. nach Murphy/O'Brien, 1977 [11]), wonach die Intensität $I = VI$ etwa mit der max. Bodenbeschleunigung von $0,5 \text{ m/s}^2$ korreliert -, dass sowohl mit den Festlegungen zur Mindestauslegung auf der Basis von Beschleunigungen in den Fassungen der KTA 2201.1 von 1975 und 1990 als auch auf Basis der Intensität in der Fassung der KTA 2201.1 von 2011 die IAEA-Anforderung nach einem Mindestwert für die maximale horizontale Bodenbeschleunigung (PGA) von $0,1 \text{ g}$ (ca. $1,0 \text{ m/s}^2$) nicht erfüllt wird. Die IAEA-Anforderung nach der Verwendung eines PGA-Werts von $0,1 \text{ g}$ (ca. $1,0 \text{ m/s}^2$) als Einhängewert für das Bodenantwortspektrum führt zu einer etwa doppelt so hohen Einwirkung wie es das deutsche Regelwerk als Mindestauslegung vorschreibt.

Für die Einwirkung im Bereich niedriger Frequenzen ist das auf einen PGA Wert von $0,1 \text{ g}$ zu skalierende Spektrum relevant. Gemäß IAEA Guide SSG-9 [1] ist ein standardisiertes Antwortspektrum („standardized response spectrum“) zu verwenden. Aus den Anforderungen in den IAEA Guides SSG-9 [1], NS-G-3.3 [6], NS-G-1.6 [7] sowie dem IAEA Safety Report No. 28 [12] geht hervor, dass hierbei ein Spektrum zu verwenden ist, das für den Standort geeignet ist. Die Bodenantwortspektren, die aktuell für die Erdbebengefährdung der im Hinblick auf die Mindestauslegung relevanten deutschen Standorte herangezogen werden, entsprechen der IAEA-Definition des standardisierten Antwortspektrums in [1].⁴ Somit sind bei Umsetzung der IAEA-Vorgabe die im Rahmen von Standortgutachten ermittelten standortspezifischen⁵ Bodenantwortspektren auf einen PGA Wert von $0,1 \text{ g}$ zu skalieren. Dies führt dazu, dass sich für die betroffenen Anlagen in allen Frequenzbereichen höhere Spektralbeschleunigungen – entsprechend der Skalierung mit dem Einhängewert – ergeben als sie bisher der Auslegung zugrunde liegen.

Aus den entsprechend erhöhten Bodenantwortspektren ergeben sich höhere Einwirkungen auf die Anlage. Deren sicherheitstechnische Auswirkungen lassen sich nur auf Basis von Analysen der Bauwerke und Einrichtungen beurteilen.

⁴ Nach Kenntnis des Ausschusses ANLAGEN- UND SYSTEMTECHNIK basieren aktuelle standortspezifische Bodenantwortspektren u. a. auf

- zu den Bodenverhältnissen passende Hosser-Spektren,
- Fraktile einer Schar von Antwortspektren für Erdbebenzeitverläufe aus weltweiten Strong-Motion Registrierungen, die hinsichtlich Standortbedingungen und Erdbebencharakteristik (z.B. Magnitude, Herdtiefe etc.) zum Standort passen, da Strong-Motion Registrierungen für den Standort nicht existieren,
- empirischen Beziehungen
- modifizierten US Spektren.

⁵ Ein standortspezifisches Bodenantwortspektrum ist ein Spektrum, das unter Berücksichtigung der Untergrundverhältnisse und der Seismizität des Standorts festgelegt worden ist.

Hinsichtlich der Methoden, mit der die aus der anzusetzenden Mindeststandortgefährdung resultierenden Einwirkungen zu analysieren und zu bewerten sind, kann im Kontext der IAEA-Regeln unterschieden werden zwischen der Auslegung einer neuen Anlage und der Nachbewertung einer bestehenden Anlage. Nachbewertungen der seismischen Widerstandsfähigkeit bestehender Anlagen werden im IAEA-Guide NS-G-2.13 [8] und im Safety Report No. 28 [12] behandelt. Sie können auf Basis bestehender Reserven erfolgen. Mittels der in [8] und [12] genannten Methoden „Seismic Margin Assessment“ oder „Seismic PSA“ ist für Anlagen mit einer maximalen Bodenbeschleunigung von $< 0,1$ g aufzuzeigen, dass die Anlage auch für eine Bodenbeschleunigung von $0,1$ g ausreichend widerstandsfähig ist. Ggf. sind Komponenten/Bauwerke entsprechend zu ertüchtigen.

Ein entsprechender Ansatz ist seitens der RSK im Rahmen ihrer Robustheitsbewertungen in [5] empfohlen worden. Hierfür können die Ergebnisse vorliegender probabilistischer seismischer Sicherheitsanalysen (PSA) herangezogen werden. Für Anlagen, für die keine solchen PSA-Ergebnisse vorliegen, können Übertragbarkeitsbetrachtungen zur Bewertung der sicherheitstechnischen Auswirkungen der IAEA-Anforderung vorgenommen werden. In [5] führt die RSK aus, dass sie es für angemessen hält, dass im Ergebnis einer durchzuführenden Robustheitsprüfung gegenüber auslegungsüberschreitenden Erdbebeneinwirkungen mindestens Robustheitslevel 1 angestrebt wird. Dies entspräche für den Erdbebenfall dem Nachweis von in der Auslegung vorhandenen Reserven in Höhe einer Intensitätsstufe. Für den Fall einer Bemessungsintensität (Mindestintensität nach KTA 2201.1) von $I = VI$ (PGA ca. $0,5$ m/s²) wäre also der Nachweis von in der Auslegung vorhandenen Reserven für die Intensität $I = VII$ (PGA ca. $1,0$ m/s²) zu führen. Sofern standortspezifisch bei einer angenommenen Intensität entsprechend Robustheitslevel 1 ein PGA Wert $< 0,1$ g ermittelt werden sollte, empfiehlt die RSK die in der Auslegung vorhandenen Reserven für einen angenommenen PGA Wert von $0,1$ g zu ermitteln.

5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die IAEA-Anforderung nach einer Mindestauslegung gegen Erdbeben unter Verwendung eines Mindestwertes für die maximale horizontale Bodenbeschleunigung (PGA-Wert) von $0,1$ g (ca. $1,0$ m/s²) als Einhängewert für das Bodenantwortspektrum führt zu etwa doppelt so hohen Einwirkungen wie es das deutsche Regelwerk als Mindestauslegung vorschreibt. Alle deutschen Anlagen erfüllen die nach der KTA-Regel 2201.1 [2] geforderte Mindestauslegung für eine Intensität VI, wobei für einige deutsche KKW-Standorte der Nachweis für Erdbebeneinwirkungen, die der IAEA-Anforderung nach einer Mindestbeschleunigung von $0,1$ g genügen, nichtvorliegt.

Allerdings lassen sich aus dieser Abweichung keine belastbaren Rückschlüsse auf die tatsächliche Widerstandsfähigkeit der relevanten Komponenten, Systeme und baulichen Strukturen ziehen. Die sicherheitstechnischen Auswirkungen aus erhöhten Bodenantwortspektrern lassen sich nur auf Basis von Analysen der Komponenten, Systeme und baulichen Strukturen bewerten.

Der Nachweis der Erfüllung der IAEA-Anforderung nach Ansatz eines PGA-Wertes von $0,1$ g kann durch eine Nachbewertung der seismischen Widerstandsfähigkeit der betroffenen Anlagen anhand der Methoden des IAEA-Guide NS-G-2.13 [8] erfolgen. Mittels der in NS-G-2.13 genannten Methode „Seismic Margin Assessment“ (ggfs. unter Nutzung von Daten einer vorliegenden seismischen PSA) wäre für Anlagen mit einer maximalen Bodenbeschleunigung von $< 0,1$ g aufzuzeigen, dass die Anlage auch für eine Bodenbe-

schleunigung von 0,1 g ausreichend widerstandsfähig ist. Dieses Vorgehen ist bereits in den Empfehlungen der RSK-Stellungnahme zur Robustheit [5] im Grundsatz enthalten.

Sollte standortspezifisch bei einer angenommenen Intensität entsprechend Robustheitslevel 1 ein PGA-Wert $< 0,1$ g ermittelt werden, empfiehlt die RSK die in der Auslegung vorhandenen Reserven für einen angenommenen PGA-Wert von 0,1 g zu ermitteln.

Nach Meinung der RSK wird durch diese Nachweisführung zur Robustheit der Anlagen die auf die Auslegung bezogene Vorgehensweise der KTA-Regel [2] mit dem von dem IAEA-Regelwerk abweichenden intensitätsorientierten Ansatz und deren Gültigkeit nicht in Frage gestellt.

Unterlagen

- [1] IAEA Safety Standards
Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations
Specific Safety Guide No. SSG-9
2010

- [2] Sicherheitstechnische Regel des KTA
KTA 2201.1
Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen
Teil 1: Grundsätze
Fassung 2011-11

- [3] RSK-Stellungnahme
Anlagenspezifische Sicherheitsüberprüfung (RSK-SÜ) deutscher Kernkraftwerke unter
Berücksichtigung der Ereignisse in Fukushima-I (Japan)
11. – 14.05.2011 (437. RSK-Sitzung)

- [4] RSK – Stellungnahme
KTA-Regel 2201.1: „Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen;
Teil 1: Grundsätze“; Fassung 6/90 - Empfehlungen für die Überarbeitung der Regel
vom 27.05.2004

- [5] RSK-Empfehlung
Empfehlungen der RSK zur Robustheit der deutschen Kernkraftwerke
450. Sitzung am 26./27.09.2012

- [6] IAEA Safety Standard
Evaluation of Seismic Hazards for Nuclear Power Plant
Safety Guide No. NS-G-3.3
2002

- [7] IAEA Safety Standard
Seismic Design and Qualification for Nuclear Power Plants
Safety Guide No. NS-G-1.6
2003

-
- [8] IAEA Safety Standard
Evaluation of Seismic Safety for Existing Nuclear Installations for protecting people
and the environment
Safety Guide NS-G-2.13
2009
- [9] BMU
EU Stresstest; National Report of Germany, Dezember 2011
- [10] Anlage 1 zum Ergebnisprotokoll der 320. Sitzung der RSK am 16.09.1998
- [11] J.R. Murphy und L.J. O'Brien
The Correlation of Peak Ground Acceleration Amplitude with Seismic Intensity and
Other Physical Parameters
Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 87, 877-915, June 1977
- [12] IAEA Safety Reports Series No. 28
Seismic Evaluation of existing nuclear power plants
2003

Anhang A: Begriffsdefinitionen

KTA 2201.1, Fassung 2011-11

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.

Maximale Bodenbeschleunigung:

Die maximale Bodenbeschleunigung ist die maximale Amplitude (Betrag) der horizontalen oder vertikalen Beschleunigungskomponenten des Erdbebenzeitverlaufs (Seismogramm). Sie entspricht der Starrkörperbeschleunigung (peak ground acceleration – PGA) des Bodenantwortspektrums („Einhängewert“).

Starrkörperbeschleunigung

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

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.

KTA 2201.1, Fassung 1990

Unter „Maximalbeschleunigung“ versteht man

- die Starrkörperhorizontalbeschleunigung des Freifeldantwortspektrums (Einhängewert),
- den Maximalwert der Resultierenden der Horizontalbeschleunigungskomponenten in der Starkbewegungsphase des Erdbebenzeitverlaufs (Amplitudenwert).

KTA 2201.1, Fassung 1975

Unter „Maximalbeschleunigung“ versteht man, bezogen auf die Bodenbewegung in Fundamenthöhe:

- die Maximalbeschleunigung in der Starkbewegungsphase eines Erdbebens und
- den Betrag der vektoriellen Summe der maximalen Horizontalbeschleunigungen.

IAEA, SSG-9

accelerogram. A recording of ground acceleration, usually in three orthogonal directions (i.e. components), two in the horizontal plane and one in the vertical plane.

peak ground acceleration. The maximum absolute value of ground acceleration displayed on an accelerogram; the greatest ground acceleration produced by an earthquake at a site.

response spectrum. A curve calculated from an accelerogram that gives the value of peak response in terms of the acceleration, velocity or displacement of a damped single-degree-of-freedom linear oscillator (with a given damping ratio) as a function of its natural frequency or period of vibration.

Standardized response spectra

9.5. A standardized response spectrum having a smooth shape is used for engineering design purposes and to account for the contribution of multiple seismic sources represented by an envelope incorporating adequate low frequency and high frequency ground motion input. The prescribed shape of the standardized response spectrum is obtained from various response spectra derived on the basis of earthquake records and engineering considerations. This standardized response spectrum is scaled to envelop the mean ground motion levels at low and high frequencies.