11

98. Jahrgang November 2021, S. 838-851 ISSN 0932-8351

Sonderdruck

Bautechnik

Zeitschrift für den gesamten Ingenieurbau



- DIN EN 1998-1/NA-2021 im Kontext der Normenentwicklung
- Rezente Erdbebentätigkeit in Deutschland
- Spektren in DIN EN 1998-1/NA-2021
- Erdbebennachweis von Mauerwerksbauten
- Out-of-plane-Verhalten von nichttragenden Mauerwerkswänden
- Nachweis gegen Bodenverflüssigung
- Einführung des Eurocodes 8 in der Schweiz
- CO2-Reduktion in der gebauten Umwelt
- Nachruf auf Jörg Schlaich



Untergrundspezifische und einwirkungsabhängige Spektren in DIN EN 1998-1/NA-2021

Im Beitrag werden die Grundlagenuntersuchungen vorgestellt, die zur Bereitstellung der seismischen Einwirkungsgrößen für den neuen nationalen Anhang zu DIN EN 1998-1/NA-2021 geführt haben. Dargestellt wird, wie für die Ergebnisse moderner probabilistischer seismischer Gefährdungsanalysen (PSGA) die seismischen Einwirkungen normkompatibel bereitgestellt werden können. Einleitend werden Vorgehensweisen zur Ermittlung und Überprüfung der Spektren für unterschiedliche Untergrundklassen vorgestellt. Mit den standortspezifischen Bodenbewegungsmodellen wird gezeigt, wie künftig baupraktische Anwendungen auf Grundlage von Starkbebenregistrierungen erfolgen können. Da die Besonderheiten der deutschen Erdbebengebiete durch das im EC 8 vorgesehene Klassifikationsschema nicht abgedeckt werden, ist weiterhin dem Konzept der geologie- und baugrundabhängigen Spektren und der Einführung entsprechender Kombinationen in Form von Untergrundklassen Präferenz einzuräumen. Die Kontrollparameter der elastischen Spektren für die Untergrundverhältnisse gem. DIN EN 1998-1/NA-2021 werden auf Grundlage simulativer Standortanalysen an repräsentativen Modellprofilen für den interessierenden Bereich von Einwirkungsintensitäten und somit auch für verschiedene Wiederkehrperioden ermittelt. Damit wird auch der Bezug zu den Verhaltens- bzw. Grenzzuständen und den zugehörigen Nachweisaufgaben hergestellt. Abschließend wird ein Ausblick auf die nächste Phase der europäischen Erdbebennormung gegeben.

Stichworte Bemessungsspektren; Standortanalysen; Normung; Erdbebeneinwirkung; Untergrundkombinationen

1 Vorbemerkungen

Mit dem Konzept der geologie- und untergrundabhängigen Spektren hat die deutsche Baunormung seit mehreren Jahrzehnten einen eigenständigen Weg verfolgt, um auf die Besonderheiten deutscher Erdbebengebiete und die dort vorherrschenden Untergrundbedingungen zu reagieren.

Das Konzept geht in wesentlichen Ansätzen auf den Vorschlag zur Harmonisierung der Baubestimmungen nach [1, 2] zurück. Darin werden, wenn auch zunächst beschränkt auf Baden-Württemberg, geologische Untergrundstrukturen weitaus stärker differenziert als in DIN 4149 [3] ausgewiesen. Hervorzuheben ist, dass von Anfang an Wert darauf gelegt wurde, das geologische Tiefenprofil als maßgebliches Klassifikationskriterium zu nehmen. Erstmals wurden Profilklassen festgelegt, mit denen die Mächtigkeit der sedimentären Schichten [H] –

Site-specific and action-dependent spectra in DIN EN 1998-1/NA-2021

The paper presents the basic investigations that have led to the provision of the seismic action parameter for the new national annex to DIN EN 1998-1/NA-2021. It is shown how the results of modern probabilistic seismic hazard analyzes (PSHA) can be made available in a code-compatible manner. Initially, procedures for determining and checking the spectra for different subsoil classes are presented. With the site-specific soil movement models, an outlook is given of how practical building applications can be carried out on the basis of strong motion records in the future. Since the particularities of the German earthquake areas are not covered by the classification scheme provided in EC 8, preference should still be given to the concept of geology and building site-dependent spectra and the introduction of corresponding combinations in the form of subsoil classes. The control parameters of the elastic spectra for the subsoil combinations according to DIN EN 1998-1/NA-2021 are determined on the basis of simulative site response analyses on representative model profiles for the relevant range of impact intensities and thus also for different return periods. In this way, the reference to the behavior or limit states and the associated verification tasks can be established. Finally, an outlook on the next phase of European earthquake standardization is given.

Keywords design spectra; site response analysis; standardization; earthquake impact; soil classes

mit Tiefen von 10 bis 1000 m – berücksichtigt werden konnten. Entsprechende Spektren (Kontrollperioden und Bodenfaktoren) wurden aus einfachen Modellüberlegungen abgeleitet, ohne zum damaligen Zeitpunkt überhaupt auf standorttypische Starkbebenregistrierungen zurückgreifen zu können [1, 2].

Auf dieses Konzept wurde in den Folgejahren u.a. in der Erstellung des nationalen Anwendungsdokuments EC8 NAD (1997) [4], der Neufassung der DIN 4149 mit der Fassung 2005 [3] und DIN EN 1998-1/NA:2011-01 [5] Bezug genommen. Eine Übersicht zur Entwicklung der Normspektren für deutsche Erdbebengebiete wird durch [6] gegeben. Auch für künftige Generationen der Baunormung ist dieses Konzept mustergültig.

Der Beitrag bezieht sich auf die im Auftrage des Instituts für Bautechnik (DIBt) in zwei Phasen durchgeführten und in verschiedenen Berichten nachvollziehbaren Untersuchungen [7, 8]. Dabei konnte auf unterschiedliche Vorarbeiten zurückgegriffen werden. Diese betreffen einerseits die Neuerstellung der probabilistischen Gefährdungskarten und die in verschiedenen Bearbeitungsständen vom GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ) ermittelten Felsspektren sowie andererseits die vom Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden (EDAC) durchgeführten Untersuchungen von Strong-Motion-Stationen in Kalifornien.

Die Arbeiten zu den Gefährdungskarten werden in [8, 9], aber auch im Übersichtsbeitrag von [10] ausführlich gewürdigt.

2 Vorgehensweisen zur Überprüfung des Zusammenhangs zwischen den Spektren unterschiedlicher Untergrundklassen

2.1 Übersicht

Zur Ermittlung und Überprüfung der Spektren stehen heute aufgrund der Quantität weltweiter Starkbebenregistrierungen andere Vorgehensweisen zur Verfügung, als dies noch für das NAD (1997) [4], DIN 4149:2005 [3] oder DIN EN 1998-1/NA:2011-01 [5] der Fall war. Dabei geht es nicht um den Entscheid für eine Vorzugsvariante, sondern vielmehr um die Kombination der Ansätze, um bspw. die Plausibilität der untergrundspezifischen Spektren im Hinblick auf die mit ihnen abgebildeten Verstärkungseffekte und ihre Abstimmung untereinander sicherzustellen. Dies gilt insbesondere dann, wenn die Besonderheiten der Untergrundbedingungen wie z. B. die starke Variation der Schichtmächtigkeit durch Definition entsprechender Modellprofile zwar normentauglich abgebildet werden kann, aber eben die entsprechenden Registrierungen fehlen. Dies ist das Dilemma, dem durch die Grundlagenarbeiten für das NA zwar begegnet wird, das aber weitergehende Forschungsarbeiten impliziert.

Als Meilenstein in diesem Kontext sind die vom Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden der Bauhaus-Universität Weimar (EDAC) in Zusammenarbeit mit dem United States Geological Survey (USGS) durchgeführten instrumentellen Standortuntersuchungen an den kalifornischen Strong-Motion-Stationen einzuordnen [11-13]. Dabei wird unterstellt, dass mittels der H/V-Spektren eine Analogiebetrachtung zu den Übertragungseigenschaften in deutschen Erdbebengebieten hergestellt werden kann. Die Richtigkeit dieses Ansatzes wird letztlich dadurch bestätigt, dass in den probabilistischen seismischen Gefährdungsanalysen auch die Bodenbewegungsmodelle aus kalifornischen Erdbeben mit hoher Wichtung eingeflossen sind [14]. Mit den durch EDAC ausgewerteten Erdbebenregistrierungen konnten die verschiedenen Vorgehensweisen zur Anwendung gebracht werden. Sie seien nachfolgend und mit dem Hinweis auf die ausführlichen Darstellungen in [7, 8] nur kurz erläutert.

2.2 Statistische Auswertungen

Statistische Auswertungen beziehen sich auf zuvor eingeteilte Datensätze für unterschiedliche Untergrundklassen. Die korrekte Zuordnung zu der jeweils zutreffenden Klasse war in der Vergangenheit ein Problem; hier haben die instrumentellen Auswertetechniken und entsprechende Klassifikationsschemata [12, 15] zu einer signifikanten Schärfung beigetragen.

Aus den Antwortspektren von Bebenaufzeichnungen aus Kalifornien [13, 16] wurden die 50%-Fraktile und die Mean-Werte der Spektren für die verschiedenen Untergrundkombinationen nach DIN 4149 [3] bestimmt (Bild 1).

Betrachtet werden dabei die für die deutschen Erdbebengebiete relevanten Magnituden $4,5 \le M \le 6,5$ und Entfernungen von R < 40 km. Die Spektren sind aufgrund ihrer unterschiedlichen Datenzusammensetzung nicht direkt miteinander vergleichbar. Daher wurden die Spektren den statistischen Auswertungen unter Verwendung der PGA-Werte aus den Abnahmebeziehungen von [13] auf die Magnitude-Entfernungskombinationen (M/R) für die Untergrundkombination A-R (Fels) skaliert. Die Vorgehensweise und Ergebnisse sind in Bild 1 dargestellt. (Es ist auf Abb. 3.1 in [8] zu verweisen.)

Der Vergleich der Spektren aus den statistischen Auswertungen mit den aus den Standortanalysen abgeleiteten Vorschlägen für die elastischen Antwortspektren kann [8] entnommen werden. Wie die Ergebnisse zeigen, bietet diese Form der Auswertung nur einen ersten Anhaltspunkt über die Abstimmung zwischen den verschiedenen Untergrundkombinationen, die in dieser Form jedoch keine Verallgemeinerung im Sinne normentypischer Faktorenfestlegungen ermöglicht.

2.3 Bodenbewegungsmodelle

Auf Grundlage der nach den DIN- und NA-konform klassifizierten Erdbebenregistrierungen werden in [16] entsprechende Bodenbewegungsmodelle nach einfachen Regressionstechniken vorgelegt. Die Bestimmungsgleichung kann als Oberfläche der Boden- oder Spektralbeschleunigung (für eine vorgegebene Periode) im Magnituden-Entfernungsraum interpretiert werden (Beispiele in [7, 8]). Das Bodenbewegungsmodell wird durch Gl. (1) gegeben:

$$\log(y) = C_1 + C_2 M + C_3 \log(r) + C_4 S_{B-R} + (1)$$

$$C_5 S_{C-R} + C_6 S_{B-T} + C_7 S_{C-T} + C_8 S_{C-S} + \sigma P$$

Um die für den Standort charakteristischen Spektren zu berechnen, ist die maßgebliche Untergrundklasse z. B. bei Klasse C-S mit $S_{C-S} = 1,0$ zu setzen. Die ausgewerteten Bodenkoeffizienten repräsentieren jeweils die periodenabhängige Relation zwischen den Boden- und Felsspek-



Bild 1 Statistische Auswertung von Spektren realer Bebenaufzeichnungen (s. a. Abb. 3.1 in [8]) Statistical evaluation of spectra of real earthquake recordings (see Figure 3.1 in [8])

tren, d.h., sie nehmen (die Registrierungen für) den Fels als Referenz. Aus den Auswertungen der Daten war zu schlussfolgern, dass die Plausibilität in der Abstimmung zwischen den Untergrundklassen nur eingeschränkt gegeben war. Eine Aktualisierung des Datensatzes war im Vorhaben nicht vorgesehen, sodass sich aufgrund der methodischen und normtechnischen Vorteile – in Kontinuität zu den Grundlagenuntersuchungen [17] – für die Auswertung von Modellprofilen mittels Standortanalysen entschieden wurde.

2.4 Standortanalysen unter Berücksichtigung von Streubreiten

In EN 1998-1 wird angemerkt, dass das jeweils verwendete Baugrundklassifikationsschema unter Berücksichtigung des geologischen Untergrunds im nationalen Anhang jedes Landes festgelegt werden kann. Von dieser Regelung wird bereits in DIN EN 1998-1/NA:2011-01 [5] Gebrauch gemacht.

Die elastischen Antwortspektren für die einzelnen Untergrundkombinationen in DIN EN 1998-1/NA-2021 wer-



Bild 2 Festlegung der Spektrenform auf Grundlage von Standortanalysen mit Parameterstreuung (s. a. Abb. 3.10 in [8]) Smoothing of the spectrum shape on the basis of site response analysis with parameter scatter (see Figure 3.10 in [8])

den auf Grundlage von seismischen Standortanalysen (Site Response Spectral Analysis – SRSA) abgeleitet.

Dazu werden aus repräsentativen Modellprofilen für die Untergrundkombinationen zahlreiche Profilvariationen simuliert (Abschn. 3) und verschiedene spektrumkompatible synthetische Zeitverläufe als Eingangserregung (und mit Bezug auf den Felshorizont) für die Standortanalysen angesetzt [8].

Mit den Ergebnissen der Standortanalysen lassen sich dann die Kontrollperioden und die zugehörigen Bodenfaktoren der elastischen Antwortspektren ableiten (Abschn. 3.4).

Die gewählte Vorgehensweise zur Ermittlung der Kontrollperioden und der Bodenfaktoren ist in Bild 2 (nach Abb. 3.10 in [8]) exemplarisch dargestellt.

3 Festlegung der Spektrenparameter

3.1 Repräsentative Modellprofile für die Untergrundklassen

3.1.1 Profilvarianten zur Abdeckung des Definitionsbereichs

In Anlehnung an die Arbeiten in [17] wurden verschiedene Modellprofile festgelegt, welche die Untergrundkombinationen der DIN 4149 [3] repräsentativ abdecken. Die Sedimentmächtigkeiten der einzelnen Modellprofile über dem Felshorizont können schematisch Bild 3 entnommen werden. Die Betrachtungstiefe des Baugrunds wurde in den Untersuchungen mit Blick auf die Regelungen im Eurocode DIN EN 1998-1 [18] gegenüber DIN 4149 [3] – per Definition – von 25 m auf 30 m erhöht.



Bild 3 Definition von mit den geologischen Untergrundklassen kompatiblen Grundprofilen und ihrer Variation mit der Schichtmächtigkeit Definition of basic profiles compatible with the geological subsoil classes and their variation with the layer thickness

Um die Unsicherheiten bei den Parametern der Tiefenprofile und die große Variabilität real vorhandener Standortbedingungen zu berücksichtigen, werden ausgehend von diesen Modellprofilen jeweils 100 Tiefenprofile simuliert, die ihrerseits den Standortanalysen gem. der von EDAC entwickelten Methodik [19] zugrunde gelegt werden (Abschn. 3.3).

3.1.2 Äquivalent-lineare Bodenkenngrößen

Für die Berechnungen wird ein äquivalent-linearer Ansatz zur Ermittlung der effektiven bodendynamischen Kenngrößen Schubmodul/Scherwellengeschwindigkeit und Dämpfung zugrunde gelegt. Dazu sind die Veränderungen des Schubmoduls G bzw. der Scherwellengeschwindigkeit $v_{\rm s}$ und der Dämpfung D in Abhängigkeit von den erreichten Schubverzerrungen γ der einzelnen Schichten zu berücksichtigen. Für die verschiedenen Bodenarten liegen in der Literatur repräsentative $G/G_{max}(\gamma)$ und $D(\gamma)$ -Kurven vor. Es werden die Kurven nach [20, 21] für kohäsionslose Materialien angesetzt, welche die tiefenabhängige Verfestigung der Böden differenzierter berücksichtigen.

3.2 Varianten der untersuchten normtypischen Felsspektren

In [8] werden vier verschiedene Felsanregungen (Varianten 1–4) untersucht. Ausgehend von dem auf $a_{g,FH} =$ 1,0 m/s² normierten Antwortspektren der unterschiedlichen Felsanregungen werden spektrenkompatible synthetische Zeitverläufe als Eingangserregung für die Standortanalysen ermittelt. Die synthetischen Zeitverläufe werden auf verschiedene Beschleunigungsniveaus $a_{g,FH}$ skaliert (Bild 2). Die Beschleunigungsniveaus und der Ansatz der einzelnen Zeitverläufe in den betrachteten Varianten sind in Tab. 1 aufgeführt.

Für die synthetischen Zeitverläufe gem. Variante 1 werden die Normspektren der Typen 1 und 2 für Ground Type A aus dem Eurocode [18] zugrunde gelegt. Die in Variante 2 verwendeten Felsspektren basieren auf den Auswertungen des SHARE-Projekts [22] für ausgewählte Standorte. Variante 3 bezieht sich auf die in [23] bereitgestellte Deaggregation des Gefährdungshintergrunds (nach den Magnitude- und Entfernungsbeiträgen) für ausgewählte Standorte. Die Felsspektren werden nach Abnahmebeziehungen von [24, 25] berechnet.

Die Vorschläge für DIN EN 1998-1/NA-2021 basieren auf Variante 4, die nach mehreren Änderungen den letzten Stand der probabilistischen Gefährdungsanalysen [26] berücksichtigt. Für 35 Standorte werden die Felsspektren für Wiederkehrperioden von 475 und 2475 Jahren im Ergebnis der aktuellen Analysen übernommen. Die Spektren wurden normiert und aus den Mittelwertspektren der Amplifikation synthetische Zeitverläufe erzeugt. Ein wesentlicher Vorteil der durchgeführten Untersuchungen besteht darin, dass die Ergebnisse sinnvoll auch mit den Nachweisen der Limit bzw. Performance States kombiniert werden können. Insofern liefern die Ergebnisse auch eine Grundlage, um verhaltensbasierte Konzepte anwenden zu können.

3.3 Standortanalysen

Die Standortanalysen wurden mit einer in MATLAB umgesetzten Version des Programms SHAKE [27] durchgeführt, die in einer erweiterten Variante die Stapelverarbeitung der verschiedenen Profile (Bild 4) mit den verschiedenen synthetischen Zeitverläufen ermöglicht [19].

Berechnungen werden für die Tiefenprofile unter Berücksichtigung von Streubreiten der bodendynamischen Kenngrößen durchgeführt (Abschn. 2.4). Die Auswertung wird einheitlich wie folgt vorgenommen (Bild 2):

- Es werden 100 Profilvarianten simuliert, d.h., im Rahmen der zugelassenen Streubreiten werden die relevanten Bodenkenngrößen ausgespielt. Bild 4 zeigt Beispiele für die simulierten Profilvarianten der Untergrundkombinationen C-T und C-S.
- Die Freifeldspektren werden vollständig, d.h. für alle (100) simulierten Profile mit dem jeweils zugrunde gelegten synthetischen Zeitverlauf (synZV) berechnet. Die Auswertungen ermöglichen es, Unsicherheiten in der Beschreibung und im Einfluss des Tiefenprofils zu spiegeln.
- Die Festlegung der Spektren (Glättung) und Annäherung an Zielkurven wird in den Beispielen von Bild 5 veranschaulicht. Die Vielzahl der Kurven spiegelt die Streubreite der simulierten Tiefenprofile.
- In der grafischen Präsentation der Ergebnisse werden neben den Freifeldspektren aus den 100 Simulationen die 16%-, 50%- (Median), 84%-Fraktile und der Mean aus der statistischen Auswertung angegeben (Bild 5).

Die insgesamt 2300 simulierten Profile in den Untergrundkombinationen der Vorzugsvariante 4 wurden mit 20 Be-

| Nachweiszustand (Performance State) | | Beschleunigungen | Varianten ^{1, 2} | | | | | |
|--|------------------------------|---|---------------------------|--------------|--------------|--------------------------|--|--|
| | | $a_{\rm g,FH} [{\rm m/s^2}]$ | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| DL | Damage Limitation | 0,1, 0,3, 0,5 | Typ 2 | Тур 475 | Тур 475 | Тур 475 Тур 2475 | | |
| SD LS | Severe Damage Life Safety | 0,5, 1,0, 1,5, 2,0 0,5, 0,8, 1,0, 1,5, 2,0 | Typ 2 _ | Typ 475 - | Typ 475 - | – Typ 475 Typ 2475 | | |
| NC | Near Collapse | 2,0, 3,0, 4,0 | Typ 1 | Тур 2475 | Тур 2475 | Typ 475 Typ 2475 | | |

Hinweise: ¹ Typ 1 und Typ 2 in Variante 1 beziehen sich auf Normspektren gem. Eurocode [18]; ² Typ 475 und Typ 2475 beziehen sich auf die in [22, 23, 26] bereitgestellten Felsspektren für Wiederkehrperioden von 475 bzw. 2475 Jahren [8]

Tab. 1 Untersuchte Beschleunigungen ag,FH Applied acceleration values ag,FH



Bild 4 Beispiele der simulierten Tiefenprofile: a) Beispielprofile für die Untergrundkombination C-T (Felshorizont bei 75 m Tiefe), b) Beispielprofile für die Untergrundkombination C-S (Felshorizont bei 250 m Tiefe)

Examples of simulated depth profiles: a) example profiles for the subsoil combination C-T (rock horizon by 75 m depth), b) example profiles for the subsoil combination C-S (rock horizon by 250 m depth)



Bild 5 Ergebnisse der Standortanalysen für Variante 4: a) Spektren für die Untergrundkombination C-T (a_{g,FH} = 0,3 m/s²), b) Spektren für die Untergrundkombination C-S (a_{g,FH} = 2,0 m/s²) Results of the site response analysis for variant 4: a) spectra for the subsoil combination C-T (a_{g,FH} = 0.3 m/s²), b) spectra for the subsoil combination

C-S (a_{g,FH} = 2.0 m/s²)

schleunigungsniveau-Zeitverlaufskombinationen untersucht, sodass insgesamt 46.000 Simulationen für die Ableitung der Spektren der einzelnen Untergrundkombinationen zugrunde liegen.

3.4 Festlegung von Kontrollperioden und Bodenfaktoren

3.4.1 Vorgabe der maßgeblichen Spektrumform

Die Festlegung der Kontrollperioden und Bodenfaktoren erfolgt auf Grundlage der 50%-Fraktile der Standort-

analysen für jede Untergrundkombination. Dazu werden die ermittelten Spektren aus den Standortanalysen der einzelnen Profile einer Profilgruppe zusammengefasst.

Im Unterschied zu den Spektren der bisherigen Normengeneration wird in einem ersten Schritt die Differenzierung der Bodenfaktoren gem. dem in [17] vorgestellten Konzept 2 zur Festlegung der spektrumbeschreibenden Parameter geprüft. Dazu wird ein zusätzlicher Bodenfaktor S2 eingeführt, der die Variabilität des Vergrößerungsfaktors β_0 indirekt berücksichtigt (Bild 6).

J. Schwarz, H. Maiwald, C. Kaufmann: Untergrundspezifische und einwirkungsabhängige Spektren in DIN EN 1998-1/NA-2021



Bild 6 Konzept der vorgeschlagenen Antwortspektren (Festlegung der Kontrollperioden und der Bodenfaktoren S1 und S2) Concept of the proposed response spectra (definition of the control periods and the soil factors S1 and S2)

Des Weiteren werden für die Kontrollperiode T_D zwei Werte angegeben, wobei die Untergrenze von $T_{D1} = 1,2$ s auf den für deutsche Erdbebengebiete maßgeblichen Spektrumtyp 2 nach EC 8 [18] Bezug nimmt.

3.4.2 Horizontalspektrum

Die Spektralbeschleunigungen des Normspektrums ergeben sich damit gem. den Gln. (2)–(5) mit dem Ansatz $a_{gR} = a_{g,A-R}$.

Für $T \leq T_{\rm B}$:

$$S_{\rm e} = a_{\rm g,A-R} \cdot S_1 \cdot \left[1 + \frac{T}{T_{\rm B}} \cdot \left(S_2 \cdot \beta_0 - 1 \right) \right]$$
(2)

Für $T_{\rm B} \leq T \leq T_{\rm C}$:

$$S_{\rm e} = a_{\rm g,A-R} \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot \beta_0 \tag{3}$$

Für $T_{\rm C} \le T \le T_{\rm D}$:

$$S_{\rm e} = a_{\rm g,A-R} \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot \beta_0 \cdot \left[\frac{T_{\rm C}}{T}\right] \tag{4}$$

Für $T \ge T_D$:

$$S_{\rm e} = a_{\rm g,A-R} \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot \beta_0 \cdot \left[\frac{T_{\rm C} \cdot T_{\rm D}}{T^2}\right]$$
(5)

Die Kontrollperioden der favorisierten Variante 4 für den Bereich der Life Safety werden für die Normspektren mit einer Wiederkehrperiode von $T_{\rm R}$ = 475 Jahren im Ergebnis der Glättung gem. Bild 5 gewählt (Tab. 2).

Die Vorschläge für die Kontrollperioden für die weiteren Spektren DL (Damage Limitation) und NC (Near Collapse) können [8] entnommen werden.

Bild 7 Bodenfaktoren für die Untergrundkombination A-R Soil factors for the subsurface combination A-R

Bild 8 Beschleunigungsabhängige Bodenfaktoren für die Untergrundkombination C-R: a) S1 (*a*_{g,FH}) und S2 (*a*_{g,FH}), b) S1 (*a*_{g,A-R}) und S2 (*a*_{g,A-R}), c) S (*a*_{g,A-R})

Velocity-dependent soil factors for the soil combination C-R: a) S1 $(a_{g,FH})$ and S2 $(a_{g,FH})$, b) S1 $(a_{g,A-R})$ and S2 $(a_{g,A-R})$, c) S $(a_{g,A-R})$

Die Untersuchungen zeigen, dass der Bodenfaktor S1 (mit Ausnahme für die Untergrundkombination A-R) mit zunehmender Beschleunigung abnimmt und es zu einer Verschiebung und Verbreiterung des Plateaubereichs kommt. Für die Untergrundkombination A-R ergeben sich über den untersuchten Beschleunigungsbereich konstant bleibende Bodenfaktoren größer als 1,0, wodurch das verbleibende Amplifikationspotenzial der Untergrundkombination A-R gegenüber dem Felshorizont in der Tiefe beschrieben wird (Bild 7).

Dies bedeutet, dass bei Ansatz von Zeitverläufen für Felserregungen, die ihren Ursprung an der freien Oberfläche haben (outcropping motion), diese Verstärkungseffekte in den Ergebnissen von Standortanalysen zu berücksichtigen sind.

Da die Untergrundkombination A-R als Referenzuntergrundkombination mit den Bodenfaktoren S1 = S2 = 1,0vorzusehen ist, auf die sich die Bodenfaktoren der anderen Untergrundkombinationen in der Norm beziehen sollen, sind die Bodenfaktoren für die einzelnen Untergrundkombinationen und die zugehörigen Beschleunigungen entsprechend zu skalieren (Bilder 8a, 8b).

In der für die Normung favorisierten Variante 4 kann das Konzept eines einzelnen (im gesamten Periodenbereich einheitlichen) Bodenfaktors S weiterhin als Vereinfa-

 Tab. 2
 Vorschlag Kontrollperioden Spektren LS (Life Safety)

 Proposal for control periods spectra LS (Life Safety)

| Untergrund- kombination | <i>T</i> _B [s] | <i>T</i> _C [s] | <i>T</i> _{D1} [s] | <i>T</i> _{D2} [s] |
|----------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|
| A-R | 0,10 | 0,20 | 1,20 | 2,00 |
| B-R | 0,10 | 0,25 | 1,20 | 2,00 |
| C-R | 0,10 | 0,30 | 1,20 | 2,00 |
| В-Т | 0,10 | 0,25 | 1,20 | 2,00 |
| С-Т | 0,10 | 0,40 | 1,20 | 2,00 |
| B-S | 0,10 | 0,40 | 1,20 | 2,00 |
| C-S | 0,10 | 0,50 | 1,50 | 2,00 |

| Tab. 3 | Bodenfaktor S (bezogen auf die Untergrundkombination A-R) |
|--------|---|
| | Soil factor S (related to soil combination A-R) |

chung zugelassen werden (Bild 8 c), da für die auf $a_{g,A-R}$ bezogenen Bodenfaktoren S2 bei den meisten Untergrundkombinationen im realistisch zu erwartenden Beschleunigungsbereich S2 \approx 1 gilt.

Die maßgeblichen Bodenfaktoren S ergeben sich dann für die verschiedene Beschleunigungen $a_{g,A-R}$ gem. Tab. 3.

4 Einführung der Ergebnisse in die Baunormung

4.1 Parametrisierung der Felsspektren

Es wird gem. [8] empfohlen, die normtypische Darstellung (Parametrisierung) der Felsspektren beizubehalten. In diesem Zusammenhang war dann auch die Abstimmung zwischen den Untergrundkombinationen zu überprüfen.

Diese für die Baunormung grundsätzliche Entscheidung ist auch dadurch zu begründen, dass die aus den PSGA resultierenden Spektren eine starke Abhängigkeit von den zugrunde gelegten Bodenbewegungsmodellen und ihren Wichtungsfaktoren erkennen lassen, die für die ingenieurpraktische Anwendung durchaus problematisch sein können. Nicht zuletzt haben diese Besonderheiten zu der Entscheidung beigetragen, im Rahmen der Untersuchungen (und im Hinblick auf den Datenursprung) die verschiedenen Varianten von Felsspektren zu berücksichtigen.

4.2 Maßgebliche Kenngröße der Gefährdungs(zonen)karte

Die vorgeschlagene Abbildung der Ergebnisse der PSGA wird durch das Schema von Bild 9 veranschaulicht. Die Annäherung bzw. Anpassung kann sich sowohl auf den Spektralwert bei der Periode T_A – hier bezeichnet mit S_A – beziehen oder auf einen charakteristischen Kontrollwert im Plateau.

In Bild 9 ist dies die max. Spektralbeschleunigung der berechneten Kontrollperioden, hier bezeichnet mit

| $a_{\rm g,A-R}$ [m/s ² |] | A-R | B-R | C-R ¹ | B-T | C-T | B-S | C-S |
|-----------------------------------|------|------|------|-------------------------|------|------|------|------|
| DL | 0,10 | 1,00 | 1,30 | 1,65 | 1,10 | 1,60 | 0,90 | 1,45 |
| | 0,35 | 1,00 | 1,25 | 1,50 | 1,05 | 1,45 | 0,85 | 1,30 |
| | 0,60 | 1,00 | 1,25 | 1,40 | 1,05 | 1,40 | 0,80 | 1,20 |
| LS | 0,60 | 1,00 | 1,25 | 1,40 | 1,05 | 1,40 | 0,80 | 1,20 |
| | 0,90 | 1,00 | 1,20 | 1,30 | 1,00 | 1,25 | 0,80 | 1,5 |
| | 1,15 | 1,00 | 1,20 | 1,25 | 1,00 | 1,20 | 0,75 | 1,05 |
| | 1,75 | 1,00 | 1,20 | 1,15 | 1,00 | 1,10 | 0,70 | 0,95 |
| | 2,30 | 1,00 | 1,15 | 1,05 | 0,95 | 1,00 | 0,70 | 0,85 |
| NC | 2,30 | 1,00 | 1,15 | 1,05 | 0,95 | 1,00 | 0,70 | 0,85 |
| | 3,50 | 1,00 | 1,15 | 0,95 | 0,90 | 0,85 | 0,65 | 0,70 |
| | 4,60 | 1,00 | 1,10 | 0,80 | 0,85 | 0,70 | 0,60 | 0,60 |

¹ Bild 8c

Bild 9 Einführung der Werte aus der Gefährdungskarte zur Festlegung der standortkonkreten Felsspektren; hier auf Basis avg(SRA) (Hinweis: max(SRA) bezieht sich auf den max. Spektralwert) Introduction of the values from the hazard map to determine the site-specific rock spectra; here based on avg(SRA)

max(SRA). Spektralbeschleunigungen für $T \ge T_C$ ergeben sich wie im Schema dargestellt unter Annahme eines konstant verstärkten Geschwindigkeitsbereichs, der dann ab T_D in den verstärkten Verschiebungsbereich übergeht.

Mit der normtypischen Darstellung (rote Spektrumkurve) wird sichergestellt, dass die repräsentativen Spektren der PSGA (blaue Spektrumkurve) im Bereich höherer Perioden am Maßstab der aktuellen Analysen eine ausreichend konservative Abbildung erfahren.

Die im Parallelvorhaben vorgelegten Gefährdungskarten [14] stehen für einzelne Perioden, aber auch für gemittelte Plateauwerte zur Verfügung. Es wurde entschieden, für die Anwendung im NA auf den gemittelten Plateauwert zurückzugreifen, der im max. verstärkten Periodenbereich zwischen 0,1 s, 0,15 s und 0,2 s als repräsentativ angesehen werden kann.

Dieser Wert wird hier mit avg(SRA) bezeichnet und repräsentiert die Referenzgröße, die durch die Gefährdungskarte für den Fels und eine Wiederkehrperiode von 475 Jahren in das NA aufzunehmen ist (Schema in Bild 9). Dabei ist es unerheblich, welche Fraktile der Gefährdungsanalyse zugrunde gelegt wird. Es ist letztlich entscheidend, wie diese Spektralwerte in die Felsspektren als eine Untergrundkombination der standort- und baugrundabhängigen Spektren in die baupraktische Anwendung eingeführt werden.

Es wird unter Beibehaltung der normentypischen Kontrollperioden $T_{\rm B}$, $T_{\rm C}$ und $T_{\rm D}$ der Spektrumverlauf so bestimmt, dass eine konsistente Abbildung der Spektren für die Untergrundkombinationen gem. Bild 9 möglich wird. Diese Festlegung trägt Unsicherheiten der Gefährdungsanalysen und auch den im Rahmen der verschiedenen Untersuchungen erkennbaren Streubreiten in der Lage des Plateaus Rechnung.

4.3 Normspektren für die Untergrundklassen

Für $T \leq T_B$ (für $T_A = 0$):

4.3.1 Normkompatible Bestimmungsgleichungen

Die Spektralwerte für die elastischen Antwortspektren (S_e) ergeben sich damit nach den Gln. (6)–(11).

$$S_{\rm e} = S \cdot \left[\left(\operatorname{avg}(\operatorname{SRA}) - S_{\rm A} \right) \cdot \frac{T}{T_{\rm B}} + S_{\rm A} \right]$$
(6)

$$S_{\rm A} = \frac{\operatorname{avg}({\rm SRA})}{\beta_{\rm ref}}; \beta_{\rm ref} \,^{(1),\,(2)} \tag{7}$$

- ⁽¹⁾ Auf Basis einer großflächigen Auswertung der den Gefährdungsanalysen zugrunde liegenden Rasterpunkten ist es möglich, die Verteilung der β_0 -Werte zu bestimmen. Im Ergebnis kann ein repräsentativer Wert β_{ref} festgelegt werden. Er ist aus dem letztlich für die Gefährdungskarte festgelegten Auswerteniveau (Mean, Median usw.) abzuleiten.
- ⁽²⁾ Über diese Festlegung ist es künftig möglich, den sog. Einhängewert des Spektrums zu bestimmen.

oder

$$S_{\rm A} = a_{\rm g,A-R} \tag{8}$$

Für $T_{\rm B} \leq T \leq T_{\rm C}$:

$$S_{\rho} = S \cdot \operatorname{avg}(\operatorname{SRA}) \tag{9}$$

Für $T_{\rm C} \le T \le T_{\rm D}$:

$$S_{\rm e} = S \cdot \operatorname{avg}(\operatorname{SRA}) \cdot \left[\frac{T_C}{T}\right]$$
(10)

Für $T \ge T_D$:

$$S_{\rm e} = S \cdot \operatorname{avg}(\operatorname{SRA}) \left[\frac{T_{\rm C} \cdot T_{\rm D}}{T^2} \right]$$
(11)

Mit der Abkehr von der Maximalbeschleunigung (PGA) geht ein wesentlicher Parameter der Baunormung verloren. Es handelt sich dabei um den Faktor zur Abbildung der Amplifikationen im Plateau (β_0). Dieser Faktor wurde bis dato einheitlich mit 2,5 definiert und wird letztlich so indirekt beibehalten.

4.3.2 Abschätzung des relevanten Beschleunigungsbereichs

Der für die Festlegung der Spektren beschreibenden Parameter relevante Beschleunigungsbereich ist aus den Ergebnissen der PSGA abzuleiten. In den bisherigen Erdbebenzonen Zonen 0, 1, 2 und 3 wird überprüft, in welcher Größenordnung die Spitzenbeschleunigungen für den Fels zu liegen kommen.

| Tab. 4 | Mittlere Felsbeschleunigungen an den 35 Standorten für Variante 4 |
|--------|---|
| | Average rock acceleration on the 35 investigation sites for variant 4 |

| Erdbebenzone | Felsbeschleuni | Relation | | |
|--------------|-------------------|--------------------|-----|--|
| | $T_{\rm R} = 475$ | $T_{\rm R} = 2475$ | | |
| 0 | 0,24 | 0,61 | 2,5 | |
| 1 | 0,41 | 1,04 | 2,5 | |
| 2 | 0,59 | 1,44 | 2,4 | |
| 3 | 1,07 | 2,32 | 2,2 | |

Die PGA-Werte werden in Abhängigkeit von der mittleren Wiederkehrperiode statistisch ausgewertet (Tab. 4). Es kann gezeigt werden, dass die bisherigen Werte und die aktuellen Gefährdungsanalysen in plausiblen Zusammenhang zu bringen sind. Für die Zonen 1 und 2 zeigen sich bei der Wiederkehrperiode $T_{\rm R}$ = 475 Jahre Werte, die mit den bisherigen Bemessungswerten gut übereinstimmen. Für die Erdbebenzone 3 wird ein höherer Wert (1,07 gegenüber 0,8 m/s²) ermittelt.

Die mittleren Felsbeschleunigungen für die Wiederkehrperiode von 2475 Jahren verdeutlichen, dass sich in Relation zu den Beschleunigungen bei $T_{\rm R}$ = 475 Jahren Faktoren im Bereich 2,2–2,5 abbilden. Insofern scheint es nicht möglich, ausgehend von der Wiederkehrperiode von 475 Jahren über einen Bedeutungsfaktor auf das Gefährdungsniveau von $T_{\rm R}$ = 2475 Jahren zu extrapolieren.

4.3.3 Spektren für die Referenzwiederkehrperiode $(T_{\rm R} = 475 \text{ a})$

Die Festlegung der baugrundabhängigen Spektren geschieht somit über das Felsspektrum, das hier über den

| avg(SRA) [m/s ²] | A-R | B-R | C-R | B-T | C-T | B-S | C-S | |
|------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|--|
| 0,6 | 1,00 | 1,30 | 1,65 | 1,10 | 1,60 | 0,90 | 1,45 | |
| 1 | 1,00 | 1,25 | 1,50 | 1,05 | 1,45 | 0,85 | 1,30 | |
| 1,5 | 1,00 | 1,25 | 1,40 | 1,05 | 1,40 | 0,80 | 1,20 | |
| 2 | 1,00 | 1,20 | 1,30 | 1,00 | 1,25 | 0,80 | 1,15 | |
| 3 | 1,00 | 1,20 | 1,25 | 1,00 | 1,20 | 0,75 | 1,05 | |
| 4 | 1,00 | 1,20 | 1,15 | 1,00 | 1,10 | 0,70 | 0,95 | |

 Tab. 5
 Vorschlag für die Bodenfaktoren S

 Proposal for the soil factors S

Bild 10 Form und Beschreibung des elastischen Beschleunigungantwortspektrums Shape and description of the elastic acceleration response spectrum

Spektralwert avg(SRA) Bezug auf die probabilistischen seismischen Gefährdungsanalysen (PSGA) nimmt. Die Ermittlung der einzelnen Spektrumbereiche ist Bild 10 zu entnehmen.

Die beschleunigungsabhängigen Bodenfaktoren werden aus den durchgeführten Standortanalysen für die Variante 4 übernommen und in Tab. 5 für avg(SRA) angegeben. (Hinweis: im NA wird avg(SRA) durch den mit $S_{\rm ap,R}$ bezeichneten Parameter ersetzt.)

Die aus den durchgeführten Standortanalysen abgeleiteten Kontrollperioden werden in Tab. 6 übernommen. Die aus den Parametern abzuleitenden Spektren für die Beschleunigung und die Verschiebung werden in Bild 11 dargestellt; wobei als Referenzspektralbeschleunigung $avg(SRA) = 1,0 \text{ m/s}^2$ gesetzt wird.

Tab. 6 Vorschlag für die Kontrollperioden der Spektren mit Bezug auf $T_{\rm R} = 475$ a

Proposal for the control periods of spectra with reference to $T_{
m R}$ = 475 y

| Untergrundkombination | $T_{\rm B}$ [s] | <i>T</i> _C [s] | $T_{\rm D}$ [s] | |
|-----------------------|-----------------|---------------------------|-----------------|--|
| A-R | 0,10 | 0,20 | 2,00 | |
| B-R | 0,10 | 0,25 | 2,00 | |
| C-R | 0,10 | 0,30 | 2,00 | |
| B-T | 0,10 | 0,25 | 2,00 | |
| С-Т | 0,10 | 0,40 | 2,00 | |
| B-S | 0,10 | 0,40 | 2,00 | |
| C-S | 0,10 | 0,50 | 2,00 | |

J. Schwarz, H. Maiwald, C. Kaufmann: Untergrundspezifische und einwirkungsabhängige Spektren in DIN EN 1998-1/NA-2021

| Tab. 7 | Vorschlag für die Bodenfaktoren S für DIN EN 1998-1/NA-2021 |
|--------|---|
| | Proposal for soil factors S for DIN EN 1998-1/NA-2021 |

| avg(SRA) [m/s ²] ¹) | | Untergru | Untergrundkombination | | | | | | | |
|---|------------------------------|----------|-----------------------|------|------|------|-------------------|------|--|--|
| Bereich | Referenzniveau ²⁾ | A-R | B-R | C-R | B-T | C-T | B-S ³⁾ | C-8 | | |
| 0,6-1,0 | 1,0 | 1,00 | 1,25 | 1,50 | 1,05 | 1,45 | 0,85 | 1,30 | | |
| 1,0-2,0 | 2,0 | 1,00 | 1,20 | 1,30 | 1,00 | 1,25 | 0,80 | 1,15 | | |
| > 2,0 | 4,0 | 1,00 | 1,20 | 1,15 | 1,00 | 1,10 | 0,70 | 0,95 | | |

Hinweise:

¹⁾ Für die maßgebliche Spektralbeschleunigung (Fels) wird in Anlehnung an die Gefährdungskarten die Bezeichnung *S*_{aP,R} gewählt. Sie steht für die Spektralbeschleunigung im Plateau (gemittelt aus den Spektralbeschleunigungen der Perioden 0,1, 0,15 und 0,2 s) und bezogen auf felsigen Untergrund (Rock).

²⁾ Werte für das Referenzniveau sind Tab. 5 zu entnehmen. Für die Bodenfaktoren wird der angegebene Bezugswert des Einwirkungsmodells zugrunde gelegt.

³⁾ Da die Untergrundsituation B-S bisher in der Norm nicht enthalten war und die ermittelten Bodenfaktoren in den abmindernden Effekten Besonderheiten aufweisen, wird empfohlen, zunächst die Werte von C-S zu übernehmen und die Faktoren an gemessenen Bodenbewegungen zu überprüfen.

4.3.4 Zusammenfassung der Bodenfaktoren nach Einwirkungsintensitäten

Die aktuellen Untersuchungen bestätigen, dass die Baugrundfaktoren insbesondere für die mächtigen Sedimente bis dato zu optimistisch abgemindert wurden und ein erhebliches (für größere Wiederkehrperioden durchaus charakteristisches) Beschleunigungsniveau voraussetzen, damit in dieser Form Bodenfaktoren S \leq 1,0 plausibilisiert werden können.

Auch die europäische Diskussion (u.a. CEN 2017 [28]) verdeutlicht, dass es im europäischen Kontext derzeit nicht vermittelbar ist, Bodenfaktoren S < 1,0 in die Normung einzuführen. Dies steht auch damit in Verbindung, dass Registrierungen mit mächtigen Sedimenten ausstehen und somit auch eine Datengrundlage fehlt, um diese Effekte nachzuweisen. Insofern sind die Modellrechnungen momentan der einzige Weg, um bei fehlenden Daten zu einem Ergebnis zu kommen. Die in [8] gewählte Vorgehensweise ermöglicht die Festlegung der Kontrollperioden und Bodenfaktoren für verschiedene Beschleunigungsniveaus, die letztlich auch in Verbindung zu den Wiederkehrperioden der Gefährdungskenngrößen gesetzt werden können.

In einem Grundsatzpapier der Obleute [29] wurde empfohlen, für bestimmte Parameterbereiche der maßgeblichen Spektralbeschleunigung unterschiedliche Spektren vorzusehen (Tab. 7). Dies gab dem Normenausschuss die Möglichkeit, ausgehend von realistisch höheren Werten eine durch den Ausschuss getragene Festlegung auf unterem Niveau vorzunehmen (und bei Bedarf die Nachweisanforderungen zu staffeln). Letztlich wurde den in Abschn. 4 skizzierten Vorschlägen gefolgt; sie sind in NA so übernommen und umgesetzt worden.

Bild 11 Vorschlag für $T_{\rm R} = 475$ Jahre: Normspektren nach Tab. 6, 7 für avg(SRA) = 1,0 m/s²: a) Beschleunigungsspektren, b) Verschiebungsspektren Proposal for $T_{\rm R} = 475$ years: code spectra acc. to table 6, 7 for avg(SRA) = 1.0 m/s²: a) acceleration spectra, b) displacement spectra

4.3.5 Zusammenhang mit bisherigen Festlegungen

Ein qualitativer Vergleich der aktuellen und der bisherigen Normspektren wird in [8] für die verschiedenen Untergrundkombinationen und unterschiedliche Einwirkungsintensitäten gegeben.

5 Weitere Ergebnisse

5.1 Überprüfung der Dämpfungsrelation

Die Frage der Dämpfung wird in [7] behandelt. Spektralwerte werden für Dämpfungswerte zwischen 2 und 10% ausgewertet und der Gl. (12) gegenübergestellt, die gegenwärtig für EN 1998-1 empfohlen wird:

$$\eta = \sqrt{\frac{10}{5+\xi}} \ge 0,55 \tag{12}$$

Dabei ist ξ der Wert der viskosen Dämpfung des Bauwerks in %. Der Dämpfungskorrekturbeiwert besitzt für 5% viskose Dämpfung den Referenzwert $\eta = 1$.

Die durch den EC 8 vorgegebene Dämpfungsrelation gilt derzeit völlig unabhängig von den Bodenklassen. Eine Differenzierung im Hinblick auf die Untergrundklassen ist erstmals möglich. Aus den vorliegenden Untersuchungen kann jedoch geschlussfolgert werden, dass Gl. (12) die Relationen in ausreichender Qualität abbildet und somit auch in DIN EN 1998-1/NA:2021 übernommen werden kann.

5.2 Relation zwischen vertikaler und horizontaler spektraler Bodenbewegung

Auf Grundlage der vorliegenden Auswertungen ist es möglich, die Relation zwischen den Spektren der vertikalen (V) und horizontalen Bodenbewegung (H) darzustellen. Entsprechende Ergebnisse werden in [8] für unterschiedliche Definitionen der horizontalen Bodenbewegung aufbereitet.

Es lässt sich für die unterschiedlichen Untergrundkombinationen zeigen, dass die Relation V/H im Periodenbereich nicht durch einen konstanten (periodenunabhängigen) Faktor beschrieben werden kann, sondern dass insbesondere bei den kleinen Perioden das Vertikalspektrum in dem Bereich der Horizontalspektren zu liegen kommt bzw. sogar größer ist.

Dieser Sachverhalt ist nicht unbekannt und lässt sich dadurch kompensieren, dass die Kontrollperiode $T_{\rm B}$ kleiner festgelegt wird als die für die Horizontalkomponente. Für den Bereich der Periode $T > T_{\rm C}$ lässt sich jedoch feststellen, dass mit Bezug auf die Definition der horizontalen Bodenbewegung eine Relation V/H = 0,5 begründet werden kann, sofern die Resultierende der horizontalen Bodenbewegung zugrunde gelegt wird.

5.3 Spektren für höhere Wiederkehrperioden

Gemäß EN 1998-1 [18] ist die Entscheidung über den Spektrumtyp und damit die Spektrumform abhängig von den Magnituden bei Wiederkehrperioden von 475 Jahren. Unberücksichtigt bleibt, inwieweit und wie sich die Spektren verändern, wenn höhere Wiederkehrperioden zu betrachten sind.

Mit der gewählten Vorgehensweise und der Entscheidung, die Ergebnisse der PSGA auch für höhere Wiederholungsperioden (von 2475 Jahren) auszuwerten (Tab. 1, 3) und bei den Standortanalysen zu berücksichtigen, werden durch die einwirkungsabhängigen Bodenfaktoren (Tab. 5, 7) und die empfohlene Modifikation der Kontrollperioden (analog zu Tab. 6 ist im NA eine Tabelle für höhere Wiederholungsperioden enthalten) die erforderlichen Eingangsgrößen (für eine einfache Anwendung) bereitgestellt.

5.4 Datenbasis zur Bereitstellung charakteristischer Zeitverläufe

Wesentliche Grundlage für das Vorhaben bildet die Bereitstellung einer für die deutschen Erdbebengebiete charakteristischen Datenbasis. Diese ermöglicht auch die Auswahl von Zeitverläufen (jeweils in drei Komponenten) für anspruchsvolle Ingenieuraufgaben, die insbesondere zur Ermittlung des räumlichen Verhaltens im Falle von Spezialbauwerken bzw. ihrer regulären Hochbauten gelöst werden müssen.

Der Datenvorhalt wird durch Einrichtung einer Datenbankstruktur gewährleistet. Mittels einfacher Suchkriterien gelingt die Auswahl entsprechender Zeitverläufe, die anhand ihrer Identifizierungsnummer (ID) eindeutig der Station und den Herdparametern (Magnitude, Entfernung) zugeordnet sind.

Tabelle 7.2 in [8] benennt in Abhängigkeit von der Magnituden-Entfernungskombination diejenigen Erdbebenregistrierungen für die einzelnen Untergrundkombinationen, welche die beste (d. h. spektrumkompatible) Annäherung der geglätteten Normspektren (best fit design spectrum) ermöglichen.

In einer anderen Tabelle ([8], Tabelle 7.1) werden Erdbebenregistrierungen bereitgestellt, die zu den 50%-Fraktilen (Median) der Antwortspektren aus den statistischen Auswertungen im Sinne des best fit median die kleinsten Abweichungen aufweisen. Für die baupraktische Anwendung werden somit repräsentative Zeitverläufe begründet und zur Verfügung gestellt.

Bild 12 veranschaulicht die beiden Auswahlkriterien am Beispiel der Untergrundkombination C-S.

6 Ausblick auf die nächste Normengeneration

In den Diskussionen zum NA sind einige wichtige Fragestellungen ausgeblendet geblieben, u. a. auch, welche geologischen Untergrundbedingungen insbesondere in den Gebieten höherer Seismizität besonders verbreitet sind. Bereits jetzt erkennbar ist, dass die Untergrundklasse S besondere Aufmerksamkeit erfordert. In [30] wird mit Bezug auf den 2nd Draft von Project Team 1 [28] darauf hingewiesen, dass mit der Standard site categorization (Stand Oktober 2017) die Möglichkeit eröffnet wurde, einen für deutsche Erdbebengebiete geeigneten, weitergehenden Differenzierungsansatz zu wählen.

Literatur

- Hosser, D.; Keintzel, E.; Schneider, G.; Eibl, J. (Koord.); Keintzel, E. (Koord.) (1990) Proposal for Harmonized Rules for the Determination of Seismjc Input Data, Preliminary Report in: Commission of the European Communities (1989) Background Documents for Eurocode 8, Part 1 (May 1988). Vol. 1 – Seismic Input Data. Vorlage der erweiterten Fassung Eurocode-8-Workshop on Seismic Input Data, Lisbon, July 1990.
- [2] Hosser, D.; Keintzel, E.; Schneider, G. (1991) Seismische Eingangsgrößen für die Berechnung von Bauten in deutschen Erdbebengebieten. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben Harmonisierung europäischer Baubestimmungen. Eurocode 8 – Erdbeben. Universität Karlsruhe.
- [3] DIN 4149 (2005) Bauten in deutschen Erdbebengebieten. Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten. Berlin: Beuth. Ausgabe Apr. 2005.
- [4] NAD (1997) Nationales Anwendungsdokument zum EC 8. Teil 1-1 und Teil 1-2. Grundlagen der Auslegung von Hochbauten. NABau 00.00.00 Nr. 24-97.
- [5] 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. Berlin: Beuth. Ausgabe Jan. 2011.
- [6] Schwarz, J. (2014) Building code related description of seismic action for German earthquake regions in: Butenweg, C.; Kaiser, D. [eds.] Seismic Hazard Harmonization in Europe

Die Klasse very deep war angedacht worden, um solchen Standorten Rechnung zu tragen, die tatsächlich durch sehr große Sedimentauflagen gekennzeichnet sind. Es hätte baupraktische und wirtschaftliche Konsequenzen, wenn es gelingt, für diese Kategorie die charakteristischen Bodenfaktoren zuzuweisen. Entsprechende Untersuchungen stehen noch aus.

Im Rahmen der Festlegung der Einwirkungen sind einige Entscheidungen – nicht zuletzt zur Abminderung bzw. Begrenzung der seismischen Einwirkungen – als Kompromiss vom Normenausschuss gebilligt worden. Insofern ist auf die Meilensteine der Entwicklung des NA [9] und den Einführungsbeitrag der Obleute des NA 005-51-06 AA [10] hinzuweisen.

Das NA bezieht sich auf die erste Generation des Eurocode 8 [18]; Arbeiten der zweiten Generation [28, 31] lassen erkennen, in welche Richtung sich die Normung auch im Bereich der Einwirkungen entwickeln wird. Nicht zuletzt aufgrund der Mitwirkung in den entsprechenden Project Teams [32] kann konstatiert werden, dass das NA wesentliche Entwicklungslinien bereits aufgreift bzw. implementiert. Die betrifft die Referenzgefährdungskenngröße, ebenso die Aufrechterhaltung des Konzepts der geologie- und untergrundabhängigen Spektren, die von der Einwirkungsintensität abhängige Festlegung der Bodenfaktoren und weiterhin die Möglichkeit, die Spektren auf die Besonderheiten deutscher Erdbebengebiete auszurichten.

(SHARE). DGEB-Publikation 16. DGEB-Workshop, Frankfurt a. M., 27. Mai 2014, pp. 69–86.

- [7] Schwarz, J.; Kaufmann, C.; Maiwald, H.; Abrahamczyk, L. (2014) Seismische Einwirkungen für die neue Generation von Erdbebenbaunormen. Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben 246 40175 im Auftrag des Deutschen Instituts für Bautechnik, Scientific Technical Reports 1. Bauhaus-Universität Weimar.
- [8] Schwarz, J.; Kaufmann, C.; Maiwald, H. (2018) Seismische Einwirkungen für die neue Generation von Erdbebenbaunormen: Gefährdungskonsistente und untergrundspezifische Spektren für die aktualisierte Erdbebenzonenkarte. Überarbeiteter Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben 246 40175 im Auftrag des Deutschen Instituts für Bautechnik, Scientific Technical Reports 1. Bauhaus-Universität Weimar.
- [9] Fehling, E.; Schwarz, J. (2019) Nationales Anwendungsdokument zu EN 1998-1 – Meilensteine der Entwicklung in: Bauingenieur 94, H. 4, D-A-CH-Mitteilungsblatt, S. 2–9.
- [10] Fehling, E.; Schwarz, J. (2021) DIN EN 1998-1/NA-2021 im Kontext der deutschen und europäischen Normenentwicklung. Bautechnik 98, H. 11, S. 815–825.
- [11] Lang, D. H. (2004) Damage potential of seismic ground motion considering local site effects [Dissertation]. scientific technical reports 1, Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden (EDAC). Bauhaus-Universität Weimar.

- [12] Lang, D. H.; Schwarz, J. (2006) Instrumental subsoil classification of Californian strong motion sites based on singlestation measurements in: Eighth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, California, Apr. 18–22, 2006.
- [13] Schwarz, J.; Kaufmann, C.; Lang, D. (2011) Ground motion prediction equations on the basis of instrumentally verified subsoil classes of strong-motion recording sites in: Proceedings of 63rd EERI Annual Meeting. San Diego, Feb. 9–12, 2011.
- [14] Grünthal, G.; Stromeyer, D.; Bosse, C.; Cotton, F.; Bindi, D.
 (2018) Neueinschätzung der Erdbebengefährdung Deutschlands Version 2016 für DIN EN 1998-1/NA in: Bautechnik 95, H. 5, S. 371–384. https://doi.org/10.1002/bate.201700098
- [15] Rodríguez-Marek, A.; Bray, J. D.; Abrahamson, N. A. (2001) An empirical geotechnical seismic site response procedure in: Earthquake Spectra 17, No. 1, pp. 65–87.
- [16] Schwarz, J.; Lang, D. H.; Kaufmann, Ch.; Ende, C. (2007) Empirical ground-motion relations for Californian strongmotion data based on instrumental subsoil classification in: Proceedings of the 9th Canadian Conference on Earthquake Engineering. Ottawa: Canadian Association for earthquake engineering. Ottawa, Sept. 26–29, 2007.
- [17] Schwarz, J.; Lang, D. H.; Golbs, Ch. (1999) Erarbeitung von Spektren für die DIN 4149-neu unter Berücksichtigung der Besonderheiten deutscher Erdbebengebiete und der Periodenlage von Mauerwerksbauten. Scientific Report, Earthquake Damage Analysis Center.
- [18] DIN EN 1998-1 (2010) Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbau. Deutsche Fassung EN 1998-1:2004 + AC:2009. Berlin: Beuth. Ausgabe Dez. 2010.
- [19] Habenberger, J.; Maiwald, H.; Schwarz, J. (2004) Standortanalyse unter Berücksichtigung der Streuung der Bodeneigenschaften. Schriften der Bauhaus-Universität Weimar 116, S. 199–207.
- [20] EPRI (1993) Guidelines for determining design basis ground motions. Electric Power Research Institute, Vol. 1-5, EPRI TR-102293.
- [21] Kamai, R.; Abrahamson, N. A.; Silva, W. J. (2013) Nonlinear Horizontal Site Response for the NGA-West2 Project. Technical Report, PEER Report 2013/12, Pacific Earthquake Engineering Research Center.
- [22] EFEHR (2016) European Facilities for Earthquake Hazard & Risk [online]. SHARE Probabilistic Seismic Hazard Assessment, Uniform Hazard Spectra. http://www.efehr.org:8080/ jetspeed/portal/HazardSpectra.psml [Stand: 17. Okt. 2016]

Autoren

Dr.-Ing. Jochen Schwarz schwarz@uni-weimar.de Bauhaus-Universität Weimar Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden Marienstraße 13 99421 Weimar

Dr.-Ing. Holger Maiwald (Korrespondenzautor) holger.maiwald@uni-weimar.de Bauhaus-Universität Weimar Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden Marienstraße 13 99421 Weimar

- [23] Grünthal, G.; Bosse, C.; Stromeyer, D. (2009) Die neue Generation der probabilistischen seismischen Gefährdungseinschätzung der Bundesrepublik Deutschland. Version 2007 mit Anwendung für die Erdbeben-Lastfälle der DIN 19700: 2004-07 "Stauanlagen". Scientific Technical Report STR09/07. Helmholtz Gemeinschaft.
- [24] Ende, C.; Schwarz, J. (2004) Einfluss von Analysemethoden auf spektrale Abnahmebeziehungen der Bodenbewegung. Schriftenreihe der Bauhaus-Universität Weimar 116: Seismische Gefährdungsberechnung und Einwirkungsbeschreibung. Erdbebenzentrum am Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Weimar, S. 105–115.
- [25] Kaufmann, C.; Schwarz, J. (2011) DIN 4149-konforme spektrale Abnahmebeziehungen für Deutsche Erdbebengebiete in: DGEB [Hrsg.] Proceedings D-A-CH-Tagung 2011: Erdbeben und Baudynamik. 15./16. Sept. 2011, S. 49–60.
- [26] Grünthal, G.; Bosse, Ch. (2015) Daten-Files "Felsspektren für 35 Standorte". Arbeiten zur Neufassung einer Probabilistischen Seismischen Gefährdungskarte für das Territorium der Bundesrepublik Deutschland. Sektion 2.6; GeoForschungsZentrum Potsdam. [Übergeben am: 10. Juli 2015]
- [27] Schnabel, P. B.; Lysmer, J.; Seed, H. B. (1972) SHAKE A computer program for earthquake analysis of horizontally layered sites. Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Report No. EERC 72-12.
- [28] CEN (2017) Eurocode 8: Earthquake resistance design of structures. EN1998-1 NEN SC8 PT1. Working draft. Chapters 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7. Rev 20-00. Oct. 2017. CEN/TC 250/SC 8 N 639. Im DIN geführt unter: NA 005-51-06 AA N 916.
- [29] Fehling, E.; Schwarz, J. (2017) Nationales Anwendungsdokument zu EN 1998-1 – ein Memorandum. DIN-Dokument NA 005-51-06 AA N 934.
- [30] Fehling, E.; Schwarz, J. (2017) EUROCODE 8: Aktuelle Entwicklungen in: Zabel, V.; Beinersdorf. S. [Hrsg.] Vortragsband D-A-CH-Tagung: Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik 2017. DGEB-Publikation 17. Deutsche Gesellschaft für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik (DGEB) e.V., Weimar, 21./22. Sept. 2017.
- [31] CEN (2018) Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. Final Document EN1998-1 NEN SC8 PT1. Chapters 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9. Rev 30-00. April 30th 2018. CEN/TC 250/SC 8 N 706. Im DIN geführt unter: NA 005-51-06 AA N 1038 bzw. NA 005-51 FBR N 1813.
- [32] Schwarz, J. (2018) Background Documents for EN 1998-1 produced by SC8.T1 (Project Team 1): Proposed modifications of Section 3.2.2. Basic representation of the seismic action. May 23, 2018.

Dipl.-Ing. Christian Kaufmann christian.kaufmann@uni-weimar.de Bauhaus-Universität Weimar Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden Marienstraße 13 99421 Weimar

Zitieren Sie diesen Beitrag

Schwarz, J.; Maiwald, H.; Kaufmann, C. (2021) Untergrundspezifische und einwirkungsabhängige Spektren in DIN EN 1998-1/NA-2021. Bautechnik 98, H. 11, S. 838–851. https://doi.org/10.1002/bate.202100069

Dieser Aufsatz wurde in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet. Eingereicht: 23. Juli 2021; angenommen: 10. September 2021.