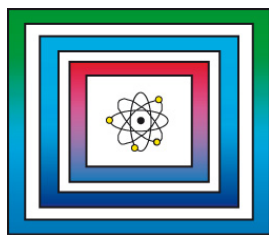


Standortauswahl

9S2019070000

Anwendung des
Ausschlusskriteriums
Seismische Aktivität



Abschlussbericht

Hannover, August 2020

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND
ROHSTOFFE HANNOVER

Standortauswahl

Ausschlusskriterien

Anwendung des Ausschlusskriteriums Seismische Aktivität

Abschlussbericht

Autoren:	Kaiser, Diethelm, Dr. Spies, Thomas, Hon.-Prof. Dr.
Auftraggeber:	Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE)
Auftragsnummer:	9S2019070000
Datum:	20.08.2020
Geschäftszeichen:	B3.1/B50161-15/2020-0003/003
Gesamtblattzahl:	52

Im Auftrag:

gez. G. Enste

Direktor und Professor G. Enste
Abteilungsleitung B 3 und Projektleitung Endlagerung

Inhaltsverzeichnis	Seite
Verkürzte Zusammenfassung	4
Abstract	5
1 Einleitung	6
2 Grundlagen	8
2.1 Begriffsbestimmungen	8
2.2 Begründung und Grundlage des Ausschlusskriteriums „Seismische Aktivität“	10
2.3 Relevanz des Ausschlusskriteriums „Seismische Aktivität“ in Hinblick auf die Erdbebengefährdung eines Endlagers	11
2.4 Darstellung der seismischen Gefährdung in der Norm DIN EN 1998-1/NA:2011-01 (DN_2011) und im Entwurf E DIN EN 1998-1/NA:2018-10 (DN_2018)	13
2.4.1 DIN EN 1998-1/NA:2011-01 (DN_2011)	13
2.4.2 E DIN EN 1998-1/NA:2018-10 (DN_2018)	15
3 Unterschiede zwischen der Norm DIN EN 1998-1/NA:2011-01 (DN_2011) und dem Entwurf E DIN EN 1998-1/NA:2018-10 (DN_2018)	17
3.1 Unterschiede im Datenbestand	17
3.1.1 Erdbebenkatalog	17
3.1.2 Seismische Quellen	17
3.1.3 Geologische Untergrundverhältnisse	18
3.2 Unterschiede in den Berechnungsmethoden und in den ingenieur-seismologischen Kenngrößen	18
3.2.1 Parameter der Bodenbewegung bei der seismischen Gefährdungsberechnung	19
3.2.2 Seismische Bodenbewegungsmodelle	19
3.2.3 Ingenieurseismologische Kenngröße der seismischen Einwirkung für die Ermittlung bzw. Skalierung der Antwortspektren	20
3.2.4 Berücksichtigung von Ungewissheiten	20
4 Auswahl einer geeigneten Vorgehensweise zur Anwendung des Ausschlusskriteriums „Seismische Aktivität“	22
4.1 Kriterien zur Auswahl einer geeigneten Vorgehensweise	22
4.2 Anwendung der Kriterien auf die denkbaren Vorgehensweisen und Auswahl der am besten geeigneten Vorgehensweise	23
4.2.1 Verwendung der Gefährdungskarte der Intensität aus Grünthal et al. (2018d)	23

	Seite
4.2.2	Verwendung des Referenz-Spitzenwertes der Bodenbeschleunigung aus DIN EN 1998-1/NA:2011-01 24
4.2.3	Verwendung der Referenz-Spitzenbodenbeschleunigung aus E DIN EN 1998-1/NA:2018-10 25
4.2.4	Umrechnung von Intensität in Spitzenbodenbeschleunigung mittels publi- zierter Umrechnungsbeziehungen 25
4.2.5	Übertragung der Intensität 7 auf den Plateaubereich der spektralen Antwortbeschleunigung 26
4.2.6	Zusammenfassende Begründung 28
4.3	Vorschlag der BGR zur Anwendung des Ausschlusskriteriums „Seismische Aktivität“ 29
5	Zusammenfassung 32
	Literaturverzeichnis 35
	Abkürzungsverzeichnis 38
	Tabellenverzeichnis 40
	Abbildungsverzeichnis 41
	Anhangverzeichnis 42

Verkürzte Zusammenfassung

Autoren:	Kaiser, Diethelm, Dr. Spies, Thomas, Hon.-Prof. Dr.
Titel:	Anwendung des Ausschlusskriteriums Seismische Aktivität
Schlagwörter:	Antwortspektrum, Erdbeben, Erdbebenzonen, makroseismische Intensität, Standortauswahlgesetz, seismische Gefährdung

Im Standortauswahlgesetz § 22 „Ausschlusskriterien“ (2) 4. „Seismische Aktivität“ wird ausgeführt, dass ein Gebiet nicht als Endlagerstandort geeignet ist, wenn die örtliche seismische Gefährdung größer als in Erdbebenzone 1 nach DIN EN 1998-1/NA:2011-01 (DN_2011) ist. Diese Norm wird in Kürze durch eine Aktualisierung ersetzt, die dem Stand von Wissenschaft und Technik entspricht. Der Entwurf hierzu, E DIN EN 1998-1/NA:2018-10 (DN_2018), enthält keine Zuordnungen in Erdbebenzonen mehr, sondern weist die seismische Gefährdung räumlich kontinuierlich aus. Dabei beruhen sowohl die Karte der Erdbebenzonen in DN_2011 als auch die Karte der seismischen Gefährdung in DN_2018 auf probabilistischen seismischen Gefährdungsanalysen. Für die Wahl einer Vorgehensweise zur Anwendung des Ausschlusskriteriums unter Verwendung von DN_2018 werden objektive Kriterien aufgestellt und angewendet. Im Ergebnis schlägt BGR vor, als Grenzwert zur Anwendung des Ausschlusskriteriums den Wert im Plateaubereich der spektralen Antwortbeschleunigung von $1,8 \text{ ms}^{-2}$ in DN_2018 zu verwenden. Dieser Wert entspricht der makroseismischen Intensität 7, für den die seismische Gefährdung größer als in Erdbebenzone 1 nach DN_2011 ist. Für solche Gebiete, in denen dieser Wert überschritten wird, gilt das Ausschlusskriterium somit als erfüllt.

Abstract

Authors: Kaiser, Diethelm, Dr.
Spies, Thomas, Hon.-Prof. Dr.

Title: Application of the exclusion criterion
Seismic Activity

Subject terms: earthquake, earthquake zones,
macroseismic intensity, response spectrum,
Repository Site Selection Act (StandAG),
seismic hazard

In the German Repository Site Selection Act (Standortauswahlgesetz, StandAG) § 22 „Exclusion Criteria“ (2) 4 „Seismic Activity“ it is stated that an area is not suitable as a repository site if the local seismic hazard would exceed values higher than those in earthquake zone 1 according to DIN EN 1998-1/NA:2011-01 (DN_2011). Soon, this standard will be replaced by an update which reflects the state-of-the-art in science and technology. This draft E DIN EN 1998-1/NA:2018-10 (DN_2018) does not include assignments to earthquake zones, anymore, but shows the seismic hazard in a spatially continuous way. Both the maps of earthquake zones in DN_2011 and the seismic hazard in DN_2018 are based on probabilistic seismic hazard analyses. Objective criteria are established and applied for selecting a procedure to apply the exclusion criterion using DN_2018. As a result, BGR proposes to make use of the value in the plateau of the acceleration spectral response of 1.8 ms^{-2} in DN_2018 as the threshold value for applying the exclusion criterion. This value corresponds to macroseismic intensity 7, for which the seismic hazard is greater than in earthquake zone 1 according to DN_2011. For those areas where this value is exceeded, the exclusion criterion is considered to be fulfilled.

1 Einleitung

Das Standortauswahlgesetz (StandAG) regelt die Verfahrensschritte für die Suche und die Auswahl eines Standortes für eine Anlage zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland. In Kapitel 3 „Kriterien und Anforderungen für die Standortauswahl“ des StandAG wird in § 22 „Ausschlusskriterien“ im Absatz (2) Nummer 4. „Seismische Aktivität“ ausgeführt, dass ein Gebiet nicht als Endlagerstandort geeignet ist, wenn die örtliche seismische Gefährdung größer als in Erdbebenzone 1 nach DIN EN 1998-1/NA:2011-01 ist.

Im Oktober 2018 wurde für die Norm ein Entwurf E DIN EN 1998-1/NA:2018-10 vorgelegt, der als Ersatz für DIN EN 1998-1/NA:2011-01 vorgesehen ist. Diese Fassung wird mit dem Buchstaben „E“ als Kennzeichnung für „Entwurf“ bezeichnet. Der Entwurf enthält keine Darstellungen und Zuordnungen in Erdbebenzonen wie in der bisher gültigen DIN mehr, sondern die räumlich kontinuierliche Verteilung der seismischen Kenngröße. Er ist die Grundlage des zur Zeit noch laufenden Verfahrens zur Prüfung und Stellungnahme des Norm-Entwurfs durch die Öffentlichkeit (Fehling & Schwarz 2019).

Die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) übertrug der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) das Arbeitspaket „9S201907 Ausschlusskriterien“ zur Bearbeitung von folgenden Fragestellungen bezüglich des Ausschlusskriteriums „Seismische Aktivität“:

- Zusammenfassung des für die jeweilige DIN (Fassung 2011 und neuer Entwurf von 2018) genutzten Datenbestandes und Herausarbeiten der Unterschiede.
- Vergleichende Gegenüberstellung und Erläuterung der jeweils genutzten Berechnungsmethoden und ingenieurseismologischen Kenngrößen. Hierzu gehört auch die unterschiedliche Berücksichtigung des geologischen Untergrundes.
- Abgabe einer verbindlichen Einschätzung, ob und wie (über welche Kenngrößen) eine Übertragung der in der DIN EN 1998-1/NA:2011-01 vorgenommenen Klassifizierung der Erdbebenzonen in den neuen Entwurf der DIN möglich ist, um eine Anwendung des Ausschlusskriteriums gemäß § 22 (2) 4. StandAG vornehmen zu können.

Ein Zwischenstand der Bearbeitung dieser Fragestellungen mit der Darlegung der ersten beiden Spiegelpunkte wurde im April 2020 vorgelegt (Kaiser & Spies 2020). Im vorliegenden Abschlussbericht werden alle Fragestellungen ausführlich behandelt.

In Kapitel 2 werden zunächst wesentliche Fachbegriffe definiert und die Grundlage des Ausschlusskriteriums diskutiert sowie die Darstellung der seismischen Gefährdung nach der DIN von 2011 und dem Entwurf von 2018 erläutert. In Kapitel 3 werden die

Unterschiede im Datenbestand, in den Berechnungsmethoden und in den ingenieurseismologischen Kenngrößen zwischen der Norm DIN EN 1998-1/NA:2011-01 und dem Entwurf DIN EN 1998-1/NA:2018-10 vergleichend gegenübergestellt. In Kapitel 4 wird aus mehreren denkbaren Vorgehensweisen unter Anwendung objektiver Kriterien die am besten geeignete ausgewählt und diese Auswahl begründet. Die Übertragung der in der DIN EN 1998-1/NA:2011-01 vorgenommenen Klassifizierung der Erdbebenzonen in den neuen Entwurf der DIN, um eine Anwendung des Ausschlusskriteriums vornehmen zu können, wird detailliert beschrieben.

2 Grundlagen

2.1 Begriffsbestimmungen

Im Folgenden werden Fachbegriffe definiert, die für das Verständnis dieses Berichts erforderlich sind. Sie werden in dem Sinn definiert, wie sie im StandAG, in den Normen DN_2011 und DN_2018 und in den diesen Normen zugrundeliegenden Veröffentlichungen verstanden werden. Zur besseren Lesbarkeit werden die Normen wie folgt abgekürzt:

- DN_2011 = DIN EN 1998-1/NA:2011-01 (2011)
- DN_2018 = E DIN EN 1998-1/NA:2018-10 (2018)

Antwortspektrum. Das Antwortspektrum ist die Darstellung des Betrags der maximalen horizontalen Amplituden der Beschleunigung der Schwingungen von gedämpften elastischen Einmassenschwingern unterschiedlicher Eigenfrequenz mit konstantem Dämpfungsgrad (5 % Dämpfung) als Antwort auf eine Anregung beschrieben durch einen Zeitverlauf am Fußpunkt. In DN_2018 wird es als „*spektrale Antwortbeschleunigung*“ oder „*elastisches horizontales Antwortspektrum*“ oder „*elastisches Antwortspektrum für die horizontale Bodenbewegung*“, in Grünthal et al. (2018c) als „*spektrale Antwortbeschleunigung*“ oder „*Antwortbeschleunigung*“ oder „*spektrales Antwortspektrum*“, in Grünthal et al. (2018d) als „*spectral response acceleration*“ oder „*spectral response amplitudes*“ oder „*elastic response spectrum*“ oder „*response ground motion*“ bezeichnet.

Epizentralintensität. Die Epizentralintensität I_0 ist die makroseismische Intensität (siehe Begriffserklärung) des Erdbebens im Epizentrum, d. h. in der lotrechten Projektion des Ortes des Bruchbeginns auf die Erdoberfläche. Die Epizentralintensität wird als charakteristische Größe eines Erdbebens in Erdbebenkatalogen verwendet.

Makroseismische Intensität. Die makroseismische Intensität I ist die Klassifizierung der Stärke der seismischen 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 der makroseismischen Skala EMS-98 Grünthal (2020) definiert sind.

Momentmagnitude. Die Momentmagnitude M_w ist ein quantitatives Maß für die Stärke eines Erdbebens. Sie ist proportional zum Logarithmus des seismischen Moments. Dieses wird aus den Seismogrammen des Erdbebens bestimmt. Das seismische Moment ist eine physikalische Größe und entspricht dem Produkt von Bruchfläche, mittlerer Verschiebung auf der Bruchfläche und dem Schermodul im Bereich der Bruchfläche. Es

wird in der Seismologie gegenüber anderen Magnitudenskalen bevorzugt. Im Gegensatz zur makroseismischen Intensität (siehe Begriffserklärung) ist die Momentmagnitude eine ortsunabhängige Größe.

Referenz-Spitzenbodenbeschleunigung. Die Referenz-Spitzenbodenbeschleunigung für Felsuntergrund wird in DN_2018 Gleichung (NA.1) definiert als Amplitude des horizontalen Antwortspektrums bei der Periode 0,01 s und dort mit a_{gR} bezeichnet. Es handelt sich um eine abgeleitete Größe, die nach Gleichung (NA.1) in DN_2018 berechnet werden kann durch Division der spektralen Antwortbeschleunigung im Plateaubereich $S_{ap,R}$ mit dem spektralen Überhöhungsfaktor $\beta_0 = 2,5$. Zur Unterscheidung vom Referenz-Spitzenwert der Bodenbeschleunigung in DN_2011 wird im vorliegenden Bericht das Symbol a_{gR2018} verwendet.

Referenz-Spitzenwert der Bodenbeschleunigung. Der Referenz-Spitzenwert der Bodenbeschleunigung bestimmt sich in DN_2011 aus der Zuordnung zu einem Intensitätsintervall. Er wird dort auch als „Referenz-Bodenbeschleunigung“ bezeichnet. Die Zuordnung wurde in Schwarz (1997) erarbeitet, wo hierfür der Begriff „Effektive Beschleunigung“ verwendet wurde. In DN_2011 wird das Symbol a_{gR} verwendet. Zur Unterscheidung von der Referenz-Spitzenbodenbeschleunigung in DN_2018 wird im vorliegenden Bericht das Symbol a_{gR2011} verwendet. Es handelt sich um eine Größe, die trotz der ähnlichen Bezeichnung auf anderem Weg abgeleitet wurde als die Referenz-Spitzenbodenbeschleunigung in DN_2018 und nicht mit dieser gleichgesetzt werden darf. Über den Referenz-Spitzenwert der Bodenbeschleunigung a_{gR} wird in DN_2011 das Antwortspektrum skaliert.

Seismische Gefährdung. Die Gefährdung kann prinzipiell mit deterministischen und mit probabilistischen Analysemethoden ermittelt werden. Als Grundlage der hier behandelten Norm wurde nur die probabilistische Analyse eingesetzt. Bei dieser werden für die Eingabedaten jeweils Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen ermittelt und miteinander verknüpft. Dies betrifft die räumliche und zeitliche Verteilung der Seismizität sowie die Magnitudenhäufigkeiten und die Veränderung der seismischen Bodenbewegung bei der Ausbreitung von Erdbeben bis zum Standort. Die als Resultat der Analyse ermittelte seismische Gefährdung kennzeichnet die Wahrscheinlichkeit des Überschreitens des Wertes eines ausgewählten Parameters der seismischen Einwirkung an einem Standort in einem bestimmten Zeitraum. Als Parameter werden makroseismische Intensitäten oder Bodenbewegungen (insbesondere Beschleunigungen als Funktion der Frequenz (spektrale Beschleunigungen) und die Maximalbeschleunigung) verwendet. Im StandAG wird hierfür der Begriff „örtliche seismische Gefährdung“ verwendet.

Spektrale Antwortbeschleunigung im Plateaubereich. Die spektrale Antwortbeschleunigung im Plateaubereich $S_{ap,R}$ ist die in DN_2018 festgelegte Referenz-Gefährdungskenngröße. Sie wird berechnet als Mittelwert der spektralen Amplituden des horizontalen Antwortspektrums

für 5 % Dämpfung bei den Perioden $T = 0,1$ s, $0,15$ s und $0,2$ s. In Grünthal et al. (2018c) wird diese Größe als „*Mittelwert der Amplituden des Antwortspektrums*“ bezeichnet (abgekürzt: *meanSRA*).

Spitzenbodenbeschleunigung. Die Spitzenbodenbeschleunigung a_g ist die maximale Amplitude (Betrag) des dem Antwortspektrum zugrundeliegenden Beschleunigungsseismogramms (Horizontalkomponente). Sie entspricht dem Wert des Antwortspektrums im hohen Frequenzbereich. Grundsätzlich ist zu beachten, dass es sich um einen Begriff handelt, für den in der Fachliteratur und in den Normen unterschiedliche Definitionen und Bestimmungsverfahren existieren, die zu unterschiedlichen Werten führen.

2.2 Begründung und Grundlage des Ausschlusskriteriums „Seismische Aktivität“

Für die Beantwortung der einleitend genannten Fragestellungen ist neben dem Gesetzestext auch seine Begründung und Entstehung zu betrachten.

In der Drucksache 18/11398 des Deutschen Bundestages (Gesetzentwurf der Fraktionen CDU/CSU, SPD und BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN: Entwurf eines Gesetzes zur Fortentwicklung des Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und anderer Gesetze, 07.03.2017) wird das Ausschlusskriterium „Seismische Aktivität“ auf Seite 68 wie folgt begründet:

„Durch das Kriterium werden Gebiete ausgeschlossen, in denen seismische Aktivitäten zu erwarten sind, die die Sicherheit eines Endlagers beeinträchtigen können. Bewertungsgrundlage ist, wie von der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe vorgeschlagen, die Norm DIN EN 1998-1 / NA 2011-01. Diese wird konkretisiert durch die Festlegungen in der jeweils dazu geltenden nationalen Anlage.

Die Einhaltung dieses Kriteriums lässt keinen Schluss auf die Genehmigungsfähigkeit eines Endlagers außerhalb dieses Bereiches unter dem Aspekt der Erdbebengefährdung zu. Hierfür sind standortspezifische Berechnungen auf Grundlage des kerntechnischen Regelwerkes erforderlich. Das Kriterium dient ausschließlich einer groben Abschätzung, in welchen Gebieten die Gefährdung durch Erdbeben so groß ist, dass nicht erwogen werden sollte, ein Endlager in diesen Gebieten zu errichten.“

Das Ausschlusskriterium „Seismische Aktivität“ wurde übernommen von den Empfehlungen des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd 2002). AkEnd (2002) begründet im Abschnitt 4.1.2.3 die Festlegung des Ausschlusskriteriums „Seismische

Aktivität“ „*ab Erdbebenzone 2*“ mit der Feststellung, dass ab Intensität $I = 7$ „*merkliche Schäden an Gebäuden*“ auftreten. AkEnd weist jedoch darauf hin: „*Bei der exakten Abgrenzung der ungünstigen Gebiete sollten Randgebiete einer Einzelprüfung unterzogen werden.*“

Die Entsorgungskommission (ESK) bewertete 2015 die Kriterien des AkEnd (ESK 2015) und nahm zum Ausschlusskriterium „Seismische Aktivität“ wie folgt Stellung:

„Die ESK ist mit dem Ausschlusskriterium einverstanden. In einem seismisch mehrheitlich ruhigen Land wie Deutschland ist das seitens AkEnd formulierte Ausschlusskriterium als konservativ anzusehen. Aufgrund der Tatsache, dass ein Endlager im geologischen Untergrund nach Verschluss ein voll verfülltes System darstellt, wird eine weitere Verschärfung unter Einbeziehung der Zone 1 als nicht sinnvoll angesehen. Die ESK hat das Verständnis, dass bei diesem Kriterium die gültige DIN in der jeweils aktuellen Fassung anzuwenden ist.“

Aus den vorgenannten Zitaten wurden hier folgende für die Beantwortung der Fragestellungen wesentlichen Aussagen abgeleitet:

1. Bewertungsmaßstab ist die örtliche seismische Gefährdung.
2. Das seismische Gefährdungsniveau wird im StandAG nicht explizit genannt, ergibt sich jedoch implizit aus der Norm DN_2011.
3. Bewertungsgröße ist die makroseismische Intensität.
4. Das Ausschlusskriterium ist erfüllt, wenn die makroseismische Intensität $I \geq 7$ ist.
5. Das Ausschlusskriterium dient ausschließlich einer groben Abschätzung.
6. Die ESK empfiehlt, bei dem Kriterium die jeweils aktuell gültige DIN anzuwenden.

2.3 Relevanz des Ausschlusskriteriums „Seismische Aktivität“ in Hinblick auf die Erdbebengefährdung eines Endlagers

Die aus der Begründung und Entstehung des Ausschlusskriteriums „Seismische Aktivität“ abgeleiteten Aussagen führen zur Frage nach der Relevanz des Kriteriums in Hinblick auf die Gefährdung eines Endlagers für hochradioaktiver Abfälle durch Erdbeben. In diesem Abschnitt werden wesentliche Fragen zu diesem Thema angesprochen. Eine ausführlichere Darstellung enthält Anhang 1.

1. Der Bewertungszeitraum für die Sicherheit des Endlagers beträgt eine Million Jahre (1 Ma) und unterscheidet sich erheblich vom Betrachtungszeitraum der

Bewertungsgrundlage dieses Ausschlusskriteriums, der Norm DN_2011 bzw. DN_2018, der lediglich 50 Jahre (a) beträgt. Daraus ergibt sich die Frage: Ermöglicht die beobachtete Seismizität aus einigen Jahrzehnten bis Jahrhunderten verlässliche Aussagen für 1 Ma, oder kann sich die Seismizität erheblich ändern?

2. Sowohl die Bewertungsgröße des Ausschlusskriteriums (Intensität) als auch die ingenieurseismologische Kenngröße in DN_2018 (spektrale Antwortbeschleunigung im Plateaubereich) gelten für die Erdoberfläche. Da jedoch die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen erfolgen soll, ergibt sich die Frage: Inwieweit sind die seismischen Einwirkungen an der Erdoberfläche zur Bewertung der Sicherheit eines Endlagers geeignet?
3. Der Bewertungsmaßstab des Ausschlusskriteriums ist die örtliche Gefährdung durch seismische Bodenbewegungen beim Durchlaufen einer seismischen Welle. Hiervon unterscheidet sich grundsätzlich eine andere Art der Gefährdung durch Erdbeben, nämlich bruchartige Verschiebungen an großen Störungen im Endlagerbereich. Dieser Art der Gefährdung kommt bei einem Endlager in tiefen geologischen Formationen eine wesentlich größere Bedeutung zu. Daraus ergibt sich die Frage: Welche Relevanz hat der Bewertungsmaßstab Gefährdung durch seismische Bodenbewegungen für die Beantwortung der Fragestellung, ob ein Gebiet als Endlagerstandort ungeeignet ist?
4. Das Ausschlusskriterium „Seismische Aktivität“ bezieht sich im Unterschied zu allen anderen Ausschlusskriterien in StandAG § 22 nicht auf ein wissenschaftlich formuliertes Merkmal, sondern auf eine Norm. Die Festlegung der Erdbebenzonen bzw. die Festlegung der Bemessungsgrößen in der Norm stellt einen Kompromiss zwischen unterschiedlichen Interessen unter Beachtung von wirtschaftlichen Überlegungen dar. Daraus ergibt sich die Frage: Ist die Verwendung der Erdbebenbaunorm DIN EN 1998-1/NA (unabhängig vom jeweils gültigen Stand) als Bewertungsgrundlage für das Ausschlusskriterium aus formalen und fachlichen Gründen geeignet?
5. Mehrere Arten von Ungewissheiten spielen bei der Bewertung des Ausschlusskriteriums eine Rolle. Auf diese Ungewissheiten wird in den Kapiteln 3 und 4 eingegangen. Es handelt sich insbesondere um Ungewissheiten bei den seismischen Gefährdungsberechnungen, in der Vorgehensweise zur Anwendung des Ausschlusskriteriums und die hier angesprochenen Ungewissheiten beim Bewertungszeitraum, der Bewertungsgröße und des Bewertungsmaßstabs. Daraus ergibt sich die Frage: Wie wird mit diesen Ungewissheiten bei der Anwendung des Ausschlusskriteriums umgegangen?

Diese fünf Fragen sind vor der Ermittlung der Erdbebengefährdung eines Endlagers für hochradioaktiver Abfälle unbedingt zu klären. Wenn die Erdbebengefährdung für einen Endlagerstandort unter Berücksichtigung dieser Punkte ermittelt wird, würde sie sich sehr wahrscheinlich von der dem Ausschlusskriterium „Seismische Aktivität“ zugrundeliegenden Gefährdung erheblich unterscheiden.

2.4 *Darstellung der seismischen Gefährdung in der Norm DIN EN 1998-1/NA:2011-01 (DN_2011) und im Entwurf E DIN EN 1998-1/NA:2018-10 (DN_2018)*

2.4.1 DIN EN 1998-1/NA:2011-01 (DN_2011)

Die Bewertungsgrundlage für die Anwendung des Ausschlusskriteriums „Seismische Aktivität“ bildet die Karte „*Schematische Darstellung der Erdbebenzonen der Bundesrepublik Deutschland*“, Bild NA.1 in DN_2011. Diese Karte ist in Abb. 1 wiedergegeben. Deutschland ist in dieser Darstellung in 4 Erdbebenzonen (0 bis 3) unterteilt; weitere Gebiete, die nicht den Erdbebenzonen zugeordnet sind, werden als Gebiete sehr geringer Seismizität eingestuft. Die Grundlagen der Karte werden in Kapitel 3 erläutert.

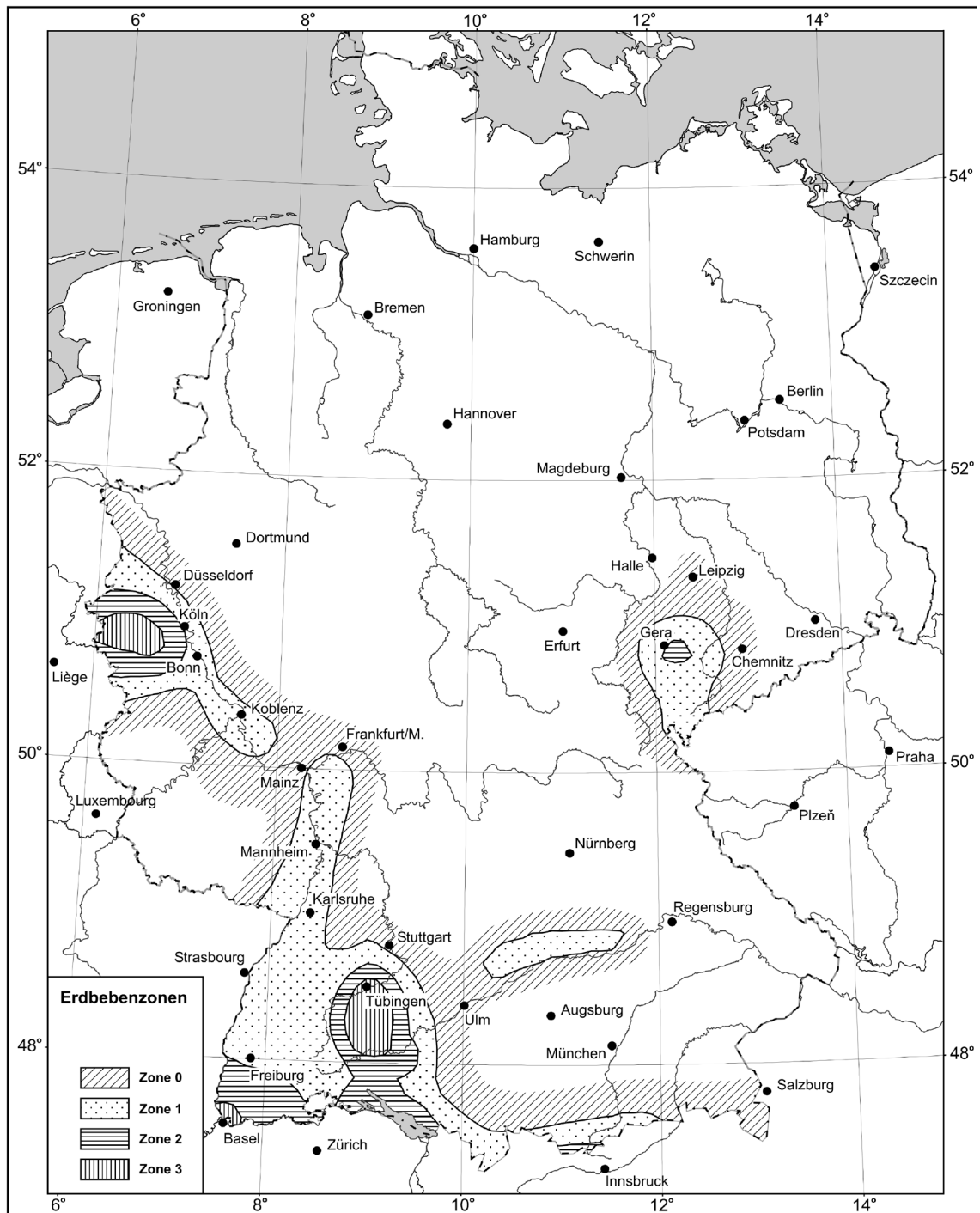


Abb.1: Schematische Darstellung der Erdbebenzonen der Bundesrepublik Deutschland, Bild NA.1 in der Deutschen Norm DN_2011.

Das Ausschlusskriterium „Seismische Aktivität“ nach StandAG § 22 ist erfüllt, wenn die örtliche seismische Gefährdung größer ist als in Erdbebenzone 1 nach DN_2011. Dies trifft für die in Abb. 1 ausgewiesenen Erdbebenzonen 2 und 3 zu.

Den Erdbebenzonen wird als ingenieurseismologischer Kenngröße in Tabelle NA.3 „Zuordnung von Intensitätsintervallen und Referenz-Spitzenwerten der Bodenbeschleunigung zu den Erdbebenzonen“ in DN_2011 jeweils ein Intensitätsintervall sowie (mit Ausnahme der Erdbebenzone 0) ein „Referenz-Spitzenwert der Bodenbeschleunigung a_{gR} “ zugeordnet. Nach dieser Tabelle ist das Ausschlusskriterium „Seismische Aktivität“ für die Intensität $I \geq 7$ erfüllt.

Die Karte „Schematische Darstellung der Erdbebenzonen der Bundesrepublik Deutschland“ in der Norm DN_2011 ist das Ergebnis einer probabilistischen seismischen Gefährdungsanalyse, die in den Jahren 1993-1995 erarbeitet wurde. Datengrundlage, Methoden und Ergebnisse dieser Gefährdungsanalyse wurden im Bericht von Grünthal & Bosse (1996) veröffentlicht. Die Karte „Schematische Darstellung der Erdbebenzonen der Bundesrepublik Deutschland“ in DN_2011 basiert auf der in Grünthal & Bosse (1996) als Ergebnis dargestellten Abb. 7. „Erdbebenzonierungskarte für das Nationale Anwendungsdokument zum EUROCODE 8“.

2.4.2 E DIN EN 1998-1/NA:2018-10 (DN_2018)

Der Entwurf DN_2018 wurde vom DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau) NA 005-01-06 AA „Erdbeben, Sonderfragen (SpA CEN/TC250/SC 8)“ erarbeitet. Das zugrundeliegende Verfahren und die Grundzüge zur Aktualisierung der DIN bzw. des deutschen nationalen Anhangs zu EC8 wurden in Fehling & Schwarz (2019) zusammengefasst. In diesem Entwurf der Norm ist die Karte der maßgebenden ingenieurseismologischen Kenngröße im Bild NA.1 „Darstellung der räumlichen Verteilung der spektralen Antwortbeschleunigung für das Untergrundverhältnis A-R im Plateaubereich $S_{ap,R}$ für eine Wiederkehrperiode $T_{NCR} = 475$ Jahre“ wiedergegeben. Die Darstellungen der spektralen Antwortbeschleunigungen weisen im mittleren Frequenz- bzw. Periodenbereich ein Plateau auf. Dort nimmt das Spektrum seinen maximalen Wert an. Mit dem Untergrundverhältnis A-R ist der hier betrachtete Referenzfall „Fels“ gemeint. T_{NCR} ist die mittlere Wiederkehrperiode, die der gewählten Wahrscheinlichkeit des Überschreitens der ingenieurseismologischen Kenngröße von 10 % in 50 a entspricht. Diese Karte ist in Abb. 2 wiedergegeben. Sie ist ebenfalls das Ergebnis einer probabilistischen seismischen Gefährdungsanalyse, deren Datengrundlage, Methoden und Ergebnisse in Grünthal et al. (2018d) dargestellt wurden. Ergänzendes Material und Daten zu dieser Publikation wurde in Grünthal et al. (2018a) und Grünthal et al. (2018b) publiziert. Die Ergebnisse der seismischen Gefährdungsberechnungen wurden zusätzlich im Internet unter http://www.gfz-potsdam.de/EqHaz_D2016 veröffentlicht. Eine Zusammenfassung in deutscher Sprache findet sich in Grünthal et al. (2018c). Aus dieser Publikation wurden die deutschsprachigen Fachbegriffe in den vorliegenden Bericht übernommen. Grünthal & Bosse (2020) veröffentlichten einen Vergleich zwischen den Erdbebenkarten in DN_2011 und DN_2018.

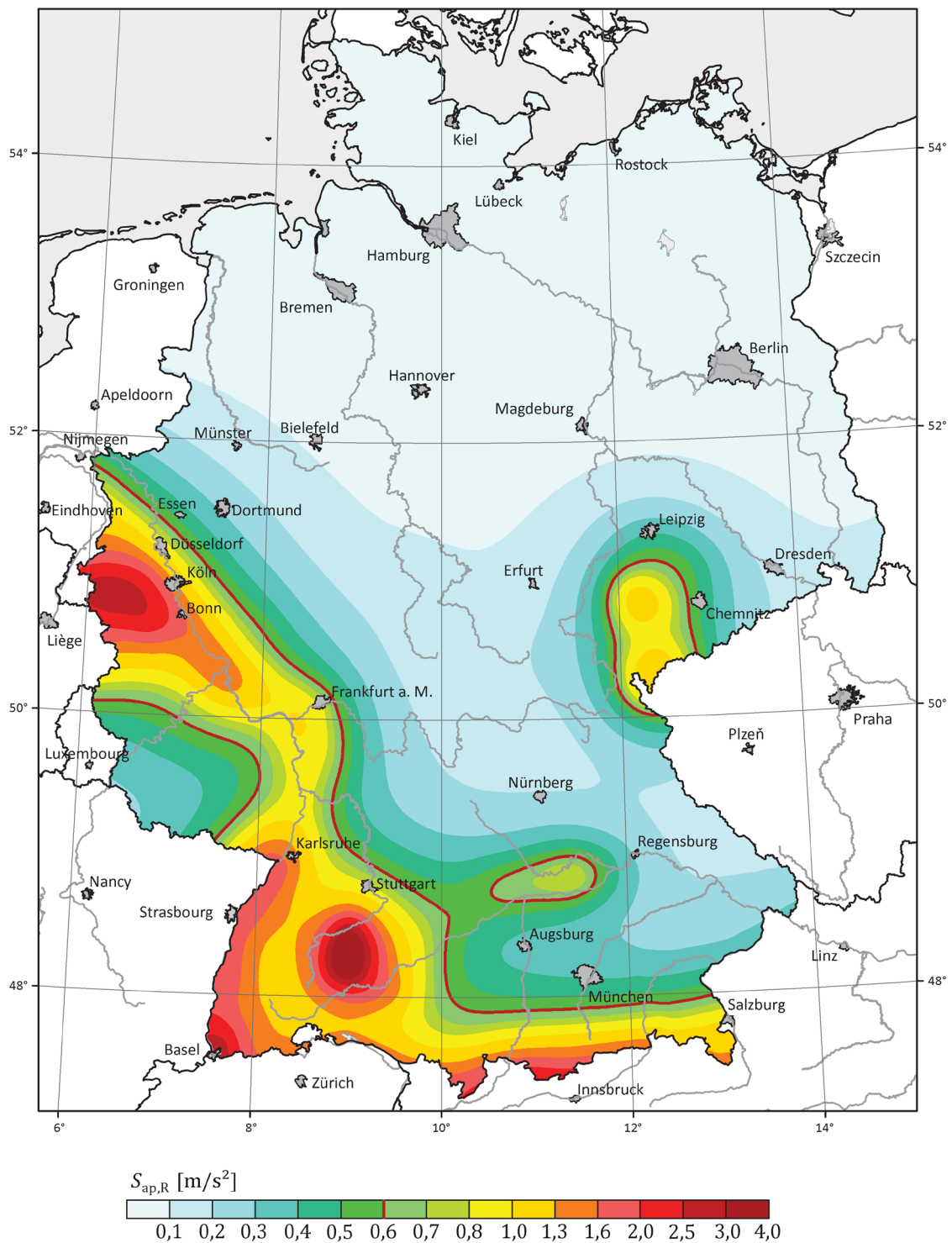


Abb. 2: Darstellung der räumlichen Verteilung der spektralen Antwortbeschleunigung für das Untergrundverhältnis A-R im Plateaubereich $S_{ap,R}$ für eine Wiederkehrperiode $T_{NCR} = 475$ a, Bild NA.1 in DN_2018. Anmerkung aus diesem Norm-Entwurf: „Für Beschleunigungen $S_{ap,R} < 0,6$ m/s² muss die vorliegende Norm in der Regel für übliche Hochbauten aller Bedeutungskategorien nicht angewendet werden.“ Dieser Grenzwert ist durch die rote Linie markiert.

3 Unterschiede zwischen der Norm DIN EN 1998-1/NA:2011-01 (DN_2011) und dem Entwurf E DIN EN 1998-1/NA:2018-10 (DN_2018)

3.1 Unterschiede im Datenbestand

3.1.1 Erdbebenkatalog

Der jeweils verwendete Erdbebenkatalog ist eine entscheidende Grundlage für die seismische Gefährdungsberechnung. Die Erdbebenkataloge, die den seismischen Gefährdungsrechnungen für die Erdbeben-Baunormen zugrunde lagen, wurden nicht veröffentlicht und stehen der BGR nicht zur Verfügung. Die Erdbebenkataloge enthielten jeweils ausschließlich tektonische Erdbeben. Seismische Ereignisse, welche durch menschliche Aktivitäten induziert sind, wurden demnach nicht berücksichtigt.

Der Erdbebenkatalog, welcher der Gefährdungskarte für DN_2011 zugrunde lag, enthielt Erdbeben von 1000 bis ca. 1995 (Grünthal & Bosse 1996).

Der Erdbebenkatalog, welcher der Gefährdungskarte für DN_2018 zugrunde lag, wurde grundlegend verbessert und aktualisiert und enthält so Erdbeben von 1000 bis 2014. Grünthal et al. (2018c) stellen hierzu fest, dass die Seismizitätsdaten „*grundlegend überarbeitet*“ wurden, woraus sich „*drastische Änderungen*“ ergaben: Neben der Verbesserung der Datenbasis lag der entscheidende Unterschied im verwendeten Stärkemaß für die Erdbeben. Für DN_2011 wurde hierfür die Epizentralintensität I_0 verwendet, für DN_2018 dagegen die Momentmagnitude M_w . Dies entsprach einer Erhöhung der Qualität, da M_w ein physikalisch basiertes Stärkemaß darstellt und seit vielen Jahren in der Seismologie und Ingenieurseismologie favorisiert wird.

3.1.2 Seismische Quellen

Eine weitere Grundlage für die Berechnung der seismischen Gefährdung ist die Einteilung des Untersuchungsgebiets in seismische Quellen. Bei der Gefährdungsberechnung wird angenommen, dass die Seismizität in einer seismischen Quelle homogen ist, dass also die räumliche und zeitliche Verteilung der Seismizität sowie die Magnitudenhäufigkeiten homogen ist. Die Abgrenzung von seismischen Quellen ist mit großen epistemischen Ungewissheiten verbunden (siehe Abschnitt 3.2.4).

In Grünthal & Bosse (1996) wurden die seismischen Quellen „*seismische Herdregionen*“ genannt. Für die Berechnung wurde eine Einteilung verwendet, die im Bericht Grünthal & Bosse (1996) in deren Abb. 4 dargestellt wurde.

In der neuen seismischen Gefährdungsberechnung Grünthal et al. (2018d) wurde die Bezeichnung „*seismic sources*“ verwendet. Um die Ungewissheiten zu berücksichtigen, wurden fünf verschiedene Einteilungen in seismische Quellen verwendet, welche die tektonischen Strukturen und die Seismizität unterschiedlich berücksichtigen. Zusätzlich wurden zwei quellregionenfreie Ansätze verwendet, bei denen die beobachtete Seismizität geglättet wurde und die keine Abgrenzung von seismischen Quellen benötigten. Diese unterschiedlichen Modelle wurden mit Gewichtungen versehen mit einem logischen Baum in den Berechnungen berücksichtigt (siehe Abschnitt 3.2.4). Die in Grünthal & Bosse (1996) verwendete Einteilung wurde in Grünthal et al. (2018d) nicht mehr verwendet. Allerdings weist die Einteilung nach Modell D in Grünthal et al. (2018d) – vergleiche Abb. 3.4 in Grünthal et al., (2018b) – in Süddeutschland und in der Niederrheinischen Bucht große Ähnlichkeiten mit der Einteilung in Grünthal & Bosse (1996) auf.

3.1.3 Geologische Untergrundverhältnisse

Die geologischen Untergrundverhältnisse wurden in Grünthal & Bosse (1996) nicht explizit berücksichtigt. Es handelt sich um mittlere Untergrundverhältnisse in den deutschen Erdbebengebieten, genau genommen an den Orten der makroseismischen Beobachtungen, die Sponheuer (1960) für die Ableitung seiner Intensitäts-Abnahmebeziehung verwendete (siehe Abschnitt 3.2.2).

Die seismische Gefährdungskarte in Grünthal et al. (2018d) wurde hingegen für sogenannten Felsuntergrund berechnet. Dabei wurde eine mittlere Scherwellengeschwindigkeit in den oberen 30 m von 800 m/s vorausgesetzt. In DN_2018 wurde die entsprechende geologische Untergrundklasse als „*Fels, Felsgestein*“ bezeichnet und definiert: „*Bereiche mit fehlenden oder nur geringmächtigen Lockersedimenten (meist Quartär), darunter Festgestein mit Scherwellengeschwindigkeiten größer als ca. 800 m/s.*“ Der Felsuntergrund dient als Referenz in der regionalen Darstellung der Gefährdung wie in Abb. 2. DN_2018 enthält die Vorgehensweise, wie das Antwortspektrum auf die tatsächlichen lokalen Untergrundverhältnisse an Standorten anzupassen ist.

3.2 Unterschiede in den Berechnungsmethoden und in den ingenieur-seismologischen Kenngrößen

Sowohl der Erdbebenzonenkarte in DN_2011 als auch der Karte der ingenieurseismologischen Kenngrößen in DN_2018 lagen probabilistische seismische Gefährdungsberechnungen zugrunde. Beide Karten wurden für eine Überschreitenswahrscheinlichkeit von 10 % in 50 a der jeweiligen ingenieurseismologischen Kenngrößen berechnet, was einer mittleren Wiederholungsperiode von 475 a entspricht (in DN_2011 und DN_2018 als „Referenz-Wiederkehrperiode T_{NCR} “ bezeichnet).

In den Details der Berechnungen bestanden jedoch erhebliche Unterschiede, die im Folgenden kurzgefasst dargestellt werden, soweit sie für die Fragestellung dieses Berichts relevant sind.

3.2.1 Parameter der Bodenbewegung bei der seismischen Gefährdungsberechnung

Der Parameter der Bodenbewegung bei der seismischen Gefährdungsberechnung für DN_2011 war die makroseismische Intensität I .

Die Parameter der Bodenbewegung bei der seismischen Gefährdungsberechnung für DN_2018 waren die spektralen Amplituden des Antwortspektrums der horizontalen Bodenbeschleunigungen für 5 % Dämpfung. Die Werte wurden für ein Gitter mit $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ Punktabstand berechnet. Für die Kartendarstellung im Entwurf der Norm wurde für jeden Gitterpunkt der Mittelwert der Amplituden bei den Perioden $T = 0,1$ s, $0,15$ s und $0,2$ s berechnet. Dieser Wert wird in DN_2018 als „*spektrale Antwortbeschleunigung im Plateaubereich*“ bezeichnet (abgekürzt: $S_{ap,R}$), in Grünthal et al. (2018c) als „*Mittelwert der Amplituden des Antwortspektrums*“ (abgekürzt: *meanSRA*).

3.2.2 Seismische Bodenbewegungsmodelle

Bodenbewegungsmodelle (englisch: ground motion prediction equations, GMPE; in Grünthal et al. (2018c) auch mit „*Starkbodenbewegungsmodelle*“ bezeichnet) beschreiben den Zusammenhang zwischen den Amplituden der seismischen Bodenbewegung an einem Standort in Abhängigkeit von der Stärke des Erdbebens (in der Regel heutzutage Magnitude M_w), der Entfernung des Erdbebens zum Standort und weiteren Einflussgrößen. Sie sind ein zentraler Bestandteil einer seismischen Gefährdungsberechnung, in die in der Regel eine Anzahl von prinzipiell geeigneten Modellen eingeht. Bei der Auswahl geeigneter Bodenbewegungsmodelle müssen Kriterien wie Magnituden-, Entfernungs- und Herdtiefenbereich, Seismizität, Spannungsabfall, Herdmechanismen, geologisch-tektonische Bedingungen, Dämpfungseigenschaften der Kruste und lokale Untergrundeigenschaften berücksichtigt werden.

In der Gefährdungsberechnung für DN_2011 wurde nur 1 Bodenbewegungsmodell verwendet (Grünthal & Bosse 1996). Dieses Modell ist die Beziehung von Sponheuer (1960), welche die makroseismische Intensität an einem Standort als Funktion der Epizentralintensität und der Hypozentralentfernung beschreibt.

In der Gefährdungsberechnung für DN_2018 wurden 5 unterschiedliche Bodenbewegungsmodelle verwendet, um die Ungewissheiten bei deren Auswahl zu berücksichtigen (siehe Abschnitt 3.2.4). Diese Modelle beschreiben die spektralen Amplituden des Antwortspektrums als Funktion der Entfernung, der Momentmagnitude M_w und weiterer Einflussgrößen. Eine dieser Einflussgrößen ist ein Faktor für die Ungewissheiten im Spannungsabfall des Erdbebens, der ebenfalls für jedes Bodenbewegungsmodell variiert wird. Ein weiterer Einflussfaktor in manchen der Modelle ist das tektonische Regime (Überschiebung, Abschiebung oder Blattverschiebung).

3.2.3 Ingenieurseismologische Kenngröße der seismischen Einwirkung für die Ermittlung bzw. Skalierung der Antwortspektren

In DN_2011 wurde als Kenngröße der seismischen Einwirkung der „Referenz-Spitzenwert der Bodenbeschleunigung“ in m/s^2 verwendet. Seine Werte wurden den Intensitätsintervallen der Erdbebenzonen zugeordnet (Schwarz 1997).

In DN_2018 wurde als Kenngröße der seismischen Einwirkung der Mittelwert der Amplituden im Plateaubereich des Antwortspektrums der horizontalen Bodenbeschleunigungen $S_{ap,R}$ verwendet (siehe Abschnitt 3.2.1). Im Unterschied zur DN_2011 wurde dieser Wert nicht den Intensitätsintervallen der Erdbebenzonen zugeordnet, sondern er ist ein direktes Ergebnis der probabilistischen seismischen Gefährdungsberechnung.

3.2.4 Berücksichtigung von Ungewissheiten

Die korrekte Bewertung und angemessene Berücksichtigung von Ungewissheiten (englisch: uncertainties) nach heutigem Stand von Wissenschaft und Technik ist ein wesentlicher Bestandteil von probabilistischen seismischen Gefährdungsberechnungen. Dabei werden zwei Arten von Ungewissheiten unterschieden: epistemische Ungewissheiten und aleatorische Variabilitäten (Budnitz et al. 1997).

Die epistemischen Ungewissheiten bezeichnen die Ungewissheiten infolge unvollständiger Kenntnis, z. B. von Modellen oder Parametern. Sie werden meistens mittels logischem Baum berücksichtigt. Die epistemischen Ungewissheiten können durch zusätzliche Daten, Informationen oder verbesserte Modellkenntnisse reduziert werden.

Die aleatorische Variabilität bezeichnet die inhärente Zufälligkeit eines Prozesses. Aleatorische Variabilitäten werden durch Wahrscheinlichkeitsverteilungen von Parametern beschrieben und auf diese Weise in der seismischen Gefährdungsberechnung berücksichtigt. Die aleatorische Variabilität lässt sich nicht reduzieren.

In der Gefährdungsberechnung für DN_2011 wurden Ungewissheiten nicht berücksichtigt (Grünthal & Bosse 1996).

In der Gefährdungsberechnung für DN_2018 wurden Ungewissheiten explizit nach Stand von Wissenschaft und Technik berücksichtigt. Mittels logischem Baum wurden folgende epistemische Ungewissheiten berücksichtigt: (1) seismische Quellen, siehe Abschnitt 3.1.2, (2) Magnituden-Häufigkeitsverteilungen und (3) Bodenbewegungsmodelle, teilweise unter Berücksichtigung der Ungewissheiten im Spannungsabfall der Erdbeben, siehe Abschnitt 3.2.2. Der Logische Baum umfasste insgesamt 4040 Endzweige (Grünthal et al. 2018d).

Die aleatorischen Variabilitäten, die in der Gefährdungsberechnung für DN_2018 berücksichtigt wurden, sind (1) die Verteilungen der Herdtiefen der Erdbeben, (2) die Variabilität des jeweiligen Bodenbewegungsmodells sowie (3) das tektonische Regime in einigen Bodenbewegungsmodellen.

Als Kennzahlen für die Darstellung der Ungewissheiten wurden in Grünthal et al. (2018d) das arithmetische Mittel, sowie die Quantilen für 16 %, 50 % (Median) und 84 % der seismischen Gefährdungskurven bei der Überschreitenswahrscheinlichkeit 10 % in 50 a der 4040 Endzweige des logischen Baums berechnet. Die Ungewissheit wurde in Grünthal et al. (2018d) z. B. anhand des Quotienten der Quantilen 84 % / 16 % für den Mittelwert der Amplituden im Plateaubereich des Antwortspektrums $S_{ap,R}$ dargestellt. Der Wert dieses Quotienten beträgt rund 2,5 im Bereich der Niederrheinischen Bucht und des Oberrheingrabens und erreicht etwa 7 auf der Schwäbischen Alb, wo die epistemischen Ungewissheiten besonders hoch sind.

Aus den Berechnungen ergab sich, dass der Mittelwert immer über dem Median lag. Für DN_2018 wurde vom DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau) NA 005-01-06 AA „Erdbeben, Sonderfragen (SpA CEN/TC250/SC 8)“ entschieden, die arithmetischen Mittelwerte als maßgebende ingenieurseismologische Kenngrößen zu verwenden.

4 Auswahl einer geeigneten Vorgehensweise zur Anwendung des Ausschlusskriteriums „Seismische Aktivität“

4.1 Kriterien zur Auswahl einer geeigneten Vorgehensweise

Bei der Beantwortung der Frage, ob eine Übertragung der in DN_2011 vorgenommenen Klassifizierung der Erdbebenzonen in DN_2018 möglich ist, um eine Anwendung des Ausschlusskriteriums gemäß § 22 (2) 4. StandAG vornehmen zu können, und welche Vorgehensweise dafür am besten geeignet ist, werden die folgenden Kriterien als Bedingung für die Entscheidung zu Grunde gelegt. Diese Kriterien zur Auswahl einer geeigneten Vorgehensweise sind deutlich von den Ausschlusskriterien im StandAG zu unterscheiden.

Die Vorgehensweise

1. bedeutet eine Konkretisierung im Sinne des Gesetzestextes;
2. entspricht dem Stand von Wissenschaft und Technik;
3. ist konsistent mit den Vorgehensweisen, die den Normen in ihren jeweiligen Ständen zugrunde liegen;
4. bezieht sich ausschließlich auf Datengrundlagen und Modelle (z. B. Abnahmebeziehungen, seismische Quellen), die für die Erdbebengebiete Deutschlands gelten;
5. ist mit geringen Ungewissheiten verbunden, insbesondere mit möglichst wenigen Zwischenschritten umzusetzen, die jeweils einen Beitrag zur den Ungewissheiten liefern.

Im Rahmen der Bearbeitung der Fragestellung werden mehrere Vorgehensweisen betrachtet. Die Vorgehensweisen verwenden teilweise die Intensität als maßgebende Bewertungsgröße des Ausschlusskriteriums, verschiedene ingenieurseismologische Kenngrößen aus DN_2011 und DN_2018 und verschiedene Wege zur Übertragung dieser Größen. Im folgenden Abschnitt werden fünf denkbare Vorgehensweisen vorgestellt und unter Anwendung der vorgestellten Kriterien bewertet. Hiermit wird gewährleistet, dass am Ende dieses Prozesses die beste Vorgehensweise transparent und nachvollziehbar ausgewählt wird.

4.2 Anwendung der Kriterien auf die denkbaren Vorgehensweisen und Auswahl der am besten geeigneten Vorgehensweise

4.2.1 Verwendung der Gefährdungskarte der Intensität aus Grünthal et al. (2018d)

Im Rahmen der seismischen Gefährdungsberechnung wurde eine Gefährdungskarte für die makroseismische Intensität für die Überschreitenswahrscheinlichkeit von 10 % in 50 a berechnet und publiziert (Fig. 29 in Grünthal et al. 2018d). Diese Karte wurde auch als interaktive Darstellung im Internet veröffentlicht (siehe Abschnitt 4.3). Da – wie im Abschnitt 2.2 ausgeführt wurde – das Ausschlusskriterium erfüllt ist, wenn die makroseismische Intensität $I \geq 7$ ist, lässt diese Karte eine direkte Festlegung dieser Gebiete zu.

Zum Kriterium 1. Wie im Abschnitt 2.2 erläutert wurde, ist nach dem Ausschlusskriterium ein Gebiet nicht als Endlagerstandort geeignet, wenn eine bestimmte, vorgegebene seismische Gefährdung überschritten wird. Einerseits wird der Sinn dieser Formulierung durch die vorgeschlagene Vorgehensweise zwar konkretisiert, andererseits geht bei dieser Vorgehensweise der Bezug zur Norm DIN EN 1998-1/NA verloren. Dadurch wird die formale Erfüllung des Kriteriums 1 infrage gestellt.

Zum Kriterium 2. Die in Grünthal et al. (2018d) veröffentlichte intensitätsbasierte seismische Gefährdungskarte berücksichtigt im Datenbestand, in den Berechnungsmethoden und in den ingenieurseismologischen Kenngrößen den Stand von Wissenschaft und Technik (siehe Kapitel 3). Das Kriterium 2 ist damit erfüllt.

Zum Kriterium 3. Die in DN_2011 und dargestellte Karte und die Gefährdungskarte der Intensität in Grünthal et al. (2018d) basieren auf probabilistischen seismischen Gefährdungsberechnungen für eine Überschreitenswahrscheinlichkeit von 10 % in 50 a. Die zugrundeliegenden Vorgehensweisen sind miteinander konsistent. Das Kriterium 3 ist erfüllt.

Zum Kriterium 4. Die Gefährdungskarte der Intensität wurde auf Basis von Datengrundlagen und Modellen berechnet, die für die Erdbebengebiete Deutschlands gelten. Damit ist das Kriterium 4 erfüllt.

Zum Kriterium 5. Die Vorgehensweise erfordert keine Zwischenschritte und weitere Annahmen. Die Ungewissheiten entsprechen den Ungewissheiten der seismischen Gefährdungsberechnung. Das Kriterium 5 ist erfüllt.

4.2.2 Verwendung des Referenz-Spitzenwertes der Bodenbeschleunigung aus DIN EN 1998-1/NA:2011-01

Ein denkbarer Weg wäre die Verwendung des Referenz-Spitzenwertes der Bodenbeschleunigung a_{gR2011} , deren Beträge in DN_2011 (Tabelle NA.3) den Intensitätsintervallen der Erdbebenzonen 1, 2 und 3 zugeordnet sind (siehe Abschnitt 3.2.3). Hierfür müsste ein Weg zur Übertragung von a_{gR2011} auf $S_{ap,R}$ in DN_2018 gefunden werden für die Werte von a_{gR2011} , die größer als in Erdbebenzone 1 sind.

Zum Kriterium 1. In DN_2011 ist der Erdbebenzone 1 ein Wert für $a_{gR2011} = 0,4 \text{ m/s}^2$ zugeordnet. In dieser Hinsicht bedeutet eine Konkretisierung des Gesetzestextes und das Kriterium 1 ist erfüllt.

Zum Kriterium 2. Bereits bei der Erarbeitung dieser Zuordnung in Schwarz (1997) wurde auf Defizite und Probleme des Konzepts der effektiven Beschleunigungen hingewiesen. Das Konzept wurde bei der Erarbeitung des Entwurfs DN_2018 nicht weiterverfolgt. In der Fachliteratur existiert keine anerkannte und eindeutige Definition des Referenz-Spitzenwertes der Bodenbeschleunigung und auch keine Umrechnungsbeziehung zwischen dem Referenz-Spitzenwert der Bodenbeschleunigung a_{gR2011} und den Amplituden im Plateaubereich des Antwortspektrums $S_{ap,R}$. Die Norm DN_2011 entspricht somit nicht dem Stand von Wissenschaft und Technik. Das Kriterium 2 ist damit nicht erfüllt.

Zum Kriterium 3. Die Vorgehensweise basiert auf der ingenieurseismologischen Kenngröße in DN_2011. In dieser Hinsicht ist sie konsistent mit der Norm. Da jedoch keine anerkannte Umrechnung von a_{gR2011} in $S_{ap,R}$ existiert, ist eine konsistente Übertragung auf DN_2018 nicht möglich. Das Kriterium 3 ist ebenfalls nicht erfüllt.

Zum Kriterium 4. Die Gefährdungskarte in DN_2011 wurde auf Basis von Datengrundlagen und Modellen berechnet, die für die Erdbebengebiete Deutschlands gelten. Damit ist das Kriterium 4 erfüllt.

Zum Kriterium 5. Da die Vorgehensweise nicht mit anerkannten Umrechnungen entsprechend dem Stand von Wissenschaft und Technik möglich ist, sind keine aussagekräftigen Angaben zu den Ungewissheiten möglich. Das Kriterium 5 ist nicht erfüllt.

Diese Vorgehensweise erfüllt nicht die Kriterien 2, 3 und 5. Deshalb ermöglicht die Verwendung des Referenz-Spitzenwertes der Bodenbeschleunigung keine nachvollziehbare Vorgehensweise um eine Anwendung des Ausschlusskriteriums vornehmen zu können.

4.2.3 Verwendung der Referenz-Spitzenbodenbeschleunigung aus E DIN EN 1998-1/NA:2018-10

Die Referenz-Spitzenbodenbeschleunigung a_{gR2018} wurde in DN_2018 eingeführt. Diese Größe unterscheidet sich trotz der ähnlichen Bezeichnung von dem Referenz-Spitzenwert der Bodenbeschleunigung a_{gR2018} in DN_2011. Es handelt sich bei a_{gR2018} um eine abgeleitete Größe, die mit einem in DN_2018 festgelegten Faktor (siehe dort Gleichung (NA.1)) aus den Amplituden im Plateaubereich des Antwortspektrums berechnet wird.

Zum Kriterium 1. In DN_2018 besteht ein Zusammenhang zwischen a_{gR2018} und dem Niveau der seismischen Gefährdung, bei dem, wie im Abschnitt 2.2 erläutert wurde, das Ausschlusskriterium erfüllt ist. Das Kriterium 1 ist erfüllt.

Zum Kriterium 2. Da die Norm DN_2018 dem Stand von Wissenschaft und Technik entspricht, gilt dies auch für die Verwendung von a_{gR2018} . Das Kriterium 2 ist damit erfüllt.

Zum Kriterium 3. Die Vorgehensweise basiert auf der ingenieurseismologischen Kenngröße in DN_2018. In dieser Hinsicht ist sie konsistent mit der Norm. Eine Umrechnungsbeziehung zwischen a_{gR2018} und a_{gR2011} ist in den Normen nicht angegeben. Auch in der Fachliteratur existiert keine Umrechnungsbeziehung zwischen a_{gR2018} und a_{gR2011} . Damit bietet die Verwendung von a_{gR2018} keine Vorgehensweise, die eine konsistente Übertragung von DN_2011 auf DN_2018 ermöglicht. Das Kriterium 3 ist nicht erfüllt.

Zum Kriterium 4. Die Gefährdungskarte in DN_2018 wurde auf Basis von Datengrundlagen und Modellen berechnet, die für die Erdbebengebiete Deutschlands gelten. Damit ist das Kriterium 4 erfüllt.

Zum Kriterium 5. Da die Vorgehensweise nicht mit anerkannten Umrechnungen entsprechend dem Stand von Wissenschaft und Technik möglich ist, sind keine aussagekräftigen Angaben zu den Ungewissheiten möglich. Das Kriterium 5 ist nicht erfüllt.

Da die Kriterien 3, 4 und 5 nicht erfüllt sind, ist die Verwendung der Referenz-Spitzenbodenbeschleunigung a_{gR2018} keine geeignete Vorgehensweise um eine Anwendung des Ausschlusskriteriums vornehmen zu können.

4.2.4 Umrechnung von Intensität in Spitzenbodenbeschleunigung mittels publizierter Umrechnungsbeziehungen

In der Fachliteratur existieren empirische Umrechnungsbeziehungen zwischen der makroseismischen Intensität und der Spitzenbodenbeschleunigung a_g . Eine denkbare Vorgehensweise wäre also die Umrechnung des Grenzwertes Intensität $I = 7$ in DN_2011

in a_g , die unter gewissen Annahmen mit der Referenz-Spitzenbodenbeschleunigung a_{gR2018} in DN_2018 gleichgesetzt und damit durch Multiplikation mit dem dort festgelegten spektralen Überhöhungsfaktor $\beta_0 = 2,5$ in die mittleren Amplituden im Plateaubereich der spektralen Antwortbeschleunigung $S_{ap,R}$ umgerechnet werden kann.

Zum Kriterium 1. Ein Zusammenhang zwischen a_g und dem Niveau der seismischen Gefährdung, bei dem das Ausschlusskriterium erfüllt ist, lässt sich herstellen. Das Kriterium 1 ist erfüllt.

Zum Kriterium 2. Sofern die oben genannten Umrechnungsschritte mittels Beziehungen entsprechend dem Stand von Wissenschaft und Technik durchgeführt werden, ist das Kriterium 2 erfüllt.

Zum Kriterium 3. Die Vorgehensweise basiert nur teilweise auf den Normen, so dass eine Konsistenz nicht gewährleistet ist. Die Erfüllung des Kriteriums 3 ist nicht sichergestellt.

Zum Kriterium 4. Die Vorgehensweise ist nicht ausschließlich an die Gegebenheiten in den Erdbebengebieten Deutschlands angepasst, da (mangels Beobachtungsdaten) keine speziell für Deutschland abgeleitete Umrechnungsbeziehung zwischen der makroseismischen Intensität und der Spitzenbodenbeschleunigung a_g existiert, sondern andere Beziehungen übertragen werden müssten. Damit ist die Erfüllung des Kriteriums 4 nicht sichergestellt.

Zum Kriterium 5. Die Vorgehensweise ist mit mehreren Zwischenschritten und insgesamt mit vergleichsweise großen Ungewissheiten verbunden: Umrechnungsbeziehungen zwischen Intensität I und a_g sind mit großen Ungewissheiten verbunden (siehe unten). Außerdem kann a_g nur unter bestimmten Annahmen und den damit verbundenen Ungewissheiten mit a_{gR2018} gleichgesetzt werden. Das Kriterium 5 ist schlecht erfüllt.

Die Vorgehensweise bietet einen möglichen, jedoch nicht besonders gut geeigneten Weg. Er wird im Anhang 5 dennoch zur Abschätzung der damit verbundenen Ungewissheiten skizziert.

4.2.5 Übertragung der Intensität 7 auf den Plateaubereich der spektralen Antwortbeschleunigung

Das Ausschlusskriterium „Seismische Aktivität“ nach StandAG § 22 ist erfüllt, wenn die örtliche seismische Gefährdung größer ist als in Erdbebenzone 1 nach DN_2011. Die Karte der Erdbebenzonen in DN_2011 ist das Ergebnis einer probabilistischen seismischen Gefährdungsberechnung, welche die Werte der makroseismischen Intensität für die Überschreitenswahrscheinlichkeit von 10 % in 50 a darstellt. Die Gebiete, in denen die örtliche seismische Gefährdung größer ist als in Erdbebenzone 1, sind nach der Definition in DN_2011 die Gebiete, in denen die Intensität $I \geq 7$ ist.

Die Karte im Entwurf DN_2018 ist ebenfalls das Ergebnis einer probabilistischen seismischen Gefährdungsberechnung für dieselbe Überschreitenswahrscheinlichkeit (10 % in 50 a), jedoch nicht für die Intensität, sondern für den Plateaubereich der spektralen Antwortbeschleunigung. Bei dieser neuen Berechnung wurde ergänzend jedoch auch eine Karte der Intensitäten berechnet, die den neuen Datenstand berücksichtigt. Da die neue Karte der Intensitäten ebenfalls für die Überschreitenswahrscheinlichkeit von 10 % in 50 a berechnet wurde, ist eine schlüssige Übertragung des Grenzwertes $I = 7$ in DN_2011 über die neue Intensitätskarte zum entsprechenden Grenzwert für die Amplituden im Plateaubereich der spektralen Antwortbeschleunigung $S_{ap,R}$ im Entwurf DN_2018 ohne weitere Annahmen möglich.

Zum Kriterium 1. Wie im Abschnitt 2.2 erläutert wurde, ist nach dem Ausschlusskriterium ein Gebiet nicht als Endlagerstandort geeignet, wenn eine bestimmte, vorgegebene seismische Gefährdung überschritten wird. Der Sinn dieser Formulierung wird durch die Vorgehensweise konkretisiert. Das Kriterium 1 ist erfüllt.

Zum Kriterium 2. DN_2018 berücksichtigt im Datenbestand, in den Berechnungsmethoden und in den ingenieurseismologischen Kenngrößen den Stand von Wissenschaft und Technik (siehe Kapitel 3). Die Vorgehensweise verwendet als einzige Grundlage diesen Entwurf der Norm. Das Kriterium 2 ist damit erfüllt.

Zum Kriterium 3. Die in DN_2011 und DN_2018 dargestellten Karten basieren auf probabilistischen seismischen Gefährdungsberechnungen für eine Überschreitenswahrscheinlichkeit von 10 % in 50 a. Die Vorgehensweise beruht unmittelbar auf diesen Methoden. Wie im Abschnitt 3.2.4 ausgeführt ist, wurden für DN_2018 die arithmetischen Mittelwerte für $S_{ap,R}$ als maßgebende ingenieurseismologische Kenngrößen verwendet. Folgerichtig wird auch in dieser Vorgehensweise in dem wesentlichen Schritt zur Ermittlung von $S_{ap,R}$ bei der mittleren Intensität 7 der arithmetische Mittelwert für $S_{ap,R}$ zugrunde gelegt. Auch in dieser Hinsicht ist die Vorgehensweise konsistent mit den Methoden, die der Norm DN_2018 zugrunde liegen. Insgesamt sind den Autoren keine Widersprüche in der Vorgehensweise bekannt. Das Kriterium 3 ist erfüllt.

Zum Kriterium 4. Für diese Vorgehensweise wird ein Zusammenhang zwischen der Intensität und den Amplituden im Plateaubereich des Antwortspektrums hergestellt. Dieser Zusammenhang hängt von vielen Einflussgrößen ab, insbesondere von dem Magnitudenbereich, der die seismische Gefährdung dominiert, von den seismischen Bodenbewegungsmodellen und von den lokalen geologischen Untergrundverhältnissen. Für einen möglichst genau passenden Zusammenhang sollten die Einflussgrößen den örtlich gegebenen Bedingungen entsprechen. Der Zusammenhang zwischen Intensität und den Amplituden im Plateaubereich des Antwortspektrums wird für die Isolinie $I = 7$

bestimmt und berücksichtigt damit genau die Bedingungen in den Teilen von Deutschland, die das Gebiet begrenzen, welches entsprechend dieses Ausschlusskriteriums nicht als Endlagerstandort geeignet ist. Damit ist das Kriterium 4 erfüllt.

Zum Kriterium 5. Die Vorgehensweise ermöglicht eine einfache Übertragung von der ursprünglichen Kenngröße auf die neue Kenngröße im Entwurf der Norm. Die Standardabweichung als Maß für die Ungewissheit dieser Übertragung beträgt 10 % (siehe Abschnitt 4.3). Sie ist damit wesentlich kleiner als die Ungewissheiten bei der Gefährdungsberechnung für den Entwurf der Norm. Bei einer Normalverteilung ist das Quantil 84 % gleich dem Erwartungswert plus 1 Standardabweichung und das Quantil 16 % gleich dem Erwartungswert minus 1 Standardabweichung. Der Quotient der Quantilen 84 % / 16 % der auf diese Weise ermittelten Mittelwerte für $S_{ap,R}$ bei der Intensität 7 beträgt 1,2 und ist damit wesentlich kleiner als der Wert dieses Quotienten bei der seismischen Gefährdungsberechnung (Grünthal et al. 2018d), der bei rund 2,5 bis etwa 7 liegt (vergleiche Abschnitt 3.2.4). Das Kriterium 5 ist gut erfüllt.

4.2.6 Zusammenfassende Begründung

Die BGR kommt zu dem Ergebnis, dass eine Übertragung der in DN_2011 vorgenommenen Klassifizierung der Erdbebenzonen in den Entwurf DN_2018 zur Anwendung des Ausschlusskriteriums gemäß § 22 (2) 4. StandAG möglich ist.

Die Übertragung der Intensität 7 auf den Plateaubereich der spektralen Antwortbeschleunigung (Abschnitt 4.2.5) ist die am besten geeignete Vorgehensweise zur Anwendung des Ausschlusskriteriums „Seismische Aktivität“ auf Grundlage des Entwurfs DN_2018. Die Vorgehensweise wird im Abschnitt 4.3 dargestellt. Sie erfüllt die gewählten Kriterien vollständig: Sie konkretisiert das Ausschlusskriterium im Sinne des Gesetzes, entspricht dem Stand von Wissenschaft und Technik, ist widerspruchsfrei und konsistent mit den Normen DN_2011 und DN_2018 sowie den Methoden der zugrundeliegenden seismischen Gefährdungsberechnungen, angepasst an die Gegebenheiten in den Erdbebengebieten Deutschlands und mit geringen Ungewissheiten verbunden, zudem ohne weitere Zwischenschritte umzusetzen. Denkbare alternative Vorgehensweisen erfüllen diese Kriterien schlechter oder gar nicht.

4.3 Vorschlag der BGR zur Anwendung des Ausschlusskriteriums „Seismische Aktivität“

In diesem Abschnitt wird die ausgewählte Vorgehensweise zur Anwendung des Ausschlusskriteriums „Seismische Aktivität“ im Detail vorgestellt.

Die Kartengrundlage für DN_2018 wurde vom Helmholtz-Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ als „*Erdbebengefährdung Deutschland 2016. Interaktive Darstellung von gefährdungs-konsistenten Antwortspektren, seismischen Gefährdungskarten für spektrale Antwortbeschleunigungen und für makroseismische Intensitäten für Deutschland*“ (<https://www.gfz-potsdam.de/sektion/erdbebengefaehrung-und-dynamische-risiken/daten-produkte-dienste/erdbebengefaehrung-deutschland-2016/> bzw. <http://www-app5.gfz-potsdam.de/d-eqhaz16/>, letzter Zugriff am 06.08.2020) im Internet veröffentlicht. Diese Internetseite ist eine Ergänzung der Publikation Grünthal et al. (2018d).

Die Bezeichnungen, Abkürzungen und Einstellungen in der interaktiven Darstellung sind im Folgenden in eckigen Klammern angegeben.

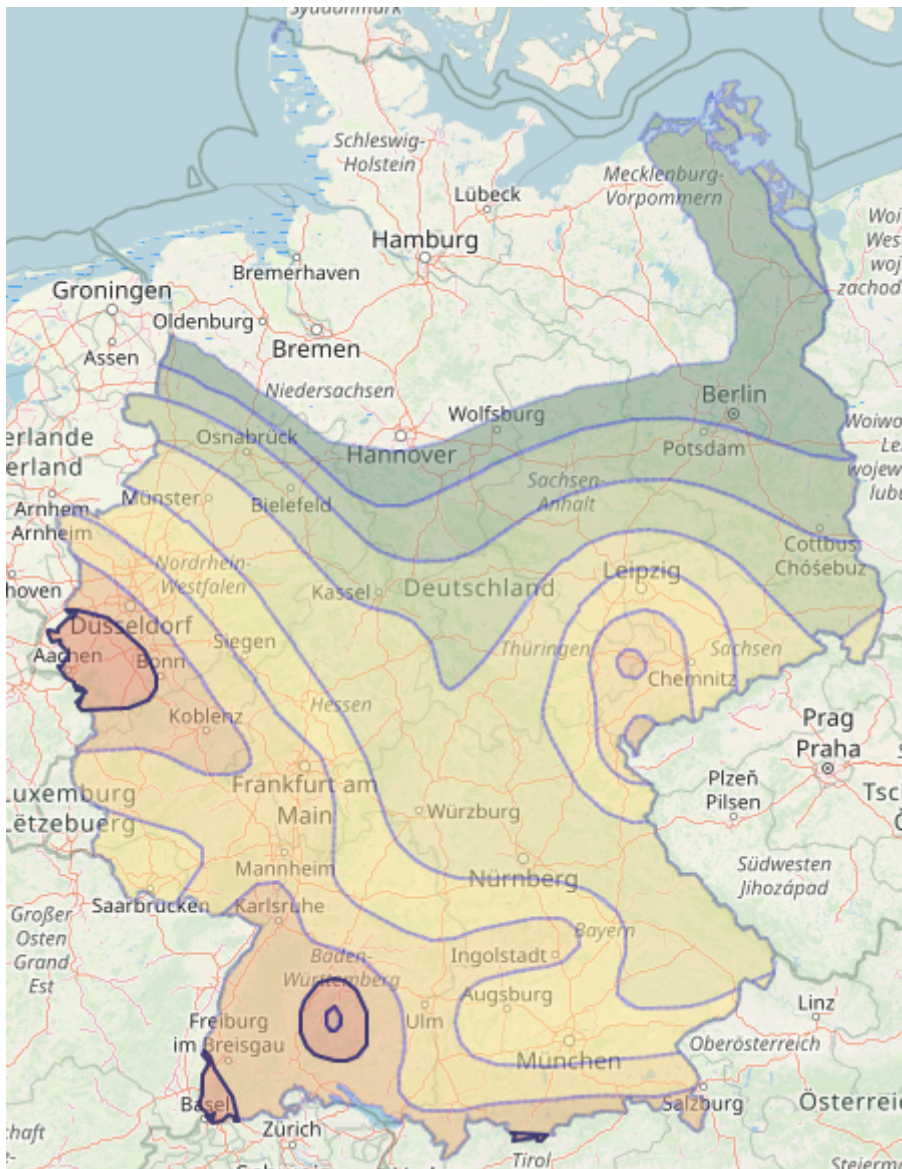


Abb. 3: Ausschnitt aus der interaktiven Darstellung der Verteilung der berechneten makroseismischen Intensitäten in Deutschland für die Überschreitenswahrscheinlichkeit 10 % in 50 a (Mittelwert der probabilistischen Berechnungen). Die Isolinien decken den Bereich von 3,5 bis 8 in Intervallen von 0,5 ab. Die schwarzen Linien begrenzen die Intensitätsklasse zwischen 7,0 und 7,5. Internetseite des GFZ: <http://www-app5.gfz-potsdam.de/d-eqhaz16/>.

- Die dort dargestellte Intensitätskarte für die Überschreitenswahrscheinlichkeit 10 % in 50 a [Einstellung: „Überschreitungswkt. 10% in 50a“ und „Plausibilität an“] zeigt die Intensitätswerte zwischen $I = 3,5$ und $I = 8$ in Schritten von 0,5 (Mittelwert der probabilistischen Berechnungen). Einen Ausschnitt dieser Darstellung zeigt Abb. 3. Die vollständige Darstellung mit den gewählten Einstellungen zeigt Anhang 2. Die Isolinie für die Intensität $I = 7$ setzt sich aus 4 nicht verbundenen Segmenten für die Regionen Niederrheinische Bucht, Schwäbische Alb, südlicher Oberrheingraben und einem kleinen Gebiet nahe der Zugspitze zusammen (vergleiche Abb. 3). Entlang

dieser Segmente für die Isolinien $I = 7$ wird an Stützstellen mit einem gewählten Abstand von jeweils rund 10 km voneinander für die jeweiligen geografischen Koordinaten [lon, lat] der entsprechende Mittelwert für $S_{ap,R}$ [mean_mean] abgelesen. Hierzu wird auf der gewählten Lokation auf der Kartendarstellung doppelt geklickt, so dass das in Anhang 3 beispielhaft dargestellte Fenster erscheint. Hier werden neben dem Antwortspektrum weitere Werte der probabilistischen Gefährdungsberechnung für die gewählten geografischen Koordinaten angegeben. Diese Werte lassen sich mit einem weiteren Klick herunterladen. Der Inhalt dieser Datei wird beispielhaft im Anhang 4 gezeigt. Er enthält unter anderem auch den Wert für $S_{ap,R}$ [hier bezeichnet mit „mean_mean“]. Dieser Wert ist identisch mit dem Wert für $S_{ap,R}$ gemäß der in Abb. 2 in DN_2018 dargestellten räumlichen Verteilung der spektralen Antwortbeschleunigung. Durch diese Abtastung ergeben sich 43 Werte für $S_{ap,R}$, die der Intensität $I = 7$ zugeordnet sind. Diese Werte sind im Anhang 6 aufgelistet.

- Der arithmetische Mittelwert der auf diesem Weg ermittelten Werte für $S_{ap,R}$ bei der Intensität 7 beträgt

$$\overline{S_{ap,R}(I7)} = 1,8 \text{ ms}^{-2}$$

mit einer Standardabweichung von $0,2 \text{ ms}^{-2}$. Die Streuung um den Mittelwert ist zu erwarten, da die spektralen Antwortbeschleunigungen und die Intensitäten mit unterschiedlichen Zweigen des logischen Baumes bei den probabilistischen Berechnungen berücksichtigt wurden.

- Der so bestimmte Mittelwert $\overline{S_{ap,R}(I7)} = 1,8 \text{ ms}^{-2}$ wird als Grenzwert für die Anwendung des Ausschlusskriteriums betrachtet. Er kann in DN_2018 in der Karte der räumlichen Verteilung der spektralen Antwortbeschleunigung im Plateaubereich in der Norm „Bild NA.1“ (Abb. 2) abgegriffen werden. In der interaktiven Karte des GFZ kann für jeden Standort in Deutschland festgestellt werden, ob dieser Wert überschritten wird. Für Gebiete, in denen dieser Wert überschritten wird, gilt das Ausschlusskriterium als erfüllt.
- Über die Berücksichtigung der Standardabweichung ist – wie auch über die Berücksichtigung von weiteren Ungewissheiten (vergleiche Abschnitt 2.3 und Anhang 1) – im Rahmen der Anwendung des Ausschlusskriteriums zu entscheiden.

5 Zusammenfassung

Im Standortauswahlgesetz § 22 „Ausschlusskriterien“ (2) 4. „seismische Aktivität“ wird ausgeführt, dass ein Gebiet nicht als Endlagerstandort geeignet ist, wenn die örtliche seismische Gefährdung größer als in Erdbebenzone 1 nach DIN EN 1998-1/NA:2011-01 (DN_2011) ist. Im Oktober 2018 wurde der Entwurf E DIN EN 1998-1/NA:2018-10 (DN_2018) vorgelegt, der als Ersatz für DN_2011 vorgesehen ist. DN_2018 enthält jedoch keine Darstellungen und Zuordnungen von Erdbebenzonen mehr.

In diesem Kontext hat die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) mit der Bearbeitung von ausgewählten Fragestellungen bezüglich des Ausschlusskriteriums „Seismische Aktivität“ beauftragt. Diese umfassen neben einer Zusammenfassung des für die jeweilige DIN genutzten Datenbestandes eine vergleichende Gegenüberstellung und Erläuterung der jeweils genutzten Berechnungsmethoden. Darauf aufbauend sollte eine verbindliche Einschätzung abgeleitet werden, ob und wie (über welche Kenngrößen) eine Übertragung der in DN_2011 vorgenommenen Klassifizierung der Erdbebenzonen in den Entwurf DN_2018 möglich ist, um eine Anwendung des Ausschlusskriteriums gemäß § 22 (2) 4. StandAG vornehmen zu können.

Aus der Bearbeitung dieser Fragestellungen ergeben sich zusammenfassend die folgenden Ergebnisse:

1. Sowohl die Karte der Erdbebenzonen in DN_2011 als auch die entsprechende Gefährdungskarte in DN_2018 sind das Ergebnis von probabilistischen seismischen Gefährdungsberechnungen für eine Überschreitenswahrscheinlichkeit 10 % in 50 a der jeweiligen ingenieurseismologischen Kenngröße. Bei den Gefährdungsberechnungen bestehen erhebliche Unterschiede im Datenbestand, in den Berechnungsmethoden und in den ingenieurseismologischen Kenngrößen. Der Erdbebenkatalog wurde grundlegend verbessert und aktualisiert und verwendet nun die Momentmagnitude anstatt der Epizentralintensität als Stärkemaß für Erdbeben. Die seismotektonischen Regionen bzw. seismische Quellen wurden verändert und berücksichtigen nun mehrere Varianten. Die geologischen Untergrundverhältnisse wurden in den Berechnungen für DN_2011 nicht berücksichtigt; in DN_2018 gelten sie für Felsuntergrund.
2. Die Parameter der Bodenbewegung bei der seismischen Gefährdungsberechnung sind in DN_2018 die spektralen Amplituden des Antwortspektrums der horizontalen Bodenbeschleunigungen anstelle der makroseismischen Intensität. Entsprechend wurden unterschiedliche Bodenbewegungsmodelle für die spektralen Amplituden des Antwortspektrums als Funktion der Entfernung, der Momentmagnitude und

weiterer Einflussgrößen anstelle eines Modells für die Intensitätsabnahme verwendet. Als ingenieurseismologische Kenngröße der seismischen Einwirkung wird in DN_2018 der Mittelwert der Amplituden im Plateaubereich des Antwortspektrums der horizontalen Bodenbeschleunigungen verwendet, der sich direkt aus den Gefährdungsberechnungen ergibt. Dagegen wurde in DN_2011 der Referenz-Spitzenwert der Bodenbeschleunigung als Kenngröße verwendet, der den Intensitätsintervallen zugeordnet wurde. In der Gefährdungsberechnung für DN_2018 wurden epistemische Ungewissheiten und aleatorischen Variabilitäten umfassend berücksichtigt. Dagegen wurden für DN_2011 keine Ungewissheiten berücksichtigt.

3. Zur nachvollziehbaren Auswahl und Begründung einer geeigneten Vorgehensweise für die Übertragung der in DN_2011 vorgenommenen Klassifizierung der Erdbebenzonen in DN_2018 zur Anwendung des Ausschlusskriteriums „Seismische Aktivität“ werden mehrere denkbare Vorgehensweisen anhand von fünf Kriterien bewertet. Die Übertragung der Intensität 7 auf den Plateaubereich der spektralen Antwortbeschleunigung ist danach die am besten geeignete Vorgehensweise. Sie erfüllt als einzige Vorgehensweise die gewählten Kriterien vollständig und ohne Einschränkungen: Sie konkretisiert das Ausschlusskriterium im Sinne des Gesetzes, entspricht dem Stand von Wissenschaft und Technik, ist widerspruchsfrei und konsistent mit den Normen DN_2011 und DN_2018 und den Methoden der zugrundeliegenden seismischen Gefährdungsberechnungen, angepasst an die Gegebenheiten in den Erdbebengebieten Deutschlands, mit geringen Ungewissheiten verbunden sowie ohne weitere Zwischenschritte umzusetzen. Denkbare alternative Vorgehensweisen erfüllen diese Kriterien schlechter oder gar nicht.
4. Diese Vorgehensweise basiert auf der Tatsache, dass sowohl die Karte in DN_2011 als auch die Karte in DN_2018 für dieselbe Überschreitenswahrscheinlichkeit berechnet wurden. Bei der neuen Gefährdungsberechnung wurde ergänzend auch eine Karte der Intensitäten berechnet. Damit ist eine schlüssige Übertragung des Grenzwertes $I = 7$ in der DN_2011 auf die Amplituden im Plateaubereich der spektralen Antwortbeschleunigung in DN_2018 möglich.
5. Die BGR schlägt vor, als Grenzwert für die Anwendung des Ausschlusskriteriums die mittlere spektrale Antwortbeschleunigung im Plateaubereich bei der Intensität 7 $\overline{S_{ap,R}(I7)} = 1,8 \text{ ms}^{-2}$ zu verwenden. Dieser Wert kann in DN_2018 in der Karte der räumlichen Verteilung der spektralen Antwortbeschleunigung im Plateaubereich „Bild NA.1“ abgegriffen werden. Für Gebiete, in denen dieser Wert überschritten wird, gilt das Ausschlusskriterium als erfüllt.

-
6. Die Standardabweichung bei dieser Übertragung beträgt $0,2 \text{ ms}^{-2}$. Über die Berücksichtigung der Standardabweichung ist gemeinsam mit weiteren Ungewissheiten im Rahmen der Anwendung des Ausschlusskriteriums zu entscheiden.
 7. Die BGR weist auf ungeklärte Fragen zur Relevanz des Ausschlusskriteriums „Seismische Aktivität“ für die Ermittlung der Erdbebengefährdung eines Endlagers für hochradioaktiver Abfälle hin. Auch nach Anwendung dieses Ausschlusskriteriums besteht daher die Notwendigkeit, die Gefährdung eines Endlagers durch Erdbeben im Rahmen von Sicherheitsuntersuchungen zu analysieren.

Literaturverzeichnis

- AkEnd (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte, Empfehlungen des AkEnd - Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte.
- Beyer, K. & Bommer, J.J. (2006): Relationships between Median Values and between Aleatory Variabilities for Different Definitions of the Horizontal Component of Motion. – Bulletin of the Seismological Society of America, 96, 4A: S. 1512-1522. DOI:10.1785/0120050210
- Budnitz, R.J., Apostolakis, G., Boore, D.M., Cluff, L.S., Coppersmith, K.J., Cornell, C.A. & Morris, P.A. (1997): Recommendations for probabilistic seismic hazard analysis: Guidance on uncertainty and use of experts. – Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (United States). Div. of Engineering Technology; Lawrence Livermore National Lab., CA (United States); Electric Power Research Inst., Palo Alto, CA (United States); USDOE, Washington, DC (United States), NUREG/CR-6372. DOI:10.2172/479072
- Calais, E., Camelbeeck, T., Stein, S., Liu, M. & Craig, T.J. (2016): A new paradigm for large earthquakes in stable continental plate interiors. – Geophysical Research Letters, 43, 20: S. 10621-10637. DOI:10.1002/2016gl070815
- Caprio, M., Tarigan, B., Worden, C.B., Wiemer, S. & Wald, D.J. (2015): Ground Motion to Intensity Conversion Equations (GMICEs): A Global Relationship and Evaluation of Regional Dependency. – Bulletin of the Seismological Society of America, 105, 3: S. 1476-1490. DOI:10.1785/0120140286
- DIN EN 1998-1/NA:2011-01 (2011): Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbau. DOI:10.31030/1738038
- E DIN EN 1998-1/NA:2018-10 (2018): Entwurf: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbau. DOI:10.31030/2885780
- ESK (2015): Evaluation der Rand- und Rahmenbedingungen, Bewertungsgrundsätze sowie der Kriterien des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd). – Diskussionspapier der Entsorgungskommission. S. 1-34.

- Fehling, E. & Schwarz, J. (2019): Nationales Anwendungsdokument zu EN 1998-1 – Meilensteine der Entwicklung. – Bauingenieur, 94, April 2019: S. S2-S8.
- Grünthal, G. (Hrsg.) (2020): Kernteil der Europäischen Makroseismischen Skala (EMS-98) in deutscher Übersetzung. Potsdam (Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ). DOI:10.2312/ems-98.core.de
- Grünthal, G. & Bosse, C. (1996): Probabilistische Karte der Erdbebengefährdung der Bundesrepublik Deutschland - Erdbebenzonierungskarte für das Nationale Anwendungsdokument zum Eurocode 8. – Forschungsbericht. GeoForschungsZentrum, Bd. STR 96/10: S. 1-24; Potsdam. DOI:10.2312/GFZ.b103-96103
- Grünthal, G. & Bosse, C. (2020): Unterschiede, Beziehungen und Gemeinsamkeiten der Erdbebenkarten nach bisherigem und neuem Nationalen Anhang zum Eurocode 8. – Bautechnik. DOI:10.1002/bate.202000053
- Grünthal, G., Stromeyer, D. & Bosse, C. (2018a): The data sets of the earthquake model for the probabilistic seismic hazard assessment of Germany, version 2016 - Report on supplementary material for the respective publication. 17/05. – Scientific Technical Report STR - Data; Potsdam. DOI:10.2312/GFZ.b103-17056
- Grünthal, G., Stromeyer, D. & Bosse, C. (2018b): The Source Model of the Probabilistic Seismic Hazard Assessment (PSHA) of Germany - Version 2016. Potsdam (GFZ Data Services). DOI:10.5880/gfz.2.6.2018.001
- Grünthal, G., Stromeyer, D., Bosse, C., Cotton, F. & Bindi, D. (2018c): Neueinschätzung der Erdbebengefährdung Deutschlands – Version 2016 – für DIN EN 1998-1/NA. Bautechnik, 95, 5: S. 371-384. DOI:10.1002/bate.201700098
- Grünthal, G., Stromeyer, D., Bosse, C., Cotton, F. & Bindi, D. (2018d): The probabilistic seismic hazard assessment of Germany - version 2016, considering the range of epistemic uncertainties and aleatory variability. – Bulletin of Earthquake Engineering, 16, 10: S. 4339-4395. DOI:10.1007/s10518-018-0315-y
- Kaiser, D. & Leydecker, G. (2003): ERA Morsleben 9M2142002100 Stellungnahme zum Teil-Prüfbericht der AG Morsleben zum Seismologischen Gutachten und zur Stellungnahme des Geologischen Landesamtes Sachsen-Anhalt zum Teil-Prüfbericht. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Bericht, Tagebuch-Nr.: 12804/02: S. 1-46; Hannover.

-
- Kaiser, D. & Spies, T. (2020): Standortauswahl 9S2019070000 Ausschlusskriterien - Anwendung des Ausschlusskriteriums Seismische Aktivität. – Zwischenbericht Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, B3.1/B50161-15/2020-0003/001: S. 23; Hannover.
- Masi, A., Chiauzzi, L., Nicodemo, G. & Manfredi, V. (2020): Correlations between macroseismic intensity estimations and ground motion measures of seismic events. – Bulletin of Earthquake Engineering, 18, 5: S. 1899-1932. DOI:10.1007/s10518-019-00782-2
- Salditch, L., Stein, S., Neely, J., Spencer, B.D., Brooks, E.M., Agnon, A. & Liu, M. (2020): Earthquake supercycles and Long-Term Fault Memory. – Tectonophysics, 774: S. 228289. DOI:10.1016/j.tecto.2019.228289
- Schwarz, J. (1997): Festlegung effektiver Beschleunigungen für probabilistische Gefährdungszonen im Zusammenhang mit der nationalen Anwendung des EC 8. – Bd. T 2808: 80 S.; Stuttgart (Fraunhofer IRB Verlag).
- Sponheuer, W. (1960): Methoden zur Herdtiefenbestimmung in der Makroseismik. – Freiburger Forschungshefte, C88: S. 1-120.
- Stein, S., Liu, M., Camelbeeck, T., Merino, M., Landgraf, A., Hintersberger, E. & Kübler, S. (2017): Challenges in assessing seismic hazard in intraplate Europe. – Geological Society, London, Special Publications, 432, 1: S. 13-28. DOI:10.1144/sp432.7
- Zanini, M.A., Hofer, L. & Faleschini, F. (2019): Reversible ground motion-to-intensity conversion equations based on the EMS-98 scale. – Engineering Structures, 180: S. 310-320. DOI:10.1016/j.engstruct.2018.11.032

Abkürzungsverzeichnis

a	Jahre
a_g	Spitzenbodenbeschleunigung (englisch: <i>peak ground acceleration</i>) (m/s ²)
a_{gR2011}	Referenz-Spitzenwert der Bodenbeschleunigung in DN_2011 (DIN EN 1998-1/NA:2011-01)
a_{gR2018}	Referenz-Spitzenbodenbeschleunigung in DN_2018 (E DIN EN 1998-1/NA:2018-10)
AkEnd	Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte
BGE	Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DN_2011	DIN EN 1998-1/NA:2011-01
DN_2018	E DIN EN 1998-1/NA:2018-10
E	Entwurf
EMS-98	Europäische Makroseismische Skala
EN	Europäische Norm
ESK	Entsorgungskommission
GFZ	Helmholtz-Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungsZentrum
GMPE	ground motion prediction equation
I	Makroseismische Intensität
I_0	Epizentralintensität
Ma	Million Jahre
<i>meanSRA</i>	Mittelwert der Amplituden des Antwortspektrums im Plateaubereich (m/s ²)
<i>M_w</i>	Momentmagnitude
NA	Nationaler Anhang

R	geologische Untergrundklasse „ <i>Fels, Felsgestein</i> “
$S_{ap,R}$	spektrale Antwortbeschleunigung im Plateaubereich (m/s^2)
$\overline{S_{ap,R}(I7)}$	Mittelwert der spektralen Antwortbeschleunigungen im Plateaubereich bei der Intensität $I = 7$ (m/s^2)
StandAG	Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz)
T	Periode (s)
T_{NCR}	Wiederkehrperiode (a)
β_0	Spektraler Überhöhungsfaktor
σ	Standardabweichung

Tabellenverzeichnis	Seite
Tab. 1: Umrechnungsbeziehungen von makroseismischer Intensität I in Spitzenbodenbeschleunigung a_g und hiermit berechnete Werte von a_g für $I = 7$. Durch Multiplikation mit dem spektralen Überhöhungsfaktor $\beta_0 = 2,5$ berechnen sich die mittleren Amplituden im Plateaubereich der spektralen Antwortbeschleunigung $S_{ap,R}$ für $I = 7$. Die Wertebereiche für die Standardabweichung σ ergeben sich aus den Standardabweichungen, die für die Umrechnungsbeziehungen angegeben wurden. Alle Beschleunigungswerte sind in ms^{-2} angegeben.	50
Tab. 2-1: Mittelwert der Amplituden im Plateaubereich der spektralen Antwortbeschleunigung $S_{ap,R}$ für die makroseismische Intensität $I = 7$, entnommen der interaktiven Darstellung „Erdbebengefährdung Deutschland 2016“ des GFZ für die Überschreitenswahrscheinlichkeit 10 % in 50 a für die jeweiligen geografischen Koordinaten entlang der Isolinien $I = 7$. Die Regionen sind kodiert: NR - Niederrheinische Bucht, SA - Schwäbische Alb, SO - südlicher Oberrheingraben, Z - Gebiet an der Zugspitze.	51
Tab. 2-2: Fortsetzung Tabelle 2-1. Mittelwert der Amplituden im Plateaubereich der spektralen Antwortbeschleunigung $S_{ap,R}$ für die makroseismische Intensität $I = 7$, entnommen der interaktiven Darstellung „Erdbebengefährdung Deutschland 2016“ des GFZ für die Überschreitenswahrscheinlichkeit 10 % in 50 a für die jeweiligen geografischen Koordinaten entlang der Isolinien $I = 7$. Die Regionen sind kodiert: NR - Niederrheinische Bucht, SA - Schwäbische Alb, SO - südlicher Oberrheingraben, Z - Gebiet an der Zugspitze.	52

Abbildungsverzeichnis	Seite
Abb. 1: Schematische Darstellung der Erdbebenzonen der Bundesrepublik Deutschland, Bild NA.1 in der Deutschen Norm DN_2011.	14
Abb. 2: Darstellung der räumlichen Verteilung der spektralen Antwortbeschleunigung für das Untergrundverhältnis A-R im Plateaubereich $S_{ap,R}$ für eine Wiederkehrperiode $T_{NCR} = 475$ a, Bild NA.1 in DN_2018. Anmerkung aus diesem Norm-Entwurf: „Für Beschleunigungen $S_{ap,R} < 0,6$ m/s ² muss die vorliegende Norm in der Regel für übliche Hochbauten aller Bedeutungskategorien nicht angewendet werden.“ Dieser Grenzwert ist durch die rote Linie markiert.	16
Abb. 3: Ausschnitt aus der interaktiven Darstellung der Verteilung der berechneten makroseismischen Intensitäten in Deutschland für die Überschreitenswahrscheinlichkeit 10 % in 50 a (Mittelwert der probabilistischen Berechnungen). Die Isolinien decken den Bereich von 3,5 bis 8 in Intervallen von 0,5 ab. Die schwarzen Linien begrenzen die Intensitätsklasse zwischen 7,0 und 7,5. Internetseite des GFZ: http://www-app5.gfz-potsdam.de/d-eqhaz16/	30
Abb 4: Screenshot: Interaktive Darstellung der seismischen Gefährdungsberechnungen für Deutschland des GFZ http://www-app5.gfz-potsdam.de/d-eqhaz16/ : Verteilung der makroseismischen Intensitäten für die Überschreitenswahrscheinlichkeit 10 % in 50 a (Mittelwert der probabilistischen Berechnungen).	46
Abb 5: Screenshot: Interaktive Darstellung der seismischen Gefährdungsberechnungen für Deutschland des GFZ http://www-app5.gfz-potsdam.de/d-eqhaz16/ : Darstellung der Werte der Gefährdungsberechnung einschließlich grafischer Darstellung des Antwortspektrums (rot: 84 % Quantile, grün: Mittelwert, blau: Median) für eine Lokation auf der Karte.	47
Abb 6: Beispiel für die Werte der Gefährdungsberechnung, heruntergeladen für die im Anhang 3 gewählte Lokation auf der im Anhang 2 dargestellten Karte in der interaktiven Darstellung der seismischen Gefährdungsberechnungen für Deutschland des GFZ http://www-app5.gfz-potsdam.de/d-eqhaz16/	48

Anhangverzeichnis	Seite
Anhang 1	43
Anhang 2	46
Anhang 3	47
Anhang 4	48
Anhang 5	49
Anhang 6	51

Anhang 1

Hinweise zur Relevanz des Ausschlusskriteriums Seismische Aktivität für die Erdbebengefährdung eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle.

In diesem Anhang werden die im Abschnitt 2.3 aufgeworfenen Fragen zum Bewertungszeitraum, zur Bewertungsgröße, zum Bewertungsmaßstab, zu den formalen Grundlagen und zum Umgang mit Ungewissheiten bei der Anwendung des Ausschlusskriteriums Seismische Aktivität ausführlicher diskutiert und begründet.

Bewertungszeitraum

Der Bewertungszeitraum für die Sicherheit des Endlagers beträgt 1 Ma. Dagegen beträgt der Betrachtungszeitraum der Bewertungsgrundlage dieses Ausschlusskriteriums, also für die seismischen Gefährdungsberechnungen, die den Karten in DN_2011 und DN_2018 zugrunde liegen, 50 a, entsprechend der Standzeit von normalen Hochbauten. Vom Bewertungszeitraum hängt die Wahl der Modelle, Annahmen und Daten ab. Für die Norm DN_2011 und DN_2018 sind sie im Kapitel 3 beschrieben. Beurteilt werden sollte, ob diese Modelle, Annahmen und Daten auch für einen 20 000 Mal längeren Bewertungszeitraum von 1 Ma geeignet ist. Für diesen Bewertungszeitraum ist vor allem die Beantwortung folgender Fragen von Bedeutung:

- Sind Seismizitätsdaten aus einem Beobachtungszeitraum von einigen Jahrzehnten bis Jahrhunderten ausreichend?
- Ist die Annahme stationärer Seismizität gültig? Anders ausgedrückt: ist die beobachtete Seismizität repräsentativ für einen Zeitraum von 1 Ma? Insbesondere für Intraplattenregionen (wie in Deutschland) ist diese Annahme wahrscheinlich falsch, da hier die Erdbeben in Raum und Zeit clustern (Salditch et al. 2020; Stein et al. 2017; Calais et al. 2016). Es ist also davon auszugehen, dass sich die Seismizität innerhalb von 10 000 a oder 100 000 a erheblich von der heutigen unterscheiden kann.

Bewertungsgröße

Die Bewertungsgröße des Ausschlusskriteriums ist die makroseismische Intensität. Die ingenieurseismologische Kenngröße der seismischen Einwirkung in DN_2018 ist der Mittelwert der Amplituden im Plateaubereich des Antwortspektrums. Beide Werte gelten für die Erdoberfläche. Die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle soll dagegen in tiefen geologischen Formationen erfolgen.

Hieraus ergibt sich die Frage, inwieweit die seismischen Einwirkungen an der Erdoberfläche zur Bewertung der Sicherheit eines Endlagers geeignet sind.

Bewertungsmaßstab

Der Bewertungsmaßstab des Ausschlusskriteriums ist die örtliche Gefährdung durch seismische Bodenbewegungen, das heißt durch dynamische Bodenbewegungen beim Durchlaufen einer seismischen Welle, die sich vom Erdbebenherd zum Standort ausbreitet.

Hiervon zu unterscheiden ist grundsätzlich eine andere Art der Gefährdung durch Erdbeben, nämlich bruchartige Verschiebungen an großen Störungen im Endlagerbereich. Dieser Art der Gefährdung kommt bei einem Endlager in tiefen geologischen Formationen eine wesentlich größere Bedeutung neben den seismischen Bodenbewegungen zu. Dies wurde bereits in Kaiser & Leydecker (2003) (dort im Abschnitt 2.4.2) nach der Bewertung internationaler Regelwerke und des internationalen Standes von Wissenschaft und Technik hervorgehoben.

Daraus ergibt sich die Frage zur Relevanz des Bewertungsmaßstabs *Gefährdung durch seismische Bodenbewegungen* für die Beantwortung der Fragestellung, ob ein Gebiet als Endlagerstandort ungeeignet ist.

Formale Bewertung

Das Ausschlusskriterium Seismische Aktivität unterscheidet sich von den übrigen fünf Ausschlusskriterien in StandAG § 22: Dieses Kriterium bezieht sich als einziges nicht auf ein wissenschaftlich formuliertes Merkmal, sondern auf eine Norm. Die BGR hält deshalb diese Festlegung sowohl aus formalen, als auch aus fachlichen Gründen für problematisch.

Die Verwendung von Erdbebenzonen aus der Erdbebenbaunorm als Bewertungsgrundlage ist problematisch, da die Festlegung der Erdbebenzonen bzw. die Festlegung der Bemessungsgrößen einen Kompromiss zwischen unterschiedlichen Interessen unter Beachtung von wirtschaftlichen Überlegungen darstellt. Die Obleute des DIN Normenausschuss Bauwesen (NABau)/NA 005–51–06 AA Arbeitsausschuss „Erdbeben; Sonderfragen“, der DN_2018 erarbeitet hat, bezeichnen dies als *„Entscheidungszwänge im Spannungsfeld zwischen notwendigem Sicherheitsanspruch und vermeintlichen ökonomischen Restriktionen“* (Fehling & Schwarz 2019). Dies führt dazu, dass wirtschaftlichen Interessen innerhalb des Normenausschusses letztlich die Bewertungsgröße des Ausschlusskriteriums Seismische Aktivität quantitativ beeinflussen. Die BGR folgert, dass aus diesen Gründen die Verwendung der Erdbebenbaunorm DIN EN 1998-1/NA (unabhängig vom jeweils gültigen Stand) als Bewertungsgrundlage für das Ausschlusskriterium nur sehr bedingt geeignet ist.

- Anhang 1 -

Ungewissheiten

Mehrere Arten von Ungewissheiten spielen bei der Bewertung des Ausschlusskriteriums eine Rolle. Angefangen von der Ungewissheit in der vorgeschlagenen Vorgehensweise über die Ungewissheiten bei den seismischen Gefährdungsberechnungen bis hin zu den in diesem Kapitel diskutierten Ungewissheiten beim Bewertungszeitraum, Bewertungsgröße und Bewertungsmaßstab. In diesem Zusammenhang sind auch die folgenden Aussagen zu verstehen (vergleiche Abschnitt 2.2):

- Drucksache 18/11398 des Deutschen Bundestages: *„Das Kriterium dient ausschließlich einer groben Abschätzung...“*
- AkEnd (2002): *„Bei der exakten Abgrenzung der ungünstigen Gebiete sollten Randgebiete einer Einzelprüfung unterzogen werden.“*

Daraus ergibt sich die Frage, wie mit diesen Ungewissheiten bei der Anwendung des Ausschlusskriteriums umgegangen werden sollte. Auch diese Frage sollte auf einer wissenschaftlichen Grundlage beantwortet werden.

- Anhang 2 -

Anhang 2

Interaktive Darstellung der seismischen Gefährdungsberechnungen für Deutschland des GFZ: Verteilung der makroseismischen Intensitäten für die Überschreitungswahrscheinlichkeit 10 % in 50 a (Mittelwert der probabilistischen Berechnungen). Anmerkung: Die Legende der interaktiven Darstellung ist teilweise falsch programmiert; Anstatt „Spektralklasse“ müsste es korrekt „Intensitätsklasse“ heißen und es dürfte bei dem Intensitätsintervall keine Einheit angegeben werden.

Dieser Anhang erläutert den ersten Punkt der im Abschnitt 4.3 vorgestellten Vorgehensweise zur Anwendung des Ausschlusskriteriums Seismische Aktivität.

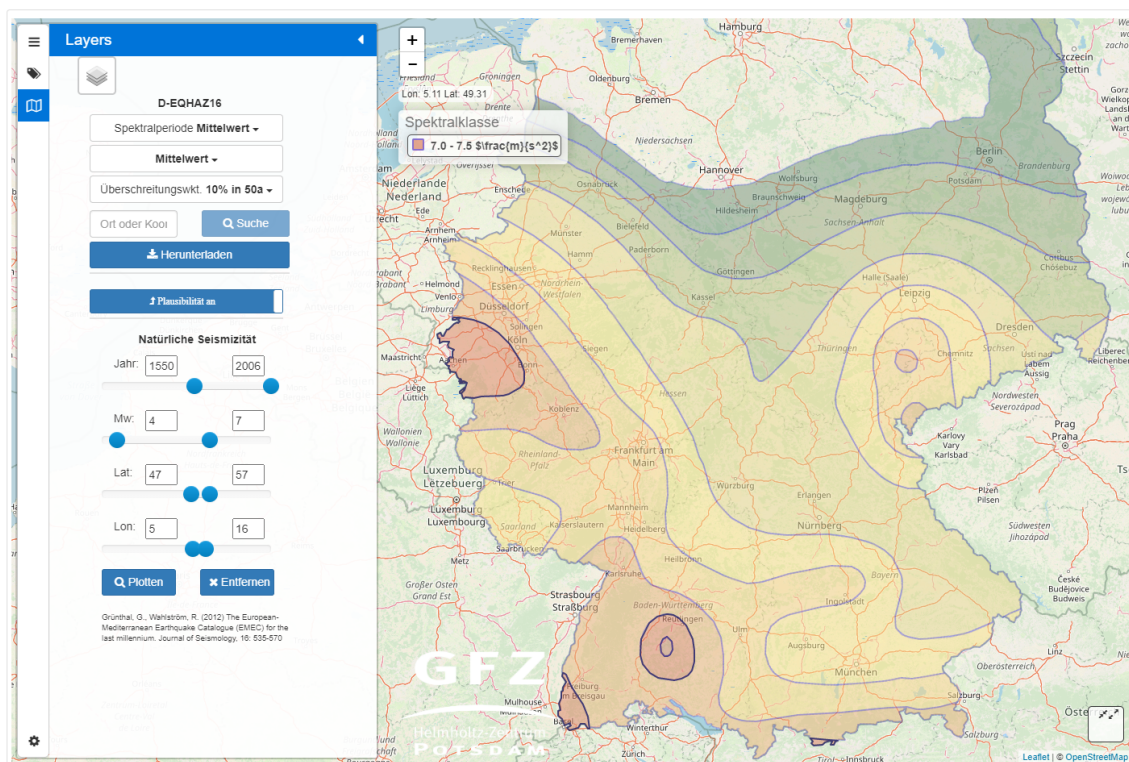


Abb 4: Screenshot: Interaktive Darstellung der seismischen Gefährdungsberechnungen für Deutschland des GFZ <http://www-app5.gfz-potsdam.de/d-eq haz16/>: Verteilung der makroseismischen Intensitäten für die Überschreitungswahrscheinlichkeit 10 % in 50 a (Mittelwert der probabilistischen Berechnungen).

- Anhang 3 -

Anhang 3

Interaktive Darstellung der seismischen Gefährdungsberechnungen für Deutschland des GFZ: Darstellung der Werte der Gefährdungsberechnung einschließlich grafischer Darstellung des Antwortspektrums für eine Lokation auf der Karte. Dieses Fenster erscheint beim doppelten Klick auf eine Lokation auf der im Anhang 2 dargestellten Karte.

Dieser Anhang erläutert neben Anhang 2 den ersten Punkt der im Abschnitt 4.3 vorgestellten Vorgehensweise zur Anwendung des Ausschlusskriteriums Seismische Aktivität.

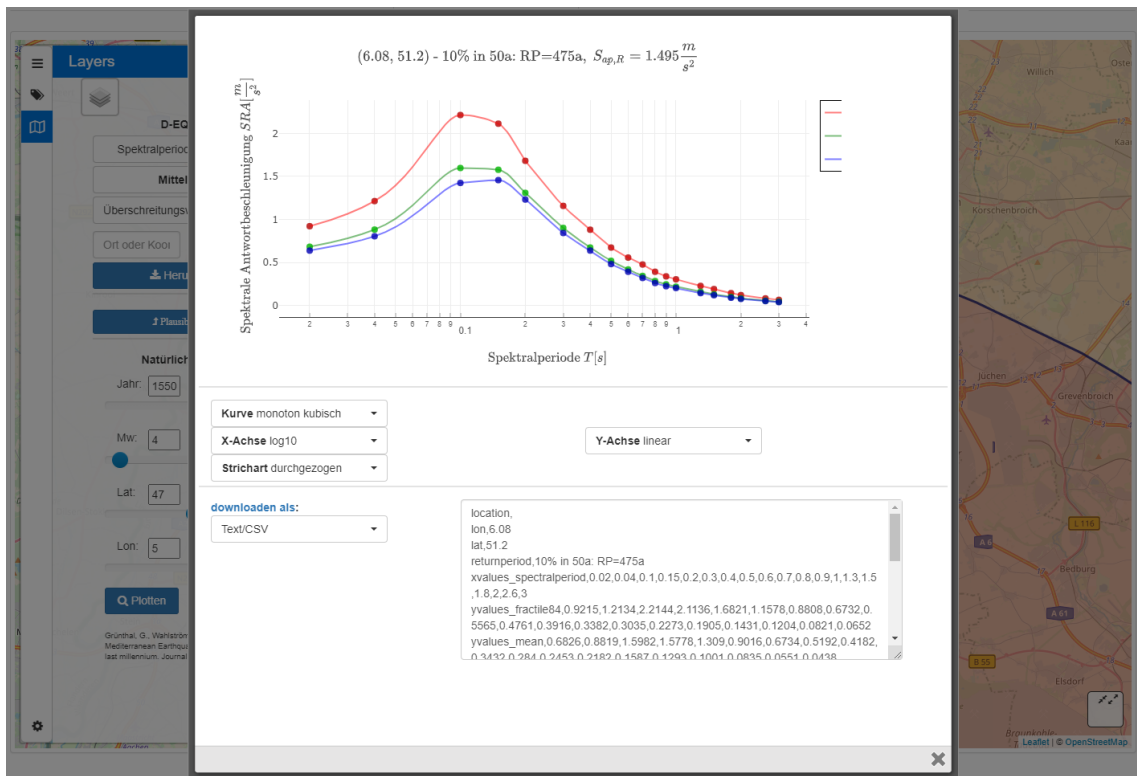


Abb 5: Screenshot: Interaktive Darstellung der seismischen Gefährdungsberechnungen für Deutschland des GFZ <http://www-app5.gfz-potsdam.de/d-eqhaz16/>: Darstellung der Werte der Gefährdungsberechnung einschließlich grafischer Darstellung des Antwortspektrums (rot: 84 % Quantile, grün: Mittelwert, blau: Median) für eine Lokation auf der Karte.

Anhang 4

Beispiel für die Werte der Gefährdungsberechnung in der interaktiven Darstellung der seismischen Gefährdungsberechnungen für Deutschland des GFZ.

Dieser Anhang erläutert neben Anhang 2 und 3 den ersten Punkt der im Abschnitt 4.3 vorgestellten Vorgehensweise zur Anwendung des Ausschlusskriteriums Seismische Aktivität.

```
location,  
lon,6.08  
lat,51.2  
returnperiod,10% in 50a: RP=475a  
xvalues_spectralperiod,0.02,0.04,0.1,0.15,0.2,0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9,1,1.3,1.5,1.8,2,2.6,3  
yvalues_fractile84,0.9215,1.2134,2.2144,2.1136,1.6821,1.1578,0.8808,0.6732,0.5565,0.4761,0.3916,0.3382,0.3035,0.2273,0.1905,0.1431,0.1204,0.0821,0.0652  
yvalues_mean,0.6826,0.8819,1.5982,1.5778,1.309,0.9016,0.6734,0.5192,0.4182,0.3432,0.284,0.2453,0.2182,0.1587,0.1293,0.1001,0.0835,0.0551,0.0438  
yvalues_median,0.6379,0.8045,1.4245,1.4574,1.2316,0.8423,0.6383,0.4812,0.3917,0.3195,0.2606,0.2239,0.2025,0.1434,0.1191,0.0895,0.0761,0.0507,0.0384  
max_fractile84,2.2144  
max_mean,1.5982  
max_median,1.457  
mean_fractile84,2.0034  
mean_mean,1.495  
mean_median,1.3711  
pga_fractile84,0.8513  
pga_mean,0.6485  
pga_median,0.5953  
unit_xvalues,s  
unit_yvalues,m/s/s
```

Abb 6: Beispiel für die Werte der Gefährdungsberechnung, heruntergeladen für die im Anhang 3 gewählte Lokation auf der im Anhang 2 dargestellten Karte in der interaktiven Darstellung der seismischen Gefährdungsberechnungen für Deutschland des GFZ <http://www-app5.gfz-potsdam.de/d-eq haz16>.

Anhang 5

Darstellung einer Vorgehensweise zur Umrechnung von Intensität in Spitzenbodenbeschleunigung mittels publizierter Umrechnungsbeziehungen entsprechend Abschnitt 4.2.4.

Die Auswahl geeigneter Umrechnungsbeziehungen zwischen Intensität I und a_g ist mit Ungewissheiten verbunden, da erhebliche regionale Unterschiede beobachtet wurden (Caprio et al. 2015). Weiterhin können die verwendete Intensitätsskala, das zugrundeliegende Regressionsmodell und die lokalen Untergrundverhältnisse das Ergebnis beeinflussen. Da die Anzahl von Beobachtungsdaten in den letzten Jahren stark zugenommen hat, sollten nur jüngere Beziehungen berücksichtigt werden. Beziehungen mit Intensitätswerte nach der EMS-98 werden bevorzugt, sind jedoch selten. Tabelle 1 enthält als Beispiele drei dieser Beziehungen.

Die Bodenbewegung ist eine vektorielle Größe und deshalb existieren unterschiedliche Definitionen für die horizontale Spitzenbodenbeschleunigung (Beyer & Bommer 2006). Die in Grünthal et al. (2018d) verwendeten seismischen Bodenbewegungsmodelle bezogen sich auf den geometrischen Mittelwert der beiden Horizontalkomponenten oder einer gleichwertigen Definition (siehe dort Tabelle 5). Bei den publizierten Umrechnungsbeziehungen zwischen der makroseismischen Intensität I und a_g wurde jedoch häufiger eine abweichende Definition verwendet: Von den beiden Horizontalkomponenten wurde diejenige mit der größeren Spitzenbodenbeschleunigung gewählt. Dies ist in Tabelle 1 mit „max.“ bezeichnet. Die auf diese Weise bestimmten Werte sind im Mittel um den Faktor 1,1 höher, als der geometrische Mittelwert der beiden Horizontalkomponenten (Beyer & Bommer 2006), was bei der Berechnung der mittleren Amplituden im Plateaubereich der spektralen Antwortbeschleunigung $S_{ap,R}$ für $I = 7$ in Tabelle 1 korrigiert wird.

Die Umrechnung von a_g in $S_{ap,R}$ erfolgt mit dem spektralen Überhöhungsfaktor $\beta_0 = 2,5$ aus DN_2018. Dieser Wert wurde in Grünthal et al. (2018c) als „Verhältnis vom Plateau der Antwortbeschleunigung zu PGA“ bezeichneten. Auch dieser Wert ist mit Ungewissheiten verbunden. In Grünthal & Bosse (2020) wurde für den dort als „Verhältnis von $S_{ap,R}$ zu PGA“ bezeichneten Größe ein Wertebereich zwischen 1,82 und 2,47 angegeben.

Die Angaben zu den verwendeten Umrechnungsbeziehungen und die berechnete Spitzenbodenbeschleunigung a_g bei der Intensität $I = 7$ sind in Tabelle 1 angegeben. Die auf diesem Weg berechneten Werte von $S_{ap,R}$ für $I = 7$ sind rund doppelt so hoch wie die nach dem im Abschnitt 4.3 dargestellten Verfahren. Angesichts der großen Gesamtungewissheit dieser Vorgehensweise sind diese Unterschiede nicht erheblich.

- Anhang 5 -

Tab. 1: Umrechnungsbeziehungen von makroseismischer Intensität I in Spitzenbodenbeschleunigung a_g und hiermit berechnete Werte von a_g für $I = 7$. Durch Multiplikation mit dem spektralen Überhöhungsfaktor $\beta_0 = 2,5$ berechnen sich die mittleren Amplituden im Plateaubereich der spektralen Antwortbeschleunigung $S_{ap,R}$ für $I = 7$. Die Wertebereiche für die Standardabweichung σ ergeben sich aus den Standardabweichungen, die für die Umrechnungsbeziehungen angegeben wurden. Alle Beschleunigungswerte sind in ms^{-2} angegeben.

Referenz	Region	makro-seismische Intensitätsskala	Definition Komponente a_g	Regressionsmodell	a_g ($I=7$)	$S_{ap,R}$ ($I=7$)
(Masi et al. 2020)	Italien	EMS-98	<i>max.</i>	bilinear total least square	1,90	4,33
(Zanini et al. 2019)	Italien	EMS-98	<i>max.</i>	linear orthogonal	1,51	3,44
(Caprio et al. 2015)	global	unterschiedliche	nicht angegeben	bilinear orthogonal	1,54	3,85

Anhang 6

Mittelwert der Amplituden im Plateaubereich der spektralen Antwortbeschleunigung $S_{ap,R}$ [mean_mean] für die makroseismische Intensität $I = 7$, entnommen der interaktiven Darstellung „Erdbebengefährdung Deutschland 2016“ des GFZ für die Überschreitenswahrscheinlichkeit 10 % in 50 a entlang der Isolinien $I = 7$. Die Werte für $S_{ap,R}$ sind aus der interaktiven Darstellung in der dort angegebenen Genauigkeit übernommen.

Tab. 2-1: Mittelwert der Amplituden im Plateaubereich der spektralen Antwortbeschleunigung $S_{ap,R}$ für die makroseismische Intensität $I = 7$, entnommen der interaktiven Darstellung „Erdbebengefährdung Deutschland 2016“ des GFZ für die Überschreitenswahrscheinlichkeit 10 % in 50 a für die jeweiligen geografischen Koordinaten entlang der Isolinien $I = 7$. Die Regionen sind kodiert: NR - Niederrheinische Bucht, SA - Schwäbische Alb, SO - südlicher Oberrheingraben, Z - Gebiet an der Zugspitze.

Länge [lon] (°)	Breite [lat] (°)	Region	$S_{ap,R}$ (m/s ²)
6,08	51,20	NR	1,4950
6,31	51,18	NR	1,5417
6,32	50,50	NR	1,5659
6,38	50,50	NR	1,5442
6,52	50,51	NR	1,5748
6,52	51,13	NR	1,5785
6,66	50,51	NR	1,6004
6,72	51,05	NR	1,6001
6,80	50,53	NR	1,6733
6,87	50,95	NR	1,6164
6,94	50,56	NR	1,6890
6,99	50,83	NR	1,6747
7,06	50,68	NR	1,7279
7,58	48,06	SO	1,9177
7,66	47,99	SO	1,8733
7,73	47,90	SO	1,8213
7,80	47,82	SO	1,8075
7,87	47,73	SO	1,8278
7,92	47,65	SO	1,8110
7,94	47,55	SO	1,8391
8,64	48,23	SA	1,7774
8,64	48,32	SA	1,7830
8,67	48,14	SA	1,7515
8,68	48,42	SA	1,8011
8,74	48,49	SA	1,8132

- Anhang 6 -

Tab. 2-2: Fortsetzung Tabelle 2-1. Mittelwert der Amplituden im Plateaubereich der spektralen Antwortbeschleunigung $S_{ap,R}$ für die makroseismische Intensität $I = 7$, entnommen der interaktiven Darstellung „Erdbebengefährdung Deutschland 2016“ des GFZ für die Überschreitenswahrscheinlichkeit 10 % in 50 a für die jeweiligen geografischen Koordinaten entlang der Isolinien $I = 7$. Die Regionen sind kodiert: NR - Niederrheinische Bucht, SA - Schwäbische Alb, SO - südlicher Oberrheingraben, Z - Gebiet an der Zugspitze.

Länge [lon] (°)	Breite [lat] (°)	Region	$S_{ap,R}$ (m/s ²)
8,75	48,06	SA	1,7329
8,85	48,56	SA	1,8300
8,88	48,01	SA	1,7408
8,90	48,58	SA	1,8078
9,02	47,99	SA	1,7518
9,04	48,59	SA	1,8370
9,16	48,00	SA	1,7877
9,17	48,55	SA	1,8555
9,26	48,48	SA	1,8686
9,29	48,04	SA	1,7904
9,32	48,40	SA	1,8644
9,36	48,12	SA	1,7986
9,36	48,31	SA	1,8167
9,37	48,21	SA	1,7978
10,95	47,46	Z	2,2299
11,09	47,45	Z	2,2363
11,23	47,44	Z	2,2289
11,30	47,44	Z	2,2124