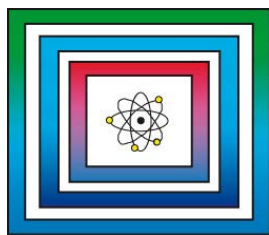


Standortauswahl

9S2019070000

Anwendung des
Ausschlusskriteriums
Seismische Aktivität



Zwischenbericht

Hannover, April 2020

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND
ROHSTOFFE HANNOVER

Standortauswahl

Ausschlusskriterien

Anwendung des Ausschlusskriteriums Seismische Aktivität

Zwischenbericht

Autoren:	Kaiser, Diethelm, Dr. Spies, Thomas, Dr.
Auftraggeber:	Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE)
Auftragsnummer:	9S2019070000
Datum:	29.04.2020
Geschäftszeichen:	B3.1/B50161-15/2020-0003/001
Gesamtblattzahl:	23

Im Auftrag:

gez. G. Enste

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

Inhaltsverzeichnis	Seite
Verkürzte Zusammenfassung	3
Abstract	4
1 Einleitung	5
2 Grundlagen	6
2.1 Begriffsbestimmungen	6
2.2 Begründung und Grundlage des Ausschlusskriteriums Seismische Aktivität ...	8
2.3 Darstellung der seismischen Gefährdung in der Norm DIN EN 1998-1/ NA und im Entwurf E DIN EN 1998-1/NA:2018-10	9
2.3.1 DIN EN 1998-1/NA:2011-01	9
2.3.2 E DIN EN 1998-1/NA:2018-10	11
3 Unterschiede zwischen der Norm DIN EN 1998-1/NA:2011-01 und dem Entwurf DIN EN 1998-1/NA:2018-10	13
3.1 Unterschiede im Datenbestand	13
3.1.1 Erdbebenkatalog	13
3.1.2 Seismische Quellen	13
3.1.3 Geologische Untergrundverhältnisse	14
3.2 Unterschiede in den Berechnungsmethoden und in den ingenieur- seismologischen Kenngrößen	14
3.2.1 Parameter der Bodenbewegung bei der seismischen Gefährdungs- berechnung	15
3.2.2 Seismische Bodenbewegungsmodelle	15
3.2.3 Ingenieurseismologische Kenngröße der seismischen Einwirkung für die Ermittlung bzw. Skalierung der Antwortspektren	16
3.2.4 Berücksichtigung von Ungewissheiten	16
4 Zusammenfassung	18
Literaturverzeichnis	20
Abkürzungsverzeichnis	22
Abbildungsverzeichnis	23

Verkürzte Zusammenfassung

Autoren:	Kaiser, Diethelm, Dr. Spies, Thomas, Dr.
Titel:	Anwendung des Ausschlusskriteriums Seismische Aktivität
Schlagwörter:	Antwortspektrum, Erdbeben, Erdbebenzonen, makroseismische Intensität, probabilistische seismische Gefährdung, StandAG

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 ist. Der mittlerweile vorliegende Entwurf E DIN EN 1998-1/NA:2018-10 von 2018 enthält keine Zuordnungen in Erdbebenzonen mehr.

Im Auftrag der Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH wird ein Vorschlag zur Anwendung dieses Ausschlusskriteriums unter Verwendung des DIN-Entwurfs erarbeitet. Die Karte der Erdbebenzonen in DIN EN 1998-1/NA:2011-01 und die Karte der seismischen Gefährdung im Entwurf beruhen auf probabilistischen seismischen Gefährdungsanalysen. Jedoch bestehen bei den zugrundeliegenden Analysen erhebliche Unterschiede im Datenbestand, in den Berechnungsmethoden und in den ingenieurseismologischen Kenngrößen.

Der vorliegende Bericht stellt einen Zwischenstand dar.

Abstract

Authors:	Kaiser, Diethelm, Dr. Spies, Thomas, Dr.
Title:	Application of the exclusion criterion Seismic Activity
Subject terms:	response spectrum, earthquake, earthquake zones, macroseismic intensity, probabilistic seismic hazard, StandAG

In the German Repository Site Selection Act (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. On behalf of the Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH a proposal for the application of this exclusion criterion is being developed in accordance with the recently proposed draft E DIN EN 1998-1/NA:2018-10 from 2018 which no longer includes assignments to earthquake zones. Both the map of earthquake zones and the seismic hazard map in the draft are based on probabilistic seismic hazard analyses. However, in the underlying analyses there exist considerable differences in the data set, in the calculation methods and in the engineering seismological parameters.

The present report provides an interim status.

1 Einleitung

Das Standortauswahlgesetz (StandAG) regelt die Verfahrensschritte für die Suche und die Auswahl eines Standortes für eine Anlage zur Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver 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 (Fassung von 2011).

Im Oktober 2018 wurde für die Norm ein Entwurf E DIN EN 1998-1/NA:2018-10 (vorgesehen als Ersatz für DIN EN 1998-1/NA:2011-01) vorgelegt. Diese Fassung wird hier 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.

Der vorliegende Bericht stellt mit der Darlegung der ersten beiden Spiegelpunkte einen Zwischenstand der Bearbeitung dieser Fragestellungen dar. 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.

Mit Veröffentlichung des Endberichtes wird darüber hinaus ein Vorschlag zur Anwendung des Ausschlusskriteriums Seismische Aktivität nach StandAG erfolgen. Dieser wird eine Einschätzung sowie Begründung und Bewertung enthalten, ob und wie die 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 vornehmen zu können.

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 DIN EN 1998-1/NA:2011-01 und E DIN EN 1998-1/NA:2018-10 und in den diesen Normen zugrundeliegenden Veröffentlichungen verstanden werden.

Antwortspektrum. Das Antwortspektrum ist die Darstellung des Betrags der maximalen, horizontalen Amplituden der Beschleunigung der Schwingungen von gedämpften, elastischen Einmassenschwingern unterschiedlicher Eigenfrequenz und konstantem Dämpfungsgrad (5 % Dämpfung) als Antwort auf eine Anregung beschrieben durch einen Zeitverlauf am Fußpunkt. In E DIN EN 1998-1/NA:2018-10 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 I_0 . Die Epizentralintensität ist die makroseismische Intensität 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 I . Die makroseismische Intensität 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 M_w . Die Momentmagnitude 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 daher in der Seismologie gegenüber anderen Magnitudenskalen bevorzugt.

Referenz-Spitzenwert der Bodenbeschleunigung a_{gR} . Über den Referenz-Spitzenwert der Bodenbeschleunigung wird in DIN EN 1998-1/NA:2011-01 das Antwortspektrum skaliert. Der Wert bestimmt sich dort 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.

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.

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 DIN EN 1998-1/NA:2011-01.
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 *Darstellung der seismischen Gefährdung in der Norm DIN EN 1998-1/NA und im Entwurf E DIN EN 1998-1/NA:2018-10*

2.3.1 DIN EN 1998-1/NA:2011-01

Die Bewertungsgrundlage für die Anwendung des Ausschlusskriteriums Seismische Aktivität bildet die Karte „*Schematische Darstellung der Erdbebenzonen der Bundesrepublik Deutschland*“, Bild NA.1 in der Deutschen Norm DIN EN 1998-1/NA:2011-01 (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 DIN EN 1998-1/NA:2011-01

Das Ausschlusskriterium Seismische Aktivität nach StandAG § 22 ist erfüllt, wenn die örtliche seismische Gefährdung größer ist als in Erdbebenzone 1 nach DIN EN 1998-1/NA:2011-01. Dies trifft für die in Abb. 1 ausgewiesenen Erdbebenzonen 2 und 3 zu.

Den Erdbebenzonen wird als ingenieurseismologische Kenngröße in Tabelle NA.3 „Zuordnung von Intensitätsintervallen und Referenz-Spitzenwerten der Bodenbeschleunigung zu den Erdbebenzonen“ in DIN EN 1998-1/NA 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 erfüllt für die Intensität $I \geq 7$.

Die Karte „Schematische Darstellung der Erdbebenzonen der Bundesrepublik Deutschland“ in der Norm DIN EN 1998-1/NA:2011-01 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 der DIN EN 1998-1/NA:2011-01 basiert auf der in Grünthal & Bosse (1996) als Ergebnis dargestellten Abb. 7. „Erdbebenzonierungskarte für das Nationale Anwendungsdokument zum EUROCODE 8“.

2.3.2 E DIN EN 1998-1/NA:2018-10

Der Entwurf E DIN EN 1998-1/NA:2018-10 (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 von Fehling & Schwarz (2017) und Fehling & Schwarz (2019) zusammengefasst. In diesem Entwurf 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 Sap,R für eine Wiederkehrperiode $TNCR = 475$ 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. $TNCR$ ist die mittlere Wiederkehrperiode, die der gewählten Wahrscheinlichkeit des Überschreitens der ingenieurseismologischen Kenngröße von 10 % in 50 Jahren 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. Eine Zusammenfassung in deutscher Sprache findet sich in Grünthal et al. (2018c). Aus dieser Publikation wurden die deutschsprachigen Fachbegriffe in den vorliegenden Bericht übernommen.

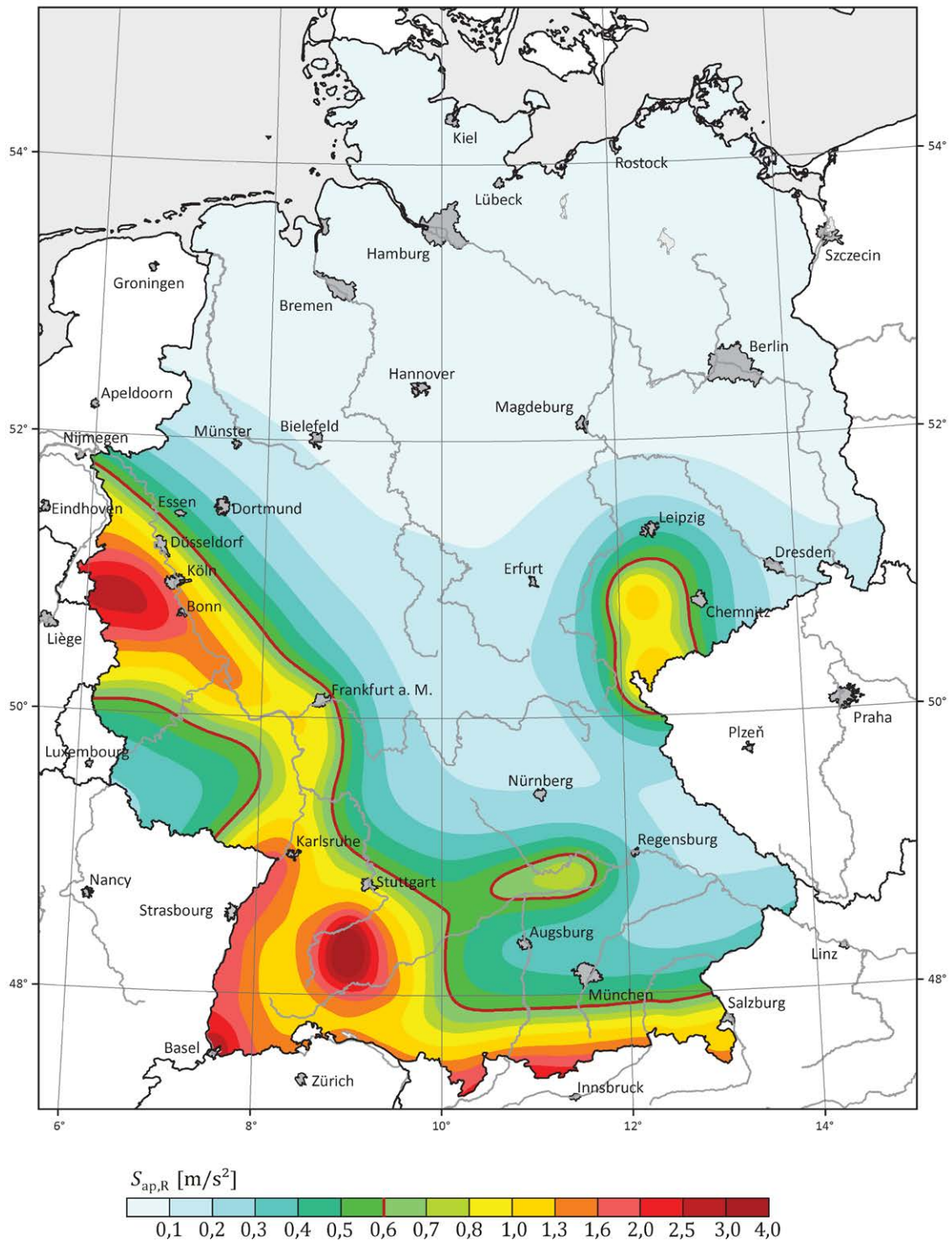


Abb. 2: Darstellung der räumlichen Verteilung der spektralen Antwortbeschleunigung für das Untergrundverhältnis A-R im Plateaubereich $S_{ap,R}$ für eine Wiederkehrperiode $T_{NCR} = 475$ Jahre, Bild NA.1 in der Deutschen Norm E DIN EN 1998-1/NA:2018-10. Anmerkung aus diesem Norm-Entwurf: „Für Beschleunigungen $S_{ap,R} < 0,6$ m/s² muss die vorliegende Norm in der Regel für übliche Hochbauten aller Bedeutungskategorien nicht angewendet werden.“

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

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 Gefährdungsberechnungen 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, der der Gefährdungskarte für die DIN EN 1998-1/NA:2011-01 zugrunde lag, enthielt Erdbeben von 1000 bis ca. 1995 (Grünthal & Bosse 1996).

Der Erdbebenkatalog, der der Gefährdungskarte für E DIN EN 1998-1/NA:2018-10 zugrunde lag, wurde grundlegend verbessert und aktualisiert; er enthält 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 die DIN EN 1998-1/NA:2011-01 wurde hierfür die Epizentralintensität I_0 verwendet, für den Entwurf DIN EN 1998-1/NA:2018-10 dagegen die Momentmagnitude M_w . Dies entsprach einer Erhöhung der Qualität, da M_w ein physikalisch basiertes Stärkemaß darstellt und seit einigen 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, also die räumliche und zeitliche Verteilung der Seismizität sowie die Magnitudenhäufigkeiten in einer seismischen Quelle 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. 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 Figur 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.

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 E DIN EN 1998-1/NA:2018-10 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. Die DIN 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 der DIN EN 1998-1/NA:2011-01 als auch der Karte der ingenieur-seismologischen Kenngrößen in der E DIN EN 1998-1/NA:2018-10 lagen probabilistische seismische Gefährdungsberechnungen zugrunde. Beide Karten wurden für eine Überschreitenswahrscheinlichkeit von 10 % in 50 a der jeweiligen ingenieur-seismologischen

Kenngrößen berechnet, was einer mittleren Wiederholungsperiode von 475 a entspricht (in DIN EN 1998-1/NA 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 DIN EN 1998-1/NA:2011-01 war die makroseismische Intensität I .

Die Parameter der Bodenbewegung bei der seismischen Gefährdungsberechnung für E DIN EN 1998-1/NA:2018-10 waren die spektralen Amplituden des horizontalen Antwortspektrums für 5 % Dämpfung. 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 E DIN EN 1998-1/NA:2018-10 als „spektrale Antwortbeschleunigung im Plateaubereich“ bezeichnet (abgekürzt: $S_{ap,R}$), in Grünthal et al. (2018c) als „Mittelwert der Amplituden des Antwortspektrums“ bezeichnet (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 der seismischen Bodenbewegung an einem Standort in Abhängigkeit von der Stärke des Erdbebens (in der Regel heutzutage Magnitude M_w), der Entfernung vom Erdbeben 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 lokalen Untergrundeigenschaften berücksichtigt werden.

In der Gefährdungsberechnung für DIN EN 1998-1/NA:2011-01 wurde nur ein 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 E DIN EN 1998-1/NA:2018-10 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. Einer dieser Einflussgrößen ist ein Faktor für die Unsicherheiten 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 DIN EN 1998-1/NA:2011-01 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 E DIN EN 1998-1/NA:2018-10 wurde als Kenngröße der seismischen Einwirkung der Mittelwert der Amplituden im Plateaubereich des Antwortspektrums $S_{ap,R}$ verwendet (siehe Abschnitt 3.2.1). Im Unterschied zur DIN EN 1998-1/NA:2011-01 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. In probabilistischen seismischen Gefährdungsberechnungen 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 aleatorischen Variabilitäten bezeichnen die inhärente Zufälligkeit von Prozessen. Sie 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 DIN EN 1998-1/NA:2011-01 wurden Ungewissheiten nicht berücksichtigt (Grünthal & Bosse 1996).

In der Gefährdungsberechnung für E DIN EN 1998-1/NA:2018-10 wurden Ungewissheiten explizit nach Stand von Wissenschaft und Technik berücksichtigt. Mittels logischem Baum wurden folgende epistemische Ungewissheiten berücksichtigt: (1) seismische Quellen, (2) Magnituden-Häufigkeitsverteilungen und (3) Bodenbewegungsmodelle, teilweise unter Berücksichtigung der Ungewissheiten im Spannungsabfall der Erdbeben. Der logische Baum umfasste insgesamt 4040 Endzweige.

Die aleatorischen Variabilitäten, die in der Gefährdungsberechnung für E DIN EN 1998-1/NA:2018-10 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 E DIN EN 1998-1/NA:2018-10 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 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 von 2011 ist. Der Entwurf E DIN EN 1998-1/NA:2018-10 von 2018 enthält keine Darstellungen und Zuordnungen in Erdbebenzonen mehr.

In diesem Kontext hat die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) im Rahmen eines Arbeitspaketes (9S2019070000) 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. Darüber hinaus soll eine verbindliche Einschätzung gegeben werden, 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.

Im vorliegenden Bericht wird ein Zwischenstand der Bearbeitung dieser Fragestellungen dargelegt. Die Ergebnisse hinsichtlich Datengrundlage und zugrundeliegenden Berechnungsmethoden werden wie folgt zusammengefasst:

- Sowohl die Karte der Erdbebenzonen in DIN EN 1998-1/NA:2011-01 als auch die entsprechende Gefährdungskarte in E DIN EN 1998-1/NA:2018-10 sind das Ergebnis von probabilistischen seismischen Gefährdungsberechnungen für eine Überschreitenswahrscheinlichkeit 10 % in 50 a. Bei den Gefährdungsberechnungen für DIN EN 1998-1/NA:2011-01 und E DIN EN 1998-1/NA:2018-10 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 der Erdbeben. Die seismotektonischen Regionen bzw. seismische Quellen wurden verändert und berücksichtigen nun mehrere Varianten. Die geologischen Untergrundverhältnisse wurden in den Berechnungen für DIN EN 1998-1/NA:2011-01 nicht berücksichtigt; im neuen Entwurf gelten sie für Felsuntergrund.

- Die Parameter der Bodenbewegung bei der seismischen Gefährdungsberechnung sind nun die spektralen Amplituden des horizontalen Antwortspektrums anstelle der makroseismischen Intensität. Entsprechend wurden nun unterschiedliche Bodenbewegungsmodelle für die spektralen Amplituden des Antwortspektrums als Funktion der Entfernung, der Momentmagnitude und weiterer Einflussgrößen verwendet, anstelle eines Modells für die Intensitätsabnahme. Als ingenieurseismologische Kenngröße der seismischen Einwirkung wird nun der Mittelwert der Amplituden im Plateaubereich des Antwortspektrums verwendet, der sich direkt aus den Gefährdungsberechnungen ergibt. Dagegen wurde in DIN EN 1998-1/NA:2011-01 der Referenz-Spitzenwert der Bodenbeschleunigung als Kenngröße verwendet, der den Intensitätsintervallen zugeordnet wurde. In der Gefährdungsberechnung für E DIN EN 1998-1/NA:2018-10 wurden epistemische Ungewissheiten und aleatorischen Variabilitäten umfassend berücksichtigt. Dagegen wurden für DIN EN 1998-1/NA:2011-01 keine Ungewissheiten berücksichtigt.

Literaturverzeichnis

- AkEnd (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte, Empfehlungen des AkEnd - Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte.
- 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
- 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. 34 S.
- Fehling, E. & Schwarz, J. (2017): EUROCODE 8: Aktuelle Entwicklungen. (In: Zabel, V. & Beinersdorf, S. (Hrsg.)). D-A-CH-Tagung: Erdbeben-Ingenieurwesen und Baudynamik 2017, Weimar. Bd. DGEB-Publikation Nr. 17: S. 44; (Deutsche Gesellschaft für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik (DGEB)).
- 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., 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: S. 88; 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
- 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.

Abkürzungsverzeichnis

a	Jahre
a_{gR}	Referenz-Spitzenwert der Bodenbeschleunigung
AkEnd	Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte
BGE	Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
DIN	Deutsches Institut für Normung
EMS-98	Europäische Makroseismische Skala
EN	Europäische Norm
ESK	Entsorgungskommission
GMPE	ground motion prediction equation
I	Makroseismische Intensität
I_0	Epizentralintensität
$meanSRA$	Mittelwert der Amplituden des Antwortspektrums im Plateaubereich (m/s ²)
M_w	Momentmagnitude
NA	Nationaler Anhang
R	geologische Untergrundklasse „Fels, Felsgestein“
$S_{ap,R}$	spektrale Antwortbeschleunigung im Plateaubereich (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)

Abbildungsverzeichnis	Seite
Abb.1: Schematische Darstellung der Erdbebenzonen der Bundesrepublik Deutschland, Bild NA.1 in der Deutschen Norm DIN EN 1998-1/NA:2011-01	10
Abb. 2: Darstellung der räumlichen Verteilung der spektralen Antwortbeschleunigung für das Untergrundverhältnis A-R im Plateaubereich $S_{ap,R}$ für eine Wiederkehrperiode $T_{NCR} = 475$ Jahre, Bild NA.1 in der Deutschen Norm E DIN EN 1998-1/NA:2018-10. 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.“	12