

# **Erarbeitung eines vereinfachten Nachweisformats für die Erdbebenbemessung von Brückenbauwerken in Deutschland**

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Brücken- und Ingenieurbau Heft B 179**

**bast**

# Erarbeitung eines vereinfachten Nachweisformats für die Erdbebenbemessung von Brückenbauwerken in Deutschland

von

Anna Bauer  
Max Gündel  
Marcus Ries

Wölfel Engineering  
Höchberg

Kilian Karius  
Dominik Honerboom  
Holger Haug

Leonhardt, Andrä und Partner VBI AG Stuttgart

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Brücken- und Ingenieurbau Heft B 179**

**bast**

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

- A - Allgemeines
- B - Brücken- und Ingenieurbau
- F - Fahrzeugtechnik
- M - Mensch und Sicherheit
- S - Straßenbau
- V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** stehen zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.  
<https://bast.opus.hbz-nrw.de>

## **Impressum**

### **Bericht zum Forschungsprojekt 15.0651**

Erarbeitung eines vereinfachten Nachweisformats für die Erdbebenbemessung von Brückenbauwerken in Deutschland

### **Fachbetreuung**

Ralph Holst

### **Referat**

Grundsatzfragen der Bauwerkserhaltung

### **Herausgeber**

Bundesanstalt für Straßenwesen  
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach  
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

### **Redaktion**

Stabsstelle Presse und Kommunikation

### **Druck und Verlag**

Fachverlag NW in der  
Carl Ed. Schünemann KG  
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen  
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53  
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48

[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

ISSN 0943-9293

ISBN 978-3-95606-691-7

Bergisch Gladbach, Juli 2022

## Kurzfassung – Abstract

### Erarbeitung eines vereinfachten Nachweisformats für die Erdbebenbemessung von Brückenbauwerken in Deutschland

Deutschland ist ein Gebiet mit überwiegend niedriger Seismizität. Viele Anforderungen der aktuellen europäischen Erdbebennorm für Brücken DIN EN 1998-2 sind daher für eine sichere Auslegung von Brücken in Deutschland in dieser Art nicht angemessen, sodass deren vollständige Anwendung weder notwendig noch wirtschaftlich ist. In diesem Forschungsvorhaben wurde ein Konzept für eine vereinfachte Erdbebenauslegung für Straßenbrücken in Deutschland entwickelt. Die so ausgelegten Brücken erfüllen bei minimalem Aufwand in der Planungsphase alle notwendigen Anforderungen an Brücken aus DIN EN 1998-2.

Das Konzept ist für die Bemessung von Neubauten gedacht und beinhaltet vier Stufen:

- I. keine Erdbebenauslegung notwendig;
- II. vereinfachte Auslegungsregeln ohne explizite Erdbebenberechnung;
- III. vereinfachte Erdbebenberechnung;
- IV. Erdbebenbemessung nach DIN EN 1998-2 + NA.

Für jede Stufe ist in Abhängigkeit vom Brückentyp und der Überbaulänge eine maximal zulässige Erdbebenintensität definiert. Die Erdbebenintensität wird beschrieben als Produkt aus Bemessungs-Bodenbeschleunigung und Bodenfaktor  $a_g \cdot S$ .

Das Konzept ist ausgearbeitet für ein- und zweifeldrige Plattenbalkenbrücken in Stahlbeton, Spannbeton und Verbundbauweise, für ein- und zweifeldrige Plattenbrücken in Stahlbeton sowie für integrale Rahmenbrücken in Stahlbeton, Spannbeton und Verbundbauweise. Für diese Brückentypen und für verschiedene Parametervariationen wurden numerische Modelle erstellt, diese für gewöhnliche Lasten ausgelegt und anschließend das Tragverhalten unter Erdbeben mittels modalen Antwortspektrenverfahren untersucht. Die Auswertung erfolgte im Hinblick auf die Ausnutzung relevanter Zustandsgrößen unter Erdbeben im Verhältnis zu gewöhnlichen Lasten.

Die Ergebnisse der Untersuchungen wurden in Formulierungsvorschläge für Regelwerke überführt, die den Anwendungsbereich, Anforderungen an die Brückentypen, vereinfachte Auslegungsregeln sowie vereinfachte Berechnungsverfahren für Straßenbrücken in deutschen Erdbebengebieten enthalten.

### Development of a simplified verification format for the seismic design of bridge structures in Germany

Germany is a region with mainly low seismicity. Many requirements in the current European seismic standard for bridges DIN EN 1998-2 are not appropriate in this way for a safe seismic design in Germany; the complete application is neither necessary nor economic. The aim of this research project was to develop a concept for a simplified seismic design of road bridges in Germany. Such designed bridges fulfil all essential requirements of DIN EN 1998-2 with a minimum of effort in the design phase.

The concept is developed for new constructions and includes four levels:

- I. no seismic design is required;
- II. simplified design rules without explicit seismic analysis;
- III. simplified seismic analysis procedure;
- IV. seismic analysis according to DIN EN 1998-2 + NA.

For each level, a maximum allowed seismic intensity is defined depending on the bridge type and the superstructure length. The seismic intensity is described by the product of the design peak ground acceleration and the soil factor  $a_g \cdot S$ .

The concept comprises single and double span T-beam bridges in reinforced and prestressed concrete as well as in composite construction; furthermore single and double span plate bridges in reinforced concrete and integral frame bridges in reinforced and prestressed concrete as well as composite construction are included. For these bridge types and various parameter variations numerical models were developed and designed for

ordinary loads. Afterwards, the seismic behaviour of the bridges were analysed by modal response spectrum analysis. The evaluation of the results was carried out in terms of the utilisation ratio of relevant state variables under seismic loads in relation to ordinary loads.

The results of the study were transferred into text modules for standardisation, which include scope, requirements for several bridge types, simplified seismic design rules and simplified seismic analysis procedure for road bridges in Germany.

## Inhalt

<b>Abkürzungen</b> .....	7	4.6	Weitere geometrische Parameter .....	23
<b>1 Zusammenfassung</b> .....	9	4.7	Zusammenfassung .....	23
<b>2 Aufgabenstellung</b> .....	9	<b>5</b>	<b>Konzept für die vereinfachte Erdbebenauslegung von Straßenbrücken (AP 3)</b> .....	23
<b>3 Analyse vorliegender Regelungen zur Erdbebenbemessung von Brücken (AP 1)</b> .....	10	5.1	Voraussetzungen .....	23
3.1 Allgemeines .....	10	5.2	Bestimmung der Bemessungs-Bodenbeschleunigung .....	24
3.2 Grundlagen zur Erdbebeneinwirkung .....	10	5.3	Grenzwert .....	25
3.2.1 Spektrale Antwortbeschleunigung im Plateaubereich, $S_{ap,R}$ .....	11	5.4	Stufe I: Keine explizite Erdbebenbemessung .....	25
3.2.2 Boden .....	12	5.5	Stufe II: Unter Einhaltung konstruktiver Regeln keine explizite Erdbebenbemessung .....	26
3.2.3 Bedeutungskategorie .....	13	5.6	Stufe III: Vereinfachte Erdbebenbemessung .....	26
3.2.4 Viskose Dämpfung des Bauwerks .....	13	5.7	Stufe IV: Explizite Erdbebenbemessung .....	27
3.3 DIN EN 1998-2:2011 .....	13	<b>6</b>	<b>Verifizierung des Konzepts für die vereinfachte Erdbebenauslegung von Straßenbrücken (AP 4)</b> .....	27
3.4 DIN EN 1998-2/NA:2011 .....	15	6.1	Untersuchte Brückentypen .....	27
3.5 NF EN 1998-2/NA .....	16	6.2	Materialien .....	27
3.6 SIA 261:2014 .....	16	6.2.1	Beton .....	27
3.7 proposed AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design .....	16	6.2.2	Betonstahl .....	27
3.8 NZ SP/M/022 Bridge manual (3rd edition) .....	17	6.2.3	Spannstahl .....	28
3.9 Vorläufige Regeln für Erdbebenbemessung von Brücken des RP Tübingen .....	17	6.2.4	Baustahl .....	28
3.10 Entwurf der TM: 1-2018-10705 I.NPF 2 ....	17	6.3	Belastung .....	28
3.11 Zusammenfassung .....	18	6.3.1	Eigengewicht .....	28
<b>4 Definition von Clustern häufiger Brücken und deren Parametervariationen (AP 2)</b> .	19	6.3.2	Ausbaulasten .....	28
4.1 Einteilung nach Bauwerksarten .....	19	6.3.3	Verkehrslasten .....	28
4.2 Balken- und plattenartige Tragwerke (3.264 Teilbauwerke, 52 %) .....	19	6.3.4	UDL (Flächige Verkehrsbelastung) .....	28
4.3 Rahmenartige Tragwerke (2.669 Teilbauwerke, 42 %) .....	20	6.3.5	TS (Einzellasten aus Verkehr) .....	29
4.4 Bogenartige Tragwerke (368 Teilbauwerke, 6 %) .....	22	6.3.6	Lastfall Anfahren und Bremsen .....	29
4.5 Seismizität .....	22	6.3.7	Temperatur .....	29
		6.3.8	Wind .....	30

6.3.9	Anpralllasten auf Fahrzeugrückhaltesysteme.....	30
6.4	Erdbeben .....	30
6.5	Einwirkungskombinationen sowie Teilsicherheits- und Kombinationsbeiwerte... 31	
6.6	Lagerung.....	32
6.7	Zusammenfassung .....	32
<b>7</b>	<b>Vorschläge für eine vereinfachte Erdbebenauslegung von Straßenbrücken (AP 5).....</b>	<b>33</b>
	<b>Literatur.....</b>	<b>38</b>
	<b>Bilder .....</b>	<b>40</b>
	<b>Tabellen.....</b>	<b>41</b>

Der Anhang zum Bericht ist im elektronischen  
BAST-Archiv ELBA unter:  
<https://bast.opus.hbz-nrw.de> abrufbar.

## Abkürzungen

$A_{Ed}$	Bemessungs-Erdbebeneinwirkung	$\hat{a}_{gR}$	Referenz-Spitzenwert der Bodenbeschleunigung für beliebige Untergrundklasse
CALS	Grenzzustand zur Vermeidung des Einsturzes (Collapse Avoidance Limit State)	q	Verhaltensbeiwert
DCLS	Grenzzustand der Tragfähigkeit (Damage Control Limit State)	$\gamma_{Bd1}$	Zusätzlicher Sicherheitsbeiwert gegen spröde Versagensformen
$L_G$	Entfernung der Widerlager, oberhalb von welcher die Bodenbewegungen als unkorreliert angesehen werden müssen	$\gamma_C$	Teilsicherheitsbeiwert Beton
$L_{lim}$	Länge eines durchgehenden Überbaus, ab der die räumliche Veränderlichkeit der Erdbebeneinwirkung zu berücksichtigen ist	$\gamma_I$	Bedeutungsbeiwert für eine Auslegungsdauer von 50 Jahren
$P_R$	Überschreitungswahrscheinlichkeit	$\eta$	Dämpfungs-Korrekturbeiwert
S	Bodenparameter des elastischen Antwortspektrums	$v_d$	bezogene Längskraft
$S_{ap,R}$	spektrale Antwortbeschleunigung für das Untergrundverhältnis A-R im Plateaubereich	$\xi$	viskoser Dämpfungsgrad (LEHR-sches Dämpfungsmaß)
$S_d(T)$	Spektralbeschleunigung des Bemessungsspektrums	$\psi_{2,i}$	Beiwert für den quasiständigen Wert der veränderlichen Einwirkung i
$S_{D1}$	spektraler Bemessungsantwortbeschleunigungsparameter bei 1 s unter Annahme von 5 % Dämpfung nach [8]		
$S_{DS}$	spektraler Bemessungsantwortbeschleunigungsparameter im Plateaubereich unter Annahme von 5 % Dämpfung nach [8]		
SDC	seismische Bemessungskategorie (Seismic Design Category)		
$T_L$	Nutzungsdauer		
$T_{NCR}$	Referenz-Wiederkehrperiode		
$T_R$	Wiederkehrperiode		
$a_g$	Bemessungswert der Bodenbeschleunigung für Untergrundklasse A-R		
$a_{gR}$	Referenz-Spitzenwert der Bodenbeschleunigung für Untergrundklasse A-R		





## 1 Zusammenfassung

Um eine sichere und vor allem wirtschaftliche Bemessung von Brücken in den deutschen Erdbebengebieten zu ermöglichen, werden vereinfachte Erdbebennachweise für Straßenbrücken entwickelt. Dazu wird in diesem Projekt ein vierstufiges Bemessungskonzept für Straßenbrücken unter Erdbebenwirkung erarbeitet. Die Einteilung der Stufen wird wie folgt festgelegt:

- I. Keine explizite Erdbebenbemessung notwendig
- II. Unter Einhaltung konstruktiver Regeln keine explizite Erdbebenbemessung notwendig
- III. Vereinfachte Erdbebenbemessung möglich
- IV. Erdbebenbemessung nach DIN EN 1998-2 + NA notwendig

Dieser Bericht umfasst (i) eine Analyse vorhandener Regelwerke bezüglich vereinfachter Erdbebenbemessungen von Brücken, (ii) eine Clusterung von Straßenbrücken der Baujahre 2002 bis 2019, (iii) ein Konzept für vereinfachte Erdbebenauslegung von Straßenbrücken, (iv) die Erprobung des Konzepts an vier Brückentypen mit umfangreicher Parametervariation und (v) Ableitung von Textentwürfen für Regelwerke aus den Ergebnissen.

Im ersten Schritt werden nationale und europäische Erdbebennormen sowie internationale Erdbebennormen in Hinblick auf Anforderungen, vereinfachte Bemessungsansätze und konstruktive Regelungen für Brücken analysiert.

Im zweiten Schritt werden Straßenbrücken der Baujahre 2002 bis 2019 gemäß ASB-Ing 2013 [21] nach Bauwerksarten geclustert, um relevante, für die Untersuchungen auszuwählende Brückentypen und Parametervariationen zu identifizieren. Mit dem ausgewählten Untersuchungsumfang werden ca. 80 % des Brückenbestandes in Deutschland abgedeckt. Relevante Brückentypen sind:

- Brücken in offener Rahmenbauweise (1.800 Teilbauwerke)
- Brücken in geschlossener Rahmenbauweise (631 Teilbauwerke)
- Plattenbalkenbrücke (1.566 Teilbauwerke)
- Plattenbrücken (1.186 Teilbauwerke)

Im dritten Schritt wird ein vereinfachtes Konzept für die Erdbebenauslegung von Brücken erarbeitet.

Zuerst werden dazu allgemeine Voraussetzungen definiert. Anschließend werden die Grenzwerte für die Einteilung in die Bemessungsstufen hergeleitet. Ferner werden offene Punkte bei der Einteilung der Bemessungsstufen sowie Ideen für die Festlegung geeigneter Grenzwerte diskutiert.

Im vierten Schritt werden numerische Modelle der Brückentypen im definierten Parameterfeld erstellt und die Grenzwerte für die einzelnen Bemessungsstufen ermittelt. Die Untersuchungen zeigen, dass im Wesentlichen für Lager, Fugen und Gründungen von Rahmenbrücken Betrachtungen bzgl. Erdbeben erforderlich sind. Der Überbau kann in den meisten Fällen bis zu gewissen Erdbebenintensitäten die Erdbebeneinwirkungen ohne weitere Nachweise aufnehmen.

Aufbauend auf den Ergebnissen in Schritt vier werden schließlich Textvorschläge für eine vereinfachte Erdbebenauslegung von Brücken formuliert. Die konstruktiven Regeln werden konkretisiert und bei Bedarf ergänzt. Für die einzelnen Brückentypen werden soweit möglich vereinfachte Verfahren inklusive ihrer Grenzen aufgeführt.

## 2 Aufgabenstellung

Übergeordnetes Ziel des Forschungsvorhabens ist ein Konzept für eine vereinfachte Erdbebenauslegung für Straßenbrücken in Deutschland, um eine wirtschaftliche und sichere Bemessung zu ermöglichen. Deutschland ist ein Gebiet mit überwiegend niedriger Seismizität. Die Arbeiten untergliedern sich in folgende Teilziele:

1. Analyse vorhandener Normen und Regelwerke (AP1);
2. Definition des Anwendungsbereichs und der Anwendungsgrenzen im Hinblick auf Brückentypen und deren Entwurfsparameter (u. a. Spannweite, Neigung, Krümmung, Bedeutungskategorie) (AP 2);
3. Festlegung von maximalen Bemessungs-Bodenbeschleunigungen je Brückentyp, für die keine Erdbebennachweise erforderlich sind (AP 3 + AP 4);
4. Festlegung von maximalen Bemessungs-Bodenbeschleunigungen je Brückentyp, für die unter Einhaltung konstruktiver Regeln keine weite-

ren Erdbebennachweise erforderlich sind und Erarbeitung der dafür erforderlichen konstruktiven Regeln (AP 3 + AP 4);

5. Erarbeitung von vereinfachten Erdbebennachweisen, wenn die Bemessungs-Bodenbeschleunigung die Grenzen nach 2. und 3. überschreitet (AP 3 + AP 4);
6. Erarbeitung von Textbausteinen zur Berücksichtigung der Ergebnisse in Regelwerken (AP 5).

Das Bemessungskonzept soll die Sicherung von Leib und Leben als Ziel haben. Schadensbegrenzung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit stellt kein Bemessungskriterium dar.

### 3 Analyse vorliegender Regelungen zur Erdbebenbemessung von Brücken (AP 1)

#### 3.1 Allgemeines

Im ersten Schritt werden nationale und europäische Erdbebennormen sowie internationale Erdbebennormen zu Brücken im Hinblick auf Anforderungen, vereinfachte Bemessungsansätze und konstruktive Regelungen analysiert. Bei den dabei betrachteten Regelungen handelt es sich im Wesentlichen um:

- DIN EN 1998-2:2011-12, (Europa, [1])
- DIN EN 1998-2/NA: 2011-03 (Nationaler Anhang für Deutschland, [2])
- NF EN 1998-2/NA vom 06. April 2013 (Nationaler Anhang für Frankreich, [6])
- SIA 261:2014 (Schweiz, [7])
- proposed AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design (USA, [8])
- NZ SP/M/022 Bridge manual, 3rd edition (Neuseeland, [10])
- Vorläufige Regeln für Erdbebenbemessung von Brücken des RP Tübingen (2012, [13])
- Entwurf der TM: 1-2018-10705 I.NPF 2 der DB Netz AG (2019, [11])

In den Kapiteln 3.3 bis 3.10 sind die Ergebnisse der Literaturrecherche für die oben genannten Regelungen kurz zusammengefasst. Zuerst wird jedoch ein kurzer Überblick über die Grundlagen der in

Deutschland anzusetzenden Erdbebeneinwirkung gegeben.

#### 3.2 Grundlagen zur Erdbebeneinwirkung

Die Erdbebenbelastung einer Brücke ist abhängig von der Erdbebeneinwirkung vor Ort und dem Strukturverhalten der Brücke.

Brücken, die die seismische Belastung hauptsächlich durch die Pfeiler abtragen, können als Einmassenschwinger approximiert werden, Bild 1. Die Belastung des Systems durch ein Erdbeben entspricht einer Fußpunktbeschleunigung  $a_0(t)$ . Die Antwort des Systems  $a(t)$  ist dabei abhängig von der Dämpfung  $\xi$  und der maßgebenden Eigenperiode  $T_1$ , die sich aus Federsteifigkeit  $k$  und Masse  $m$  ergibt (s. Bild 1).

Im elastischen Antwortspektrum, wie es in der DIN EN 1998-1 verwendet wird, sind die maximalen Systemantworten  $S_e = \max a(t)$  für eine konstante Dämpfung  $\xi = 5\%$  über die Eigenperiode  $T = 2\pi / \sqrt{k/m}$  aufgetragen, Bild 2. Die Trägheitskraft, die als Scheinkraft auf einen Einmassenschwinger mit einer Eigenperiode  $T_1$  wirkt, beträgt somit  $F = m \cdot S_e(T_1)$ .

Das elastische Antwortspektrum beschreibt die Antwort eines Bauwerks  $S_e(T)$ , welches sich bei Belastung durch Erdbeben linear-elastisch verhält. Eine Struktur kann sich unter starken Erdbeben auch nichtlinear verhalten und durch plastische Verformungen Energie dissipieren. In DIN EN 1998-2 wird das seismische Verhalten daher durch die globale Last-Verformungsbeziehung des Bauwerks charakterisiert, Bild 3.

Ein dissipativ bemessenes, duktileres Bauwerk kann eine erheblich höhere Erdbebeneinwirkung aufnehmen.

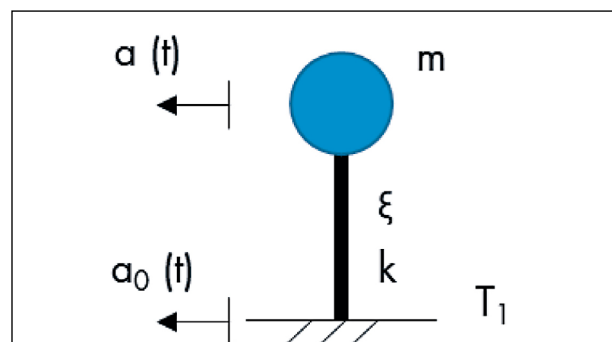


Bild 1: Einmassenschwinger mit Fußpunktanregung

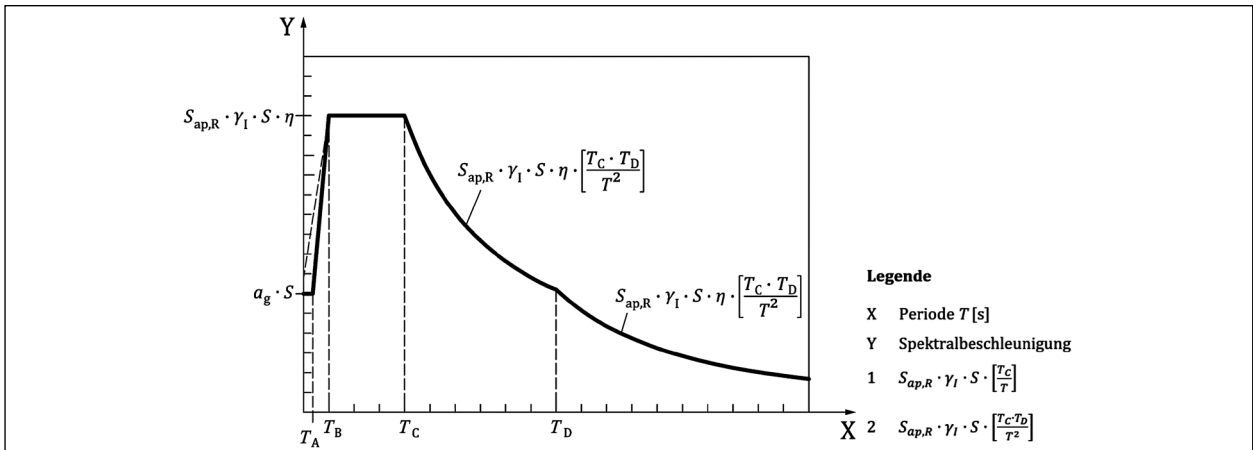


Bild 2: Form und Beschreibung des elastischen Beschleunigung-Antwortspektrums [5]

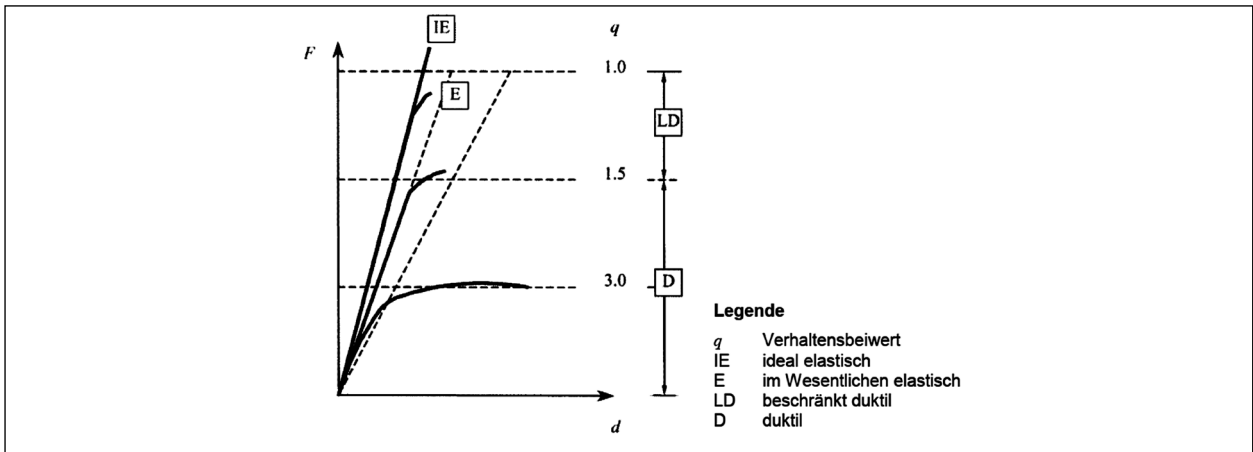


Bild 3: Seismisches Strukturverhalten nach DIN EN 1998-2:2011 [2]

men, als unter der Annahme eines elastischen Bauwerksverhaltens. Der Grund dafür ist, dass die durch das Erdbeben aufgebrachte Energie durch plastische Verformungen in dem Bauwerk dissipiert werden kann. Die Kapazitätsreserve aus einer dissipativen Bemessung wird beim Antwortspektrenverfahren vereinfacht durch den Verhaltensbeiwert  $q$  berücksichtigt, mit dem das elastische Antwortspektrum auf das Bemessungsspektrum reduziert werden darf, Bild 4.

Die Erdbebeneinwirkung wird nach [5] durch ein elastisches Antwortspektrum mit einer Wiederkehrperiode von 475 Jahren beschrieben, Bild 2. Dies entspricht einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von 10 % in 50 Jahren. Im elastischen Antwortspektrum für die Bemessung von Bauwerken werden neben der spektralen Antwortbeschleunigung  $S_{ap,R}$  und den Einflüssen aus Boden (Form des Spektrums durch Definition der Eckperioden und des Bodenparameter  $S$ ) noch die Bedeutung des Bauwerks  $\gamma_1$  und eine gegebenenfalls von 5 % abweichende viskose Dämpfung ( $\eta$ ) berücksichtigt. Diese

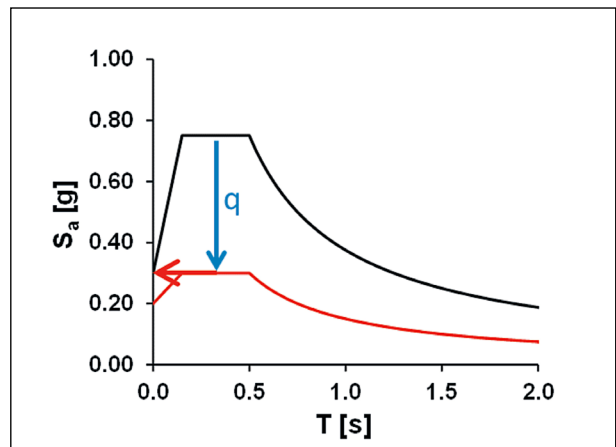


Bild 4: Abminderung eines elastischen Antwortspektrums durch den Verhaltensbeiwert  $q$  (beispielhaft)

Parameter werden in den nachfolgenden Kapiteln erläutert.

### 3.2.1 Spektrale Antwortbeschleunigung im Plateaubereich, $S_{ap,R}$

Die Erdbebeneinwirkung wird für jeden Standort in Deutschland zonenfrei über die Angabe der spektralen Antwortbeschleunigung für das Untergrund-

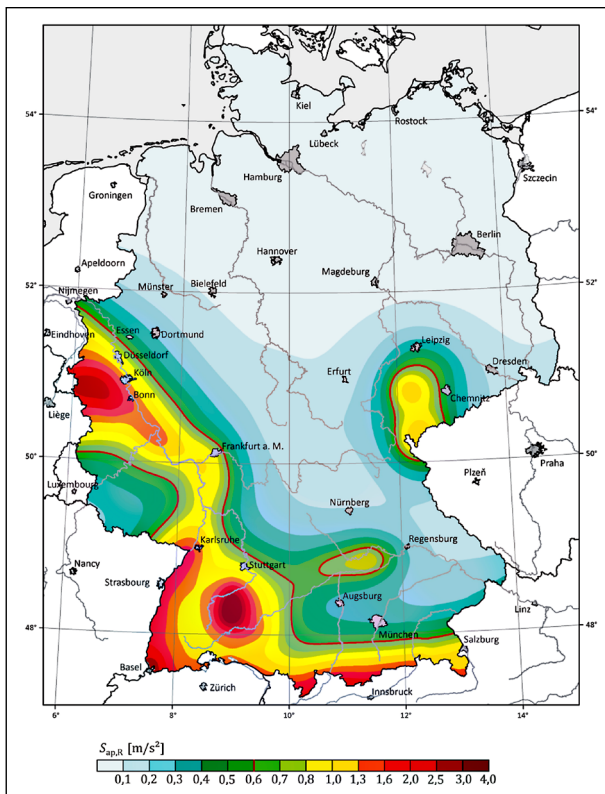


Bild 5: Darstellung der räumlichen Verteilung der spektralen Antwortbeschleunigung für das Untergrundverhältnis A-R im Plateaubereich  $S_{ap,R}$  für eine Wiederkehrperiode  $T_{NCR} = 475$  Jahre aus [5]

verhältnis A-R im Plateaubereich  $S_{ap,R}$  definiert, Bild 5. Dieser Wert entspricht der Antwort eines Einmasseschwingers mit einer Eigenperiode zwischen  $T_B$  und  $T_C$  (ungünstigster Fall) und einer viskosen Dämpfung von 5 %, der am Fußpunkt mit für den Standort charakteristischen Erdbeben erregt wird und dessen Untergrundverhältnisse A-R entsprechen.  $S_{ap,R}$  wird anschaulich als Karte in DIN EN 1998-1/NA dargestellt (Bild 5); die standortgenaue Abfrage des Wertes kann online über die Internetpräsenz des DIBt erfolgen.

### 3.2.2 Boden

Der Boden wird im deutschen Nationalen Anhang in Baugrundklassen (Schichten bis ca. 20 m) und Untergrundklassen (Schichten ab ca. 20 m Tiefe) eingeteilt. Daraus ergibt sich das Untergrundverhältnis.

Auszug aus DIN EN 1998-1/NA:2020 [5], NDP zu 3.1.2(1) Festlegung der Baugrundklassen:

„(i) Der Baugrund wird in Deutschland nach folgenden Baugrundklassen unterschieden:

- Baugrundklasse A: Unverwitterte (bergfrische) Festgesteine mit hoher Festigkeit. Dominieren-

de Scherwellengeschwindigkeiten liegen höher als etwa 800 m/s.

- Baugrundklasse B: Mäßig verwitterte Festgesteine bzw. Festgesteine mit geringerer Festigkeit oder grobkörnige (rollige) bzw. gemischtkörnige Lockergesteine mit hohen Reibungseigenschaften in dichter Lagerung bzw. in fester Konsistenz (z. B. glazial vorbelastete Lockergesteine). Dominierende Scherwellengeschwindigkeiten liegen etwa zwischen 350 m/s und 800 m/s.
- Baugrundklasse C: Stark bis völlig verwitterte Festgesteine oder grobkörnige (rollige) bzw. gemischtkörnige Lockergesteine in mitteldichter Lagerung bzw. in mindestens steifer Konsistenz oder feinkörnige (bindige) Lockergesteine in mindestens steifer Konsistenz. Dominierende Scherwellengeschwindigkeiten liegen etwa zwischen 150 m/s und 350 m/s.

(ii) Wenn sich der Baugrund nicht in die oben gegebenen Baugrundklassen einordnen lässt, insbesondere wenn als Baugrund tiefgründig unverfestigte Ablagerungen in lockerer Lagerung (z. B. lockerer Sand) bzw. in weicher oder breiiger Konsistenz (z. B. Seeton, Schlick) vorhanden sind (dominierende Scherwellengeschwindigkeiten liegen unter 150 m/s), ist der Einfluss der Baugrundverhältnisse auf die Erdbebeneinwirkungen gesondert zu untersuchen und zu berücksichtigen [...].“

Die DIN EN 1998-1/NA:2020 [5] enthält dazu weitere Angaben.

Die Definition der Untergrundklassen ist ebenfalls in der DIN EN 1998-1/NA:2020 [5] zu finden. Die Zuweisung der geologischen Untergrundklassen kann der Karte in DIN EN 1998-1/NA:2020 [5] Anhang NA.G entnommen werden. Es wird angemerkt, dass diese Zuweisung derzeit durch die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) überarbeitet wird, bis auf weiteres aber die Untergrundkarte aus Anhang NA.G verwendet werden kann.

Das Untergrundverhältnis beschreibt über die Eckperioden und den Bodenparameter S die Form des elastischen Antwortspektrums und somit die Erdbebeneinwirkung. In Tabelle 1 sind die Bodenparameter aus der DIN EN 1998-1/NA:2020 [5] den Bodenparametern aus der bisherigen DIN EN 1998-1/NA:2011 [4] vergleichend gegenübergestellt.

Untergrundverhältnis	DIN EN 1998-1/ NA:2011	DIN EN 1998-1/ NA:2020		
	alle $S_{ap,R}$	$0,6 \leq S_{ap,R} \leq 1,0$	$1,0 \leq S_{ap,R} \leq 2,0$	$S_{ap,R} > 2,0$
A-R	1,00	1,00	1,00	1,00
B-R	1,25	1,25	1,20	1,20
C-R	1,5	1,50	1,30	1,15
B-T	1,00	1,05	1,00	1,00
C-T	1,25	1,45	1,25	1,10
B-S	-	1,30	1,15	0,95
C-S	0,75	1,30	1,15	0,95

Tab. 1: Bodenparameter S mit  $S_{ap,R}$  in  $[m/s^2]$

### 3.2.3 Bedeutungskategorie

Entsprechend der Bedeutung eines Bauwerks wird die in der Auslegung anzusetzende Erdbebeneinwirkung über eine Bedeutungsbeiwert  $\gamma_I$  angepasst, um ein adäquates Sicherheitsniveau zu erreichen. Der Bedeutungsbeiwert wird anhand der Bedeutungskategorie gewählt. In DIN EN 1998-2/NA:2011 [2] sind drei Bedeutungskategorien definiert. Die Einstufung einer Brücke in die Bedeutungskategorien ist nur in Abstimmung mit dem Bauherrn und der zuständigen Aufsichtsbehörde zulässig. Folgende Empfehlung findet sich in der Anmerkung:

- Bundesautobahnen, Bundesstraßen, Landstraßen: Bedeutungskategorie II oder III
- Stadt- bzw. Gemeindestraßen, Kreisstraßen: Bedeutungskategorie I oder II oder III
- Gemeindegewege, Wirtschaftswege: Bedeutungskategorie I

In Bedeutungskategorie III sind nach DIN EN 1998-2/NA:2011 [2], Tabelle NA.1 Brücken einzustufen, die von entscheidender Bedeutung für die Aufrechterhaltung der Verkehrsverbindungen besonders in der Zeit unmittelbar nach dem Erdbebenereignis sind und deren Versagen mit einer großen Anzahl mutmaßlicher Todesopfer einhergeht, sowie bei denen eine größere als die übliche Auslegungsdauer verlangt wird.

In Anhang N finden sich weitere Ausführungen zum Bedeutungsbeiwert. Für dieses Projekt wurden die Bedeutungsbeiwerte  $\gamma_I$  nach DIN EN 1998-2/NA:2011 verwendet.

### 3.2.4 Viskose Dämpfung des Bauwerks

Die spektrale Antwortbeschleunigung im Plateaubereich  $S_{ap,R}$  gilt für ein Bauwerk mit einer visko-

sen Dämpfung von  $\xi = 5\%$ . Nach DIN EN 1998-2:2010, Kapitel 4.1.3 (1) darf bei der Verwendung einer Antwortspektrumsberechnung die äquivalente viskose Dämpfung  $\xi$  eines Bauwerks als Funktion des Werkstoffs des Bauteils angenommen werden, in dem der größte Teil der Verformungsenergie während der seismischen Antwort dissipiert wird, wobei es sich üblicherweise um die Pfeiler handeln würde. Für Stahlbeton wird dort als Wert für die äquivalente viskose Dämpfung  $\xi = 5\%$  angegeben. Für andere Baustoffe liegt die Dämpfung zwischen  $\xi = 2$  und  $5\%$ , was zu entsprechend höheren Antwortbeschleunigungen führt. Auf das Bemessungsspektrum (d. h.  $q > 1,0$ ) hat die viskose Dämpfung keinen Einfluss, da die unterschiedlichen Materialdämpfungen im  $q$ -Faktor bereits inkludiert sind.

### 3.3 DIN EN 1998-2:2011

Nach DIN EN 1998-2:2011 [1] erfolgt eine Einteilung der Brücken in Bedeutungskategorien. Diese Bedeutungskategorien entsprechen etwa den Consequence Classes in der DIN EN 1998-1:2010-12 + NA [3], [5]. Eine Einstufung erfolgt in Abhängigkeit der Folgen eines Versagens der Brücke auf menschliches Leben, der Wichtigkeit der Brücke zur Aufrechterhaltung von Verkehrsverbindungen und der wirtschaftlichen Konsequenzen des Zusammenbruchs. Die Definition der Bedeutungskategorien und Bedeutungsfaktoren im deutschen Anwendungsdokument DIN EN 1998-2/NA:2011 [2] werden in Kapitel 3.2.3 erläutert.

Neben den Bedeutungskategorien werden die Brücken auch nach Duktilitätsklassen unterschieden. Die Duktilitätsklassen beschreiben das seismische Verhalten des Bauwerks und werden durch die glo-

bale Kraft-Verformungsbeziehung des Bauwerks charakterisiert. Die Duktilitätsklasse geht über den Verhaltensbeiwert  $q$  in die Erdbebenbemessung ein. Es werden folgende Duktilitätsklassen unterschieden:

- im Wesentlichen linear elastisch:  $q = 1,0$ ;
- beschränkt duktil:  $q \leq 1,5$ ;
- duktil:  $q \leq 3,0$ .

Die Wahl der Duktilitätsklasse ist abhängig von der Seismizität des Gebiets, dem Vorhandensein einer seismischen Isolation und Zwangsbedingungen. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und der Sicherheit wird für Fälle von mittlerer bis hoher Seismizität empfohlen, Brücken für duktilen Verhalten zu bemessen. In Fällen von niedriger Seismizität wird beschränkt duktilen Verhalten als ausreichend erachtet. Dies ist für die hier durchgeführten Arbeiten relevant, da nach DIN EN 1998-2:2011 [1], Abschnitt 2.3.7 vereinfachte Entwurfskriterien für Fälle niedriger Seismizität in den Nationalen Anhängen zugelassen sind. Dabei sollte die Brücke für beschränkt duktilen bzw. im Wesentlichen linear elastischen Verhalten bemessen werden.

Für die Ermittlung der horizontalen Komponente des Erdbebens wird das elastische Antwortspektrum nach EN 1998-1:2004 [3], Abschnitt 3.2.2.2 verwendet. Die vertikale Komponente kann in Fällen von schwacher und mittlerer Seismizität bei der Bemessung der Pfeiler und in der Regel bei der Bemessung des Überbaus vernachlässigt werden. Die Auswirkungen der vertikalen Erdbebenkomponente müssen jedoch bei vorgespannten Betonfahrplatten, Lagern und Verbindungen berücksichtigt werden.

Die Gründung der Pfeiler und Widerlager muss nach den Anforderungen in der DIN EN 1998-5:2004 [23], Abschnitt 5.1 erfolgen. Kritische Bauteile an den Widerlagern sind für elastisches Verhalten ( $q = 1,0$ ) zu bemessen.

Bei der Bemessung der Pfeiler ist die Bodenbauwerkswechselwirkung nur dann zu berücksichtigen, wenn die Nachgiebigkeit des Bodens mehr als 20 % zur Gesamtverformung am oberen Ende des Pfeilers beiträgt. Torsionseffekte müssen nur bei schrägen ( $\varphi > 20^\circ$ ) oder bei gedungen Brücken ( $B/L > 2,0$ ) berücksichtigt werden. Folgende Berechnungsmethoden sind in der DIN EN 1998-2:2011 [1] zulässig:

- Vereinfachtes Antwortspektrenverfahren;
- Lineare dynamische Berechnung – Modale Antwortspektrumsmethode;
- Lineare Zeitverlaufsberechnung;
- Nicht-lineare dynamische Zeitverlaufsberechnung;
- Statisch nicht-lineare Berechnung (Pushover-Berechnung).

Aufwand  
Genauigkeit

Das vereinfachte Antwortspektrenverfahren ist nur für Brücken zulässig, deren dynamisches Verhalten ausreichend genau durch einen Einmasseschwinger beschreibbar ist. Dies gilt als gegeben, wenn die Brücke (a) in Längsrichtung annähernd gerade ist, eine durchgehende Fahrbahnplatte aufweist und die seismischen Kräfte von Pfeilern aufgenommen werden, deren Gesamtmasse weniger als 20 % der Überbaumasse beträgt, (b) in Querrichtung von Fall (a), wenn das statische System annähernd symmetrisch um den Mittelpunkt der Fahrbahnplatte ist, (c) im Fall von Pfeilern, die einen Einzelbalken tragen, falls keine bedeutsame Interaktion zwischen den Pfeilern erwartet wird und die Gesamtmasse jedes Pfeilers weniger als 20 % der anteiligen Überbaumasse beträgt.

Da die Ausbildung plastischer Gelenke im Überbau nicht zulässig ist, müssen für den Überbau keine zusätzlichen Konstruktionsregeln außer denen für den Entwurf von Brücken für nicht-seismische Einwirkungen berücksichtigt werden. Ähnliches gilt für Flachgründungen.

Unabhängig von der Duktilitätsklasse ist der Nachweis der Schubtragfähigkeit von Betonbauteilen unter Verwendung der Zustandsgröße  $q \cdot A_{Ed}$  (elastisches Verhalten) und einem zusätzlichen Sicherheitsbeiwert von  $\gamma_{Bd1} = 1,25$  gegen Sprödversagen auf die Tragfähigkeitswerte  $V_{Rd,c}$ ,  $V_{Rd,s}$  und  $V_{Rd,max}$  zu führen.

In DIN EN 1998-2:2011 [1], Abschnitt 6 sind in Fällen niedriger Seismizität keine gesonderten Nachweise der Duktilität an kritischen Querschnitten bei Bauwerken mit beschränkt duktilen Verhalten notwendig. Ein Nachweis zur Vermeidung von Sprödbruch besonderer nicht-duktiler Bauteile ist zu erbringen, sofern nicht gezeigt wird, dass die Standicherheit von solchen Versagensformen nicht beeinflusst wird.

### 3.4 DIN EN 1998-2/NA:2011

Die DIN EN 1998-2/NA:2011 [2] enthält die national festgelegten Parameter für die Erdbebenbemessung von Brücken in Deutschland, ist aber noch nicht bauaufsichtlich eingeführt. Zu beachten ist, dass diese Norm noch auf den alten Nationalen Anhang DIN EN 1998-1/NA:2011 verweist und daher aktuell analog zu DIN EN 1998-1/NA:2020 überarbeitet wird. Dort ist festgelegt, dass Deutschland unabhängig von Brückenbedeutungskategorie und Bodenklasse als Gebiet mit geringer Seismizität einzustufen ist. Eine Erdbebenbemessung für Brücken in Erdbebenzone 0 nach DIN EN 1998-1/NA:2011 [4] ( $\triangleq a_{gR} < 0,4 \text{ m/s}^2 \triangleq S_{ap,R} < 1,00 \text{ m/s}^2$ ) ist nicht erforderlich. Auch Brücken der Bedeutungskategorie I (z. B. Gemeinde- und Wirtschaftswege) müssen nicht für den Lastfall Erdbeben bemessen werden.

Im Anhang NA.A findet sich ein vereinfachtes Verfahren für die Erdbebenbemessung von Brücken. Dieses Verfahren darf nur auf Brücken angewendet werden, bei denen (a) keine besonderen Risiken bzgl. Grundbruch, Hangrutschung und Setzung infolge Bodenverflüssigung oder -verdichtung bei Erdbeben vorliegen, (b) keine tiefgründigen Ablagerungen in lockerer Lagerung oder in weicher oder breiiger Konsistenz vorhanden sind, (c) ein einheitlicher Bodentyp unter allen Auflagern des Brückenüberbaus vorhanden ist, (d) die Anforderungen für das vereinfachte Verfahren in der DIN EN 1998-2:2011 [1] (dynamisches Verhalten entspricht annähernd dem eines Einmasseschwingers) eingehalten sind und (e) die Länge des durchgehenden Überbaus den Grenzwert  $L_{lim}$  in Tabelle NA.A.1 nicht überschreitet (z. B. 270 m für Baugrundklasse C). Unter Einhaltung der Bedingungen (a) bis (e) darf die Antwort der Brücke in der Längs- und Querrichtung an zwei getrennten, ebenen Modellen erfolgen.

In Längsrichtung wird die Anregung aus Erdbeben über eine horizontale Ersatzlast am Überbau der Brücke angesetzt. Dabei wird eine verschiebliche Lagerung am Widerlager vorausgesetzt. Bei einer starren Lagerung der Brücke am Widerlager muss die Beanspruchung aus dem Erdbeben unter Berücksichtigung der Bodensteifigkeiten über die modale Antwortspektrummethode ermittelt werden. Dabei ist jedoch nur die Grundeigenform zu berücksichtigen.

In Querrichtung kann die Belastung aus der Erdbebenanregung über ein Balkenmodell mit ausrei-

chender Anzahl an konzentrierten Massen ermittelt werden. Die Anzahl an konzentrierten Massen muss dabei iterativ bestimmt werden, bis eine weitere Unterteilung der Masse keine nennenswerten Änderungen an der Eigenperiode  $T$  und an der seismischen Beanspruchungsgröße  $F_i$  ergibt. Bei der Anregung in Querrichtung ist eine Torsionswirkung um die vertikale Achse nach DIN EN 1998-2/NA:2011 [2], Abschnitt NA.A.4 zu berücksichtigen.

Die an den ebenen Modellen ermittelten Beanspruchungen müssen für die Bemessung der Brücke wie folgt kombiniert werden. Dabei steht  $E_{Ed,X}$  für die Beanspruchungsgröße infolge des Angriffs der Erdbebeneinwirkung in Längsrichtung und  $E_{Ed,Y}$  für die Beanspruchungsgröße infolge des Angriffs der Erdbebeneinwirkung in Querrichtung.

a)  $E_{Ed,X} \text{ „+“ } 0,30 E_{Ed,Y}$

b)  $0,3 E_{Ed,X} \text{ „+“ } E_{Ed,Y}$

Die vereinfachten Entwurfskriterien entsprechen einer Auslegung der Brücke für beschränkt duktilen Verhalten ( $q \leq 1,5$ ). Die Konstruktionsregeln, die in der DIN EN 1998-2:2011 [1] für beschränkt duktilen Verhalten gefordert werden, müssen daher eingehalten werden. Die vertikale Komponente des Erdbebens darf vernachlässigt werden, wenn ein Abheben des Überbaus vermieden wird. Dies gilt als gegeben, wenn die abhebende Auflagerkraft aus dem Erdbeben geringer als 50 % der Auflagerkraft aus Eigengewicht ist.

Für die Auslegung von Fugen und der Mindestauflagerlänge sind Formeln zur Ermittlung der zu berücksichtigenden Relativverschiebung angegeben.

Der Nachweis der Gründung muss mit der Zustandsgröße  $q \cdot A_{Ed}$  (elastisches Verhalten) nachgewiesen werden. Die auf die Widerlager und Lager zu berücksichtigenden Einwirkungen werden in NA.A.7 und NA.A.8 vorgegeben.

Für Betonbauteile werden zusätzliche Regeln festgesetzt. So darf die bezogene Normalkraft  $v_d = N_{Sd} / (A_c f_{cd})$  in den Pfeilern den Wert 0,6 nicht überschreiten. Des Weiteren wird neben der Verwendung von hochduktilen Stahl (Typ B) die Verwendung der Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_C = 1,5$  und  $\gamma_S = 1,15$  gefordert, um einen möglichen Festigkeitsabfall infolge einer Schädigung durch zyklische Verformung sowie die Minderung der Tragfähigkeit infolge von Abplatzen der Betondeckung im kritischen Bereich zu berücksichtigen. Im Gegensatz zur DIN EN



1998-2:2011 [1] muss beim Schubnachweis der Verhaltensbeiwert  $q$  mindestens 1,25 für die Zustandsgröße  $q \cdot A_{Ed}$  betragen. Außerdem ist in der Druckzone eine Umschnürungsbewehrung vorzusehen, wenn  $M_{Rd} / M_{Ed}$  kleiner 1,30 ist. Dies entspricht einer Ausnutzung von ca. 0,77.

### 3.5 NF EN 1998-2/NA

In Frankreich regelt die DIN EN 1998-2:2011 [1] mit dem Nationalen Anhang NF EN 1998-2/NA [6] die Erdbebenauslegung von Brücken. Zusätzliche Informationen zu den anzusetzenden Erdbebeneinwirkungen liefert außerdem die Internetseite des Plan Séisme [15]. Dort sind auch die Erdbebenzonen definiert. Im Gegensatz zur DIN EN 1998-1/NA:2011 [4] ist bei einem Referenz-Spitzenwert der Bodenbeschleunigung  $a_{gr} = 0,4 \text{ m/s}^2$  noch kein Erdbebennachweis erforderlich. Die Einteilung der Brücken erfolgt in 4 Bedeutungskategorien. Die Bedeutungskategorien I und II des Plan Séisme [15] entsprechen ungefähr der Bedeutungskategorie I der DIN EN 1998-2/NA:2011 [2].

Für Brücken der Bedeutungskategorie I und II mit einer nutzbaren Oberfläche kleiner  $150 \text{ m}^2$  ist ein vereinfachtes Bemessungsverfahren zulässig, wenn der Wert  $a_g \cdot S \leq 0,15 \text{ g}$  ist. Unter diesen Voraussetzungen kann eine gleichförmige horizontale Beschleunigung von  $a_g \cdot S$  als Erdbebenbelastung angesetzt werden. Die in der DIN EN 1998-2/2011 geforderten Konstruktionsregeln für beschränkt duktilen Verhalten sind einzuhalten.

### 3.6 SIA 261:2014

In der SIA 261:2014 [7] wird generell zwischen einem duktilen und einem nicht duktilen Tragverhalten unterschieden. Die entsprechende Bemessung und bauliche Durchbildungen sollen dabei nach den Bestimmungen in der SIA 262 bis SIA 267 erfolgen.

Grundsätzlich werden linear elastische Bemessungsmodelle angesetzt. Die Ermittlung der Erdbebeneinwirkung kann dabei mit dem Ersatzkraftverfahren oder dem Antwortspektrenverfahren erfolgen. Zusätzliche vereinfachte Verfahren finden sich nicht.

Jedoch finden sich Vorgaben zur Mindestauflagerlänge sowie konstruktive Vorgaben in SIA 261:2014

[7], Tabelle 26 in Abhängigkeit der Bauwerksklasse und der Erdbebenzone.

### 3.7 proposed AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design

In [8] werden die Brücken in vier seismische Bemessungskategorien (Seismic Design Categories – SDC) eingeteilt, für die eine unterschiedlich detaillierte Bemessung durchgeführt werden muss. Die Einstufung der Brücken in die SDC A bis SDC D erfolgt über die spektrale Antwortbeschleunigung bei  $1 \text{ s } S_{D1}$ . Da sowohl für die SDC C und die SDC D eine Kapazitätsbemessung erforderlich ist, wird hier nicht näher auf diese Bemessungskategorien eingegangen.

Bis zu einem Grenzwert von  $S_{D1} < 1,5 \text{ m/s}^2$  können Brücken in die SDC A eingestuft werden. In der SDC A ist keine explizite Erdbebenbemessung notwendig. Die Einhaltung von Mindestanforderungen, die sich auf minimale Auflagerlängen in beide horizontale Richtungen und minimale Auflagerkräfte beschränken, wird als ausreichend erachtet. Wenn der spektrale Bemessungsantwortbeschleunigungsparameter im Plateaubereich  $S_{DS}$  kleiner als  $1,25 \text{ m/s}^2$  ist, muss die horizontale Bemessungsaullagerlast mindestens 0,15-mal die vertikalen Auflagerlasten aus den ständigen Lasten betragen. Ist  $S_{DS}$  gleich oder größer  $1,25 \text{ m/s}^2$ , ist die horizontale Bemessungsaullagerlast mindestens mit 0,25-mal der vertikalen Auflagerlasten aus den ständigen und veränderlichen Lasten, die während eines Erdbebens auftreten können, anzusetzen. Die minimale Auflagerlänge wird nach [8], Artikel 4.12 ermittelt.

Unabhängig von der Einstufung in die SDC müssen für Einfeldbrücken mit starrem Überbau nur die Anforderungen der SDC A eingehalten werden.

Liegt  $S_{D1}$  zwischen  $1,5 \text{ m/s}^2$  und  $3,0 \text{ m/s}^2$  wird die Brücke in SDC B eingestuft werden. Dabei wird ein beschränkt duktilen Strukturverhalten angesetzt. Der Nachweis der Biegekapazität der Stützen ist dabei unter nicht seismischen Lasten ausreichend. Es ist jedoch die Verformung der dem Erdbeben widerstehenden Bauteile  $\Delta_D$  zu ermitteln. Diese Verformung  $\Delta_D$  muss kleiner sein als die indirekt über Formeln ermittelte Verformungskapazität  $\Delta_C$ . Wenn dies nicht der Fall ist, muss die Brücke in der SDC C nachgewiesen werden. Ist  $\Delta_D < \Delta_C$ , kann eine vereinfachte Bemessung durchgeführt werden. Je-

doch ist die Schubtragfähigkeit der Stützen über eine Kapazitätsbemessung nachzuweisen.

### 3.8 NZ SP/M/022 Bridge manual (3rd edition)

Nach NZ SP/M/022 [10] müssen zwei Grenzzustände nachgewiesen werden: Der Grenzzustand der Tragfähigkeit (Damage Control Limit State, DCLS) und der Grenzzustand zur Vermeidung des Einsturzes (Collapse Avoidance Limit State, CALS). Als Bemessungsverfahren sind sowohl verformungsbasierte als auch lastbasierte Verfahren zulässig.

Für die verformungsbasierte Bemessungsmethode ist ein vereinfachtes Verfahren möglich. Dabei wird in einem ersten Schritt die Standortseismizität in Bezug auf das elastische Bemessungs-Verschiebungsspektrum bestimmt. Anschließend wird die Verschiebungskapazität  $\Delta_y$  aller Stützen ermittelt, bei der sich die Stützen gerade noch elastisch verhalten (yield displacement). Ist diese Verschiebungskapazität  $\Delta_y$  größer als der Bemessungswert der Verschiebungsanforderung des elastischen Bemessungsspektrums an den Kontrollperioden  $\Delta(T)$ , kann die Bemessung nach dem Vorgehen für Strukturen mit elastischem Verhalten durchgeführt werden. Zusätzlich müssen jedoch die Anforderungen an die Festigkeit, Duktilität und die Stabilität während des CALS-Ereignisses erfüllt werden. Die Kontrollperiode  $T$  ist standortabhängig und beträgt entweder 3 s, 5 s oder 10 s.

Ist die Verschiebungskapazität  $\Delta_y$  kleiner als  $\Delta(T)$ , muss die Grundeigenform in die betrachtete Richtung ermittelt werden. Anschließend wird die Verschiebungskapazität  $\Delta_y$  mit dem Bemessungswert der Verschiebungsanforderung des elastischen Bemessungsspektrums an der Grundeigenperiode  $\Delta(T_F)$  verglichen. Ist diese Bedingung eingehalten, kann eine Standardbemessung durchgeführt werden, solange während des CALS-Ereignisses die Anforderungen an die Festigkeit und Stabilität eingehalten werden. Wenn  $\Delta_y$  kleiner als  $\Delta(T_F)$  ist, muss eine verformungsbasierte Erdbebenbemessung durchgeführt werden, um die laterale Festigkeit der Stützen und Widerlager zu bestimmen.

Die Übertragung der Ansätze dieser Norm für ein vereinfachtes Bemessungskonzept in Deutschland ist nur bedingt sinnvoll, da es sich bei Neuseeland um ein Gebiet mit hoher bis sehr hoher Seismizität handelt.

### 3.9 Vorläufige Regeln für Erdbebenbemessung von Brücken des RP Tübingen

Diese vorläufigen Regeln [13] wurden vor der bauaufsichtlichen Einführung der DIN 1998-2 erstellt, um die Erdbebenbemessung von Brücken zu regeln. Sie beruhen auf der DIN 4149:2005 [24].

Die Wahl des Berechnungsverfahrens ist in Abhängigkeit vom Brückentyp zu bestimmen. Als Berechnungsverfahren sind das vereinfachte Antwortspektrenverfahren und das modale Antwortspektrenverfahren aufgeführt. Die Bemessung erfolgt für Duktilitätsklasse 1 (elastisches Verhalten) mit Ausnahme von Brücken über 500 m Länge und Erdbebenzone 2, welche in Duktilitätsklasse 2 (plastisches Verhalten) einzustufen sind.

Für die Erdbebenbemessung nach der Regelung des RP Tübingen ist zuerst die Ordinate  $S_d(T)$  zu ermitteln. Unter Berücksichtigung der Massen wird der Bemessungswert der horizontalen Einwirkungen aus Erdbeben  $A_{Ed} = S_d(T) \cdot M$  auf die Stützungen verteilt. Mit den daraus resultierenden Schnittgrößen erfolgt die Bemessung der Unterbauten und der Bauteile wie Lager und Übergangskonstruktionen. Der Erddruck und der Tragfähigkeitsnachweis der Gründung sind nach DIN 4149:2005 [24], Abschnitt 12 zu berücksichtigen. Die Verwendung von hochduktilen Baustahl der Klasse B ist in den Erdbebenzonen 0 bis 3 vorgeschrieben. Die Verankerung der Bügel in den Stützen und Pfeilern muss über Haken erfolgen. Die Horizontalkräfte in den Lagern sollen über Dollen oder Schrauben abgetragen werden. Die Fahrbahnübergänge bei Brücken mit Festpunkten auf den Stützen sind für die Verformungen aus der Auslenkung der Stützenköpfe zu bemessen.

### 3.10 Entwurf der TM: 1-2018-10705 I.NPF 2

Dieses Mitteilungsblatt der Bahn [11] behandelt hauptsächlich Rahmenbrücken für Eisenbahnbrücken und ist als Ergänzung bzw. Konkretisierung der DIN EN 1998 + NA zu verstehen.

In dem Dokument ist der Bedeutungsbeiwert über die Netzzugehörigkeit und die Nutzungshäufigkeit festgelegt. Des Weiteren sind Erläuterungen zu den anzusetzenden Lastfällen und deren Kombination mit der Erdbebeneinwirkung beschrieben. Als Be-

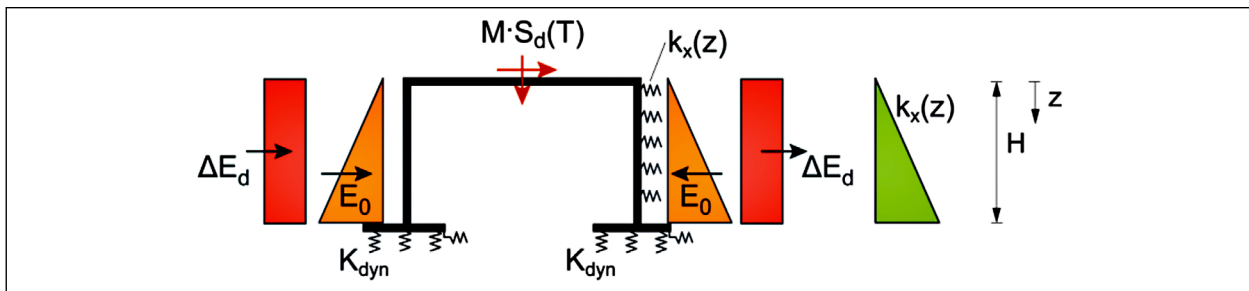


Bild 6: Statischer Erddruck  $E_0$ , seismische (dynamische) Erddrücke  $\Delta E_d$  und Bettungsfeder  $k_x(z)$  für Rahmenbrücken [11]

rechnungsmethode wird das modale Antwortspektrenverfahren festgelegt. Dabei müssen sowohl die horizontale als auch die vertikale Komponente des Erdbebens berücksichtigt werden. Die Gründung darf über Federn berücksichtigt werden, deren Steifigkeit durch Ansatz geeigneter dynamische Bodenkennwerte bestimmt wird.

Da die Einflüsse des Erddrucks bei der Bemessung der Widerlager einer Rahmenbrücke eine entscheidende Rolle spielen, wird ein seismischer, pseudo-statischer Beanspruchungszustand für die Einwirkung aus Erddruck in Brückenlängsrichtung aufgezeigt. Dabei wird neben den statischen Erddrücken  $E_0$  auf beide Widerlager, die auf die Masse der Struktur wirkenden Trägheitskräfte, zusätzliche seismische (dynamische) Erddrücke  $\Delta E_d$  nach DIN EN 1998-5 [23], die antimetrisch wirkend angesetzt werden, sowie die Bettungsfeder  $k_x(z)$  auf der Widerstandsseite berücksichtigt (s. [11], Bild 1b).

Zusätzlich zum Nachweis der Tragfähigkeit des massiven Rahmens und des Widerlagers sind die Gründung sowie die Einzelfundamente nach DIN EN 1998-2 und DIN EN 1998-5 nachzuweisen. Für Flachfundamente sind die Nachweise gegen Gleiten und Grundbruch im Regelfall erfüllt. Die seismische Bemessungsverschiebung in der Hinterfüllung darf den Grenzwert  $d_{lim}$  nicht überschreiten.

Nach [11] ist eine gesonderte Auslegung von Rahmenbauwerken gegen Erdbebenbeanspruchung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit nicht erforderlich. Für die bauliche Durchbildung müssen die Regeln für die Bauteile von Bauwerken mit beschränkt-duktilen Verhalten nach DIN EN 1998-2 eingehalten werden.

In [11], Tabelle 1 (s. Anhang G) sind Randbedingungen für den Entfall einer Erdbebenbemessung bei einfeldrigen Rahmen gegeben.

### 3.11 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden bestehende Regelwerke im Hinblick auf Anforderungen, Ansätze für vereinfachte Erdbebennachweise und konstruktive Regelungen für Brücken analysiert.

Die DIN EN 1998-2/NA:2011 enthält für Brücken, deren dynamisches Verhalten ausreichend genau durch einen Einmasseschwinger beschrieben werden kann, vereinfachte Bemessungsansätze, die für das in Kapitel 5 vorgestellte Konzept verwendet werden können.

In der Bahnrichtlinie [11] findet sich für Brücken in offener Rahmenbauweise ein Kriterienkatalog, bei dessen Einhaltung kein expliziter Erdbebennachweis der Brücke notwendig ist. Außerdem ist ein seismischer, pseudo-statischer Beanspruchungszustand für die Einwirkung aus Erddruck in Brückenlängsrichtung erläutert.

In der SIA 261:2014 ist zwar kein vereinfachtes Verfahren aufgeführt, jedoch enthält diese Norm einige geeignete konstruktive Regelungen wie z. B. für eine minimale Auflagerlänge.

Im US-Regelwerk [8] werden Brücken in Bemessungskategorien eingeteilt. Für die Bemessungskategorien SDC A und SDC B sind vereinfachte Bemessungen zulässig. Diese beiden Bemessungskategorien entsprechen in etwa den Bemessungsstufen II und III. Für die Anwendung in Deutschland müssen die Ansätze und konstruktiven Regelungen entsprechend angepasst werden.

Die verbleibenden Regelungen enthalten keine für die durchzuführenden Arbeiten geeigneten Ansätze und werden daher nicht weiter berücksichtigt.

## 4 Definition von Clustern häufiger Brücken und deren Parametervariationen (AP 2)

### 4.1 Einteilung nach Bauwerksarten

Im weiteren Verlauf des Forschungsprojektes soll anhand numerischer Modelle für relevante Brückentypen und Parametervariationen das Erdbebenverhalten untersucht werden. Um möglichst viele Brücken durch die zu untersuchenden Modelle abzudecken, ist es notwendig, die Verteilung von Brückenneubauten in Deutschland hinsichtlich ihres Brückentyps (Tragwerk, Baustoff) und relevanter Parameter (z. B. Spannweite) zu analysieren.

Zu diesem Zweck wurde der Projektgruppe eine Datenbank aller Brücken der Bundesfernstraßen der Baujahre 2002 bis 2019 zur Verfügung gestellt. Der Auszug aus dem Datenbestand der BAST umfasst 6.318 Teilbauwerke aus Baustahl, Spannbeton, Stahlbeton und in Verbundbauweise der Brückenklasse LM1 nach DIN Fachbericht oder größer.

In einem ersten Schritt wird die Datenbank [27] nach Bauwerksarten gemäß ASB-Ing 2013 [21] Anhang D7 Artikel 1.1 geclustert. Das Ergebnis dieser Sortierung stellt sich wie in Bild 7 dar:

Demnach repräsentieren die Tragwerksarten

- balken- und plattenartige Tragwerke,
- rahmenartige Tragwerke und
- bogenartige Tragwerke

mit insgesamt 6.301 Teilbauwerken nahezu 100 % des Datenbestandes. Somit kann sich die weitere Untergliederung in den nachfolgenden Kapiteln auf diese drei Tragwerksarten beschränken.

### 4.2 Balken- und plattenartige Tragwerke (3.264 Teilbauwerke, 52 %)

Nach Kapitel 4.1 sind balken- und plattenartige Tragwerke mit 3.264 Teilbauwerken im Betrachtungszeitraum die häufigste Bauwerksart aller Brückenneubauten der Brückenklasse LM1 oder größer. Gemäß ASB-Ing 2013 [21] Anhang D7 Artikel 1.1.1 untergliedern sich balken- und plattenartige Tragwerke in fünf Untertypen (hier Querschnittstypen).

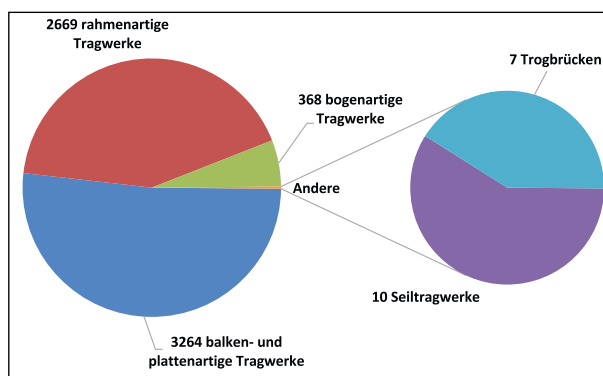


Bild 7: Tragwerksarten von Brücken in Deutschland gebaut 2002 bis 2019

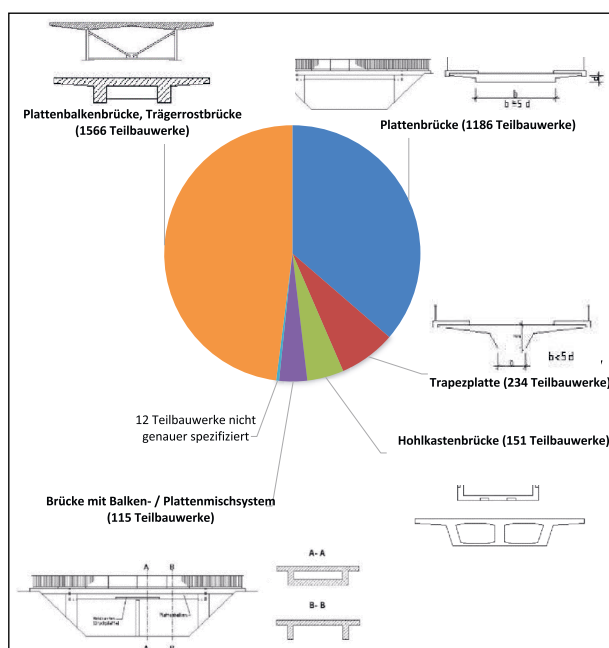


Bild 8: Balken- und plattenartige Tragwerke, Querschnittstypen

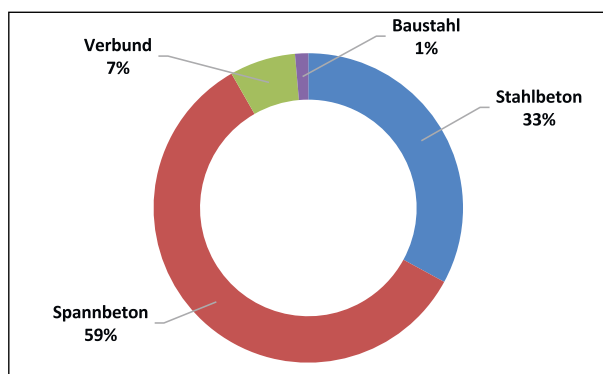


Bild 9: Balken- und plattenartige Tragwerke, Material des Überbaus

Die Sortierung nach diesen fünf Untertypen ist in Bild 8 dargestellt.

Die Plattenbalkenbrücke und die Plattenbrücke stellen gemeinsam 84 % aller balken- und plattenartigen Tragwerke.

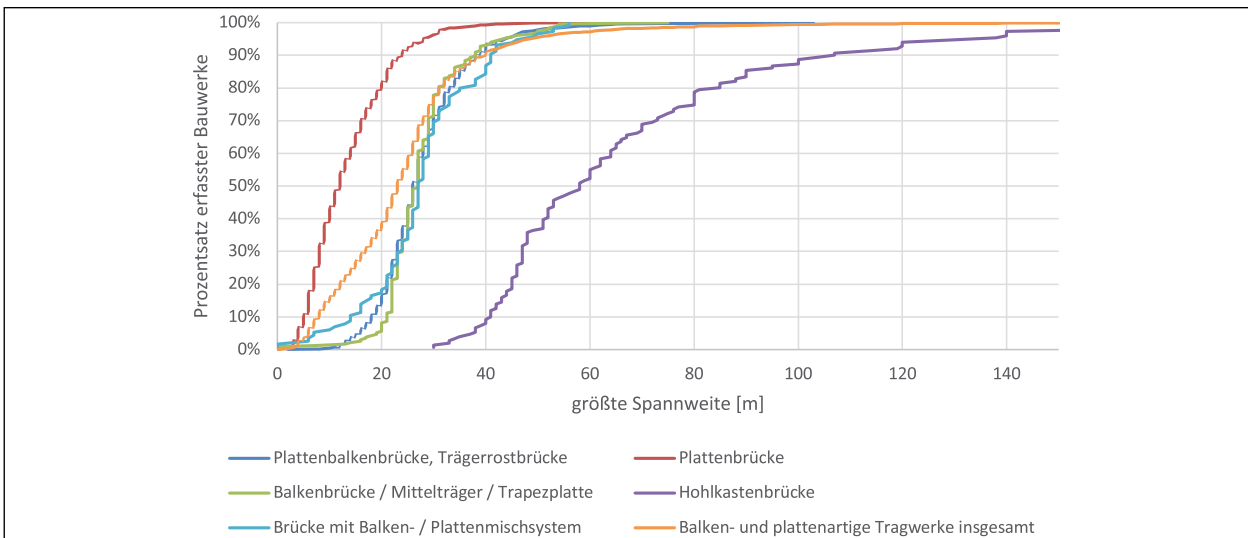


Bild 10: Balken- und plattenartige Tragwerke, Verteilung der Spannweiten

Statisches System in Längsrichtung	Anzahl
2-gelenkig mit Zug- oder Druckriegel, Sohlplatte biegesteif angeschl.	2
2-gelenkig mit Zug-/Druckriegel, Stabbogen/Zugb. übern. Fahrbahnlasten	0
Balkenartige und plattenartige Tragwerke	84
Besondere Stützbedingungen	2
Dreigelenkiger Rahmen und Bogensystem ohne Zug- oder Druckriegel	0
<b>Einfeldrig freiaufliegend</b>	<b>1.439</b>
Einfeldrig freiaufliegend, unterspannt	32
In sich verankerte Hängebrücke	0
Keine Angabe erforderlich	0
Mehrf. freiaufll. ohne Durchlaufwirkung, durchl. Ort-betonplatte	97
Mehrfeldrig freiaufliegend ohne Durchlaufwirkung	32
<b>Mehrfeldrig mit Durchlaufwirkung</b>	<b>1.446</b>
Mehrfeldrig mit Durchlaufwirkung, unterspannt	19
Rahmen und Bogensystem, dreigelenkig	0
Rahmen und Bogensystem, eingelenkig	4
Rahmen und Bogensystem, zweigelenkig	24
Rahmen und Bogensysteme	27
Rahmen/Bogen, Besondere Lagerbedingungen	3
Rahmen/Bogen, interaktiv mit Auffüllung tragend (HAMCO, BEBO)	0
Rahmen/Bogen, Stabbogen/Zugband übern. Fahr-bahnlasten	0
Rahmen/Bogen, StiefüÙe oder Kämpfer gelenkig	0
Rahmen/Bogen, StiefüÙe und/oder Kämpfer einge-spannt	26
Schrägseilbrücke, Hauptfeld beidseitig abgespannt	0
Schrägseilbrücke, Hauptfeld einseitig abgespannt	0
Sonstiges System	3
Unregelmäßig gestützt	3
Vollrahmen, StiefüÙe und/oder Kämpfer einge-spannt	15
Zweigelenkiges Rahmen und Bogensystem mit Zug-oder Druckriegel	0
Zweigelenkiges Rahmen und Bogensystem ohne Zug- oder Druckriegel	6

Tab. 2: Balken- und plattenartige Tragwerke, statisches System im Längsrichtung

Eine Clusterung der balken- und plattenartigen Tragwerke nach Material des Überbaus zeigt, dass 92 % aller Bauwerke aus Spannbeton oder Stahlbeton bestehen und 7 % in Verbundbauweise errichtet sind, Bild 9.

Eine genauere Betrachtung zeigt, dass Plattenbalkenbrücken zumeist aus Spannbeton bestehen, während Plattenbrücken überwiegend aus Stahlbeton bestehen. Spannbeton beschränkt sich hierbei jedoch in vielen Fällen auf Spannbetonfertigteile mit Ortbetonergänzung.

Etwa 90 % aller balken- und plattenartigen Tragwerke weisen eine maximale Spannweite von 40 m auf. Eine Ausnahme bilden die Hohlkastenbrücken, die für größere Spannweiten gewählt werden. Diese stellen jedoch einen prozentual geringen Anteil des Brückenbestandes dar.

Bei der Clusterung der balken- und plattenartigen Tragwerke nach dem statischen System in Längsrichtung konnten einige Tragwerke nicht eindeutig einer Bauwerksart zugeordnet werden. So sind hier auch insgesamt 105 Rahmenbauwerke beinhaltet. Die Auswertung in Tabelle 2 zeigt, dass balken- und plattenartigen Tragwerke je zur Hälfte einfeldrig, freiaufliegend und mehrfeldrig mit Durchlaufwirkung sind.

### 4.3 Rahmenartige Tragwerke (2.669 Teilbauwerke, 42 %)

Nach Kapitel 4.1 sind rahmenartige Tragwerke mit 2.669 Teilbauwerken im Betrachtungszeitraum die

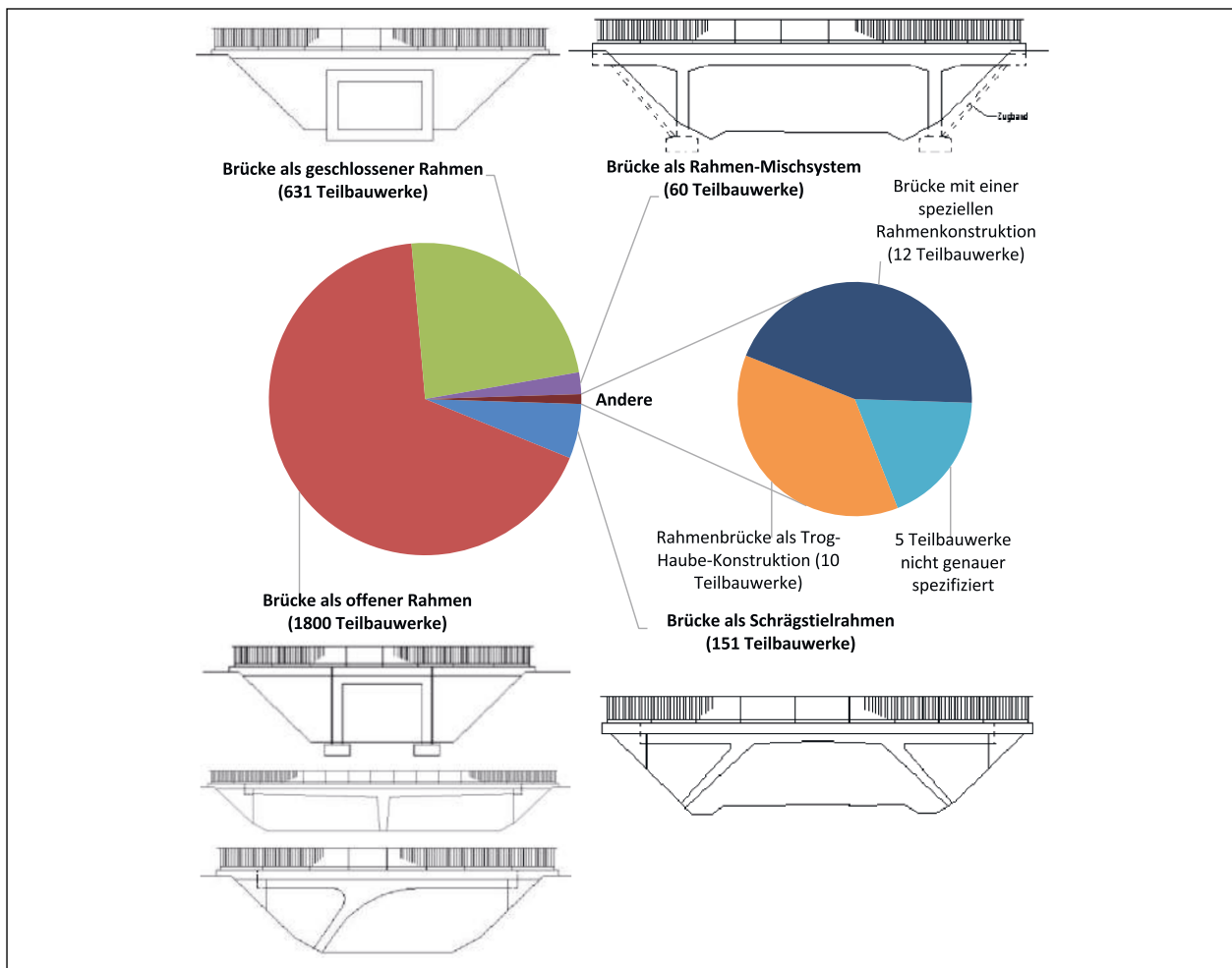


Bild 11: Rahmenartige Tragwerke, statisches System

zweithäufigste Bauwerksart aller Brückenneubauten der Brückenklasse LM1 oder größer. Gemäß ASB-Ing 2013 [21] Anhang D7 Artikel 1.1.2 untergliedern sich rahmenartige Tragwerke in sechs Typen.

Die Sortierung nach diesen sechs Untertypen (hier statisches System) ist in Bild 11 dargestellt.

Die offenen und geschlossenen Rahmen stellen gemeinsam 91 % aller rahmenartigen Tragwerke dar.

Eine Clusterung der rahmenartigen Tragwerke nach Material des Überbaus zeigt, dass 90 % aller Bauwerke aus Stahlbeton und 10 % aus Spannbeton besteht sowie 5 % in Verbundbauweise errichtet sind, Bild 12.

Etwa 90 % aller balken- und plattenartigen Tragwerke weisen eine maximale Spannweite von 30 m auf.

Eine Clusterung der rahmenartigen Tragwerke nach dem statischen System in Längsrichtung zeigt, dass die Typen „Stieffüße und/oder Kämpfer einge-

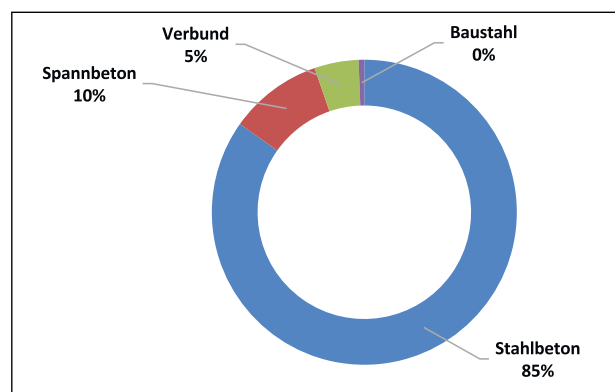


Bild 12: Rahmenartige Tragwerke, Material des Überbaus

spannt“ sowie „zweigelenkig“ am häufigsten auftreten (gemeinsam ca. 70 %). Bei 15 % aller Rahmen der Datenbank ist das statische System nicht genauer definiert, sodass deren Anteil vermutlich noch höher ist.

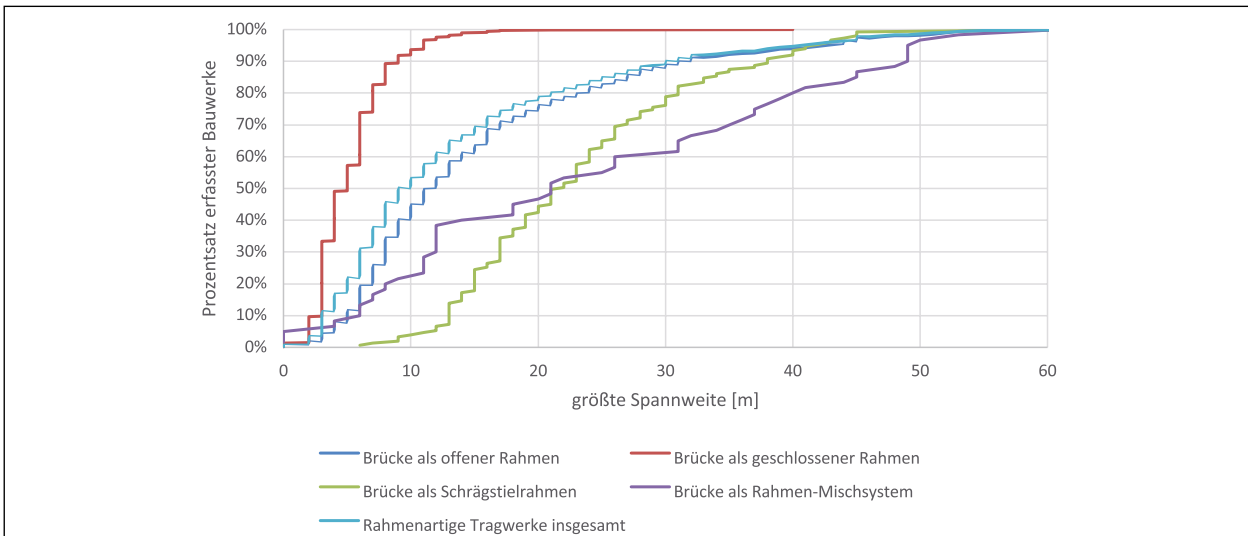


Bild 13: Balken- und plattenartige Tragwerke, Verteilung der Spannweiten

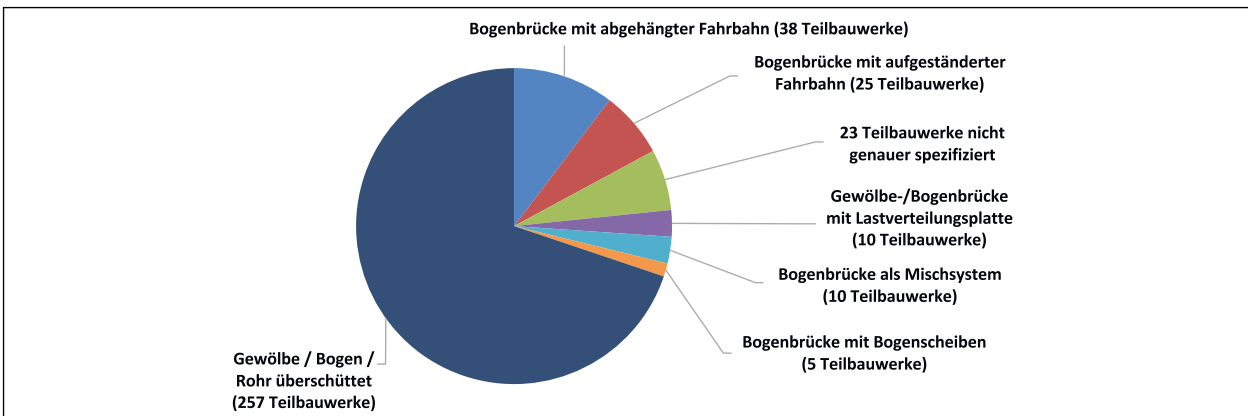


Bild 14: Bogenartige Tragwerke, konkrete Art des Tragwerks

#### 4.4 Bogenartige Tragwerke (368 Teilbauwerke, 6 %)

Nach Kapitel 4.1 sind bogenartige Tragwerke mit 368 Teilbauwerken im Betrachtungszeitraum die dritthäufigste Bauwerksart aller Brückenneubauten der Brückenklasse LM1 oder größer. Gemäß ASB-Ing 2013 [21] Anhang D7 Artikel 1.1.3 untergliedern sich bogenartige Tragwerke in acht Untertypen (hier: statisches System).

In Bild 14 sind die bogenartigen Tragwerke detailliert nach dem statischen System geclustert, wobei überschüttete Bauwerke zusammengefasst wurden.

Bei den bogenartigen Tragwerken handelt es sich überwiegend um Rohre (mit oder ohne Ummantelung) sowie Gewölbe/Bogen ohne Aufbeton. Diese Bauwerksarten sind nicht Gegenstand der weiteren Untersuchung. Es verbleiben 111 bogenartige Teilbauwerke oder 2 % des Datenbestandes. Daher wird dieser Brückentyp in den weiteren Untersuchungen nicht weiter betrachtet und eine detaillierte

Spektralbeschleunigung	Anzahl TBW
$S_{ap,R} < 0,6 \text{ m/s}^2$	4.790
$0,6 \text{ m/s}^2 \leq S_{ap,R} \leq 1,0 \text{ m/s}^2$	768
$1,0 \text{ m/s}^2 < S_{ap,R} \leq 2,0 \text{ m/s}^2$	610
$S_{ap,R} > 2,0 \text{ m/s}^2$	150
<b>Insgesamt</b>	<b>6.318</b>

Tab. 3: Verteilung der Teilbauwerke über die Spektralbeschleunigung

Aufschlüsselung der Eigenschaften nicht vorgenommen.

#### 4.5 Seismizität

Die Projektdatenbank enthält keine Einteilung bzgl. der Erdbebenintensität des Standortes. Mittels der Koordinaten oder Ortsangabe konnten jedoch die Spektralwerte  $S_{ap,R}$  (für  $T_{NCR} = 475$  Jahre) je Bauwerk nach DIN EN 19981/NA:2020 [5] mittels der Datenbank des GFZ Potsdam [20] bestimmt werden, Tabelle 3. Die Daten sind Anhaltswerte, da auf  $0.1^\circ$  gerundete Koordinaten bzw. gerundete Koordinaten des nächstgelegenen Ortes verwendet wurden.

## 4.6 Weitere geometrische Parameter

Neigung und Krümmung waren dem Datensatz nicht zu entnehmen, werden jedoch als Parametervariation auf Basis von Erfahrungswerten in die Betrachtung einfließen.

## 4.7 Zusammenfassung

Die zur Verfügung gestellte Projektdatenbank [27] wurde nach Bauwerksart, nach Material des Überbaus und nach Spannweiten geclustert. Dieser Einteilung ist zu entnehmen, dass vier Brückentypen aus Beton und Verbund mit insgesamt 3.974 von 6.318 Teilbauwerken rund 63 % des erfassten Bestandes darstellen.

Brückentyp 1:  
Einfeldriger Plattenbalken, freiauflegend  
7 % (444 Bauwerke)

Brückentyp 2:  
Mehrfeldriger Plattenbalken mit Durchlaufwirkung  
12 % (788 Bauwerke)

Brückentyp 3:  
Plattenbrücke, freiauflegend  
17 % (1.043 Bauwerke)

Brückentyp 5:  
Offener Rahmen  
27 % (1.699 Bauwerke)

Es ist davon auszugehen, dass der Anteil der Verbundbrücken von bisher 6 % in Zukunft deutlich zunimmt. Auf eine Untersuchung von geschlossenen Rahmen (Anteil 17 %) wird daher zugunsten von Verbundbrücken verzichtet.

Diese vier Brückentypen sind in den Anhängen C bis M für eine weitere Auswahl und Untersuchung beispielhaft beschrieben. Hier ist auch das Parameterfeld für jeden Brückentyp festgelegt (z. B. zu untersuchende Spannweiten, Schlankheiten etc.).

## 5 Konzept für die vereinfachte Erdbebenauslegung von Straßenbrücken (AP 3)

Das zu erarbeitende Konzept für die vereinfachte Erdbebenauslegung von Straßenbrücken ist für die Bemessung von Neubauten oder Ersatzneubauten

gedacht und gilt nicht für Bestandsbauwerke. Es zielt auf die Bemessung klassischer Überführungsbauwerke ab. Das Konzept ist in vier Stufen aufgebaut:

- I. keine explizite Erdbebenbemessung notwendig;
- II. unter Einhaltung konstruktiver Regeln keine explizite Erdbebenbemessung notwendig;
- III. vereinfachte Erdbebenbemessung möglich;
- IV. Erdbebenbemessung nach DIN EN 1998-2 + NA notwendig.

Die Abgrenzung der einzelnen Stufen erfolgt einerseits über die Angabe einer maximalen Bemessungs-Bodenbeschleunigung, andererseits über die Einhaltung brückentypspezifischer Entwurfsparameter. In Anhang A sind die Grenzwerte der Stufen I und II in Abhängigkeit der Erdbebenanregung, des Brückentyps und der Bauwerkslänge gegeben. Ein schematisches Flussdiagramm für das Erdbebenkonzept ist in Anhang B dargestellt.

Da diverse Parameter in die Bemessungs-Bodenbeschleunigung einfließen, wird in Kapitel 5.2 die Ermittlung erläutert. Vorschläge für mögliche Entwurfsparameter, die bei jeder Bemessungsstufe zu berücksichtigen sind, sind in Anhang C bis M zu den entsprechenden Brückentypen zu entnehmen. Das in diesem Kapitel beschriebene Konzept wird in Kapitel 6 anhand von numerischen Modellen für das zu untersuchende Parameterfeld erprobt. Die in diesem Kapitel angegebenen Werte und Kriterien sind daher vorläufig und werden auf Basis der Ergebnisse aus der Erprobung angepasst und ergänzt. Die finalen Vorschläge für eine vereinfachte Erdbebenauslegung werden in Kapitel 7 ausgearbeitet.

### 5.1 Voraussetzungen

In diesem Kapitel werden Anforderungen an Brücken für den Anwendungsbereich des Konzepts definiert, die unabhängig vom Brückentyp eingehalten werden müssen. Die Anforderung gelten für die Stufen I bis Stufe III. Für die Stufe IV sind die Voraussetzungen der DIN EN 1998-2 + NA einzuhalten.

- Das Bemessungskonzept darf nur für den Brückenbau bzw. -ersatzbau angewendet werden. Bestandsbauten sind nicht abgedeckt.



Außerdem ist das Konzept nur für Brücken geeignet, die in einen der definierten Brückentypen eingeteilt werden können.

- Die Brücke muss den Voraussetzungen der DIN EN 1998-2 + NA entsprechen. Diese ist gültig für Brücken, bei denen die horizontalen Erdbebeneinwirkungen im Wesentlichen durch Biegung der Pfeiler oder an den Widerlagern aufgenommen werden, d. h. Brücken, die aus (fast) lotrechten Pfeilern bestehen, die den Fahrbahnüberbau tragen. Eine Anwendung der DIN EN 1998-2 auf Schrägseil- und Bogenbrücken ist zulässig, aber nicht abdeckend. Daher fallen diese Brücken in die Bemessungsstufe IV des Konzepts. DIN EN 1998-2 + NA deckt keine Hängebrücken, keine beweglichen Brücken, keine Schwimmbrücken, keine Holzbrücken und keine Brücken aus Mauerwerk ab. Zusätzlich zu diesen Anforderungen ist das Konzept nur für Brücken zulässig, die annähernd gleichmäßige Steifigkeiten in Längs- und Querrichtung aufweisen und annähernd gerade sind; d. h. keine großen Grundrisskrümmungen oder Schiefwinkligkeit. Um eine Eingliederung in die DIN EN 1998-2 + NA zu ermöglichen, werden in diesem Konzept nur Bauwerke in Fällen von niedriger Seismizität oder sehr niedriger Seismizität mit beschränkt duktilem Verhalten ( $q \leq 1,5$ ) betrachtet.
- In Anlehnung an das vereinfachte Verfahren in der DIN EN 1998-2/NA:2011 wird gefordert, dass die Erdbebeneinwirkung als räumlich unveränderlich angesehen werden kann. Nach DIN EN 1998-2/NA:2011 ist dies der Fall, wenn entlang der Brücke ungefähr einheitliche Bodeneigenschaften auftreten und die Länge des durchgehenden Überbaus kleiner als  $L_{lim} = L_g / 1,5$  ist. Für Baugrundklasse C ergibt sich  $L_{Lim}$  zu  $400 / 1,5 = 267$  m.
- Für die Anwendung der definierten Grenzwerte ist es notwendig, dass der Baugrund in die Baugrundklasse A, B oder C eingestuft werden kann. Der Standort und der Untergrund weist keine besonderen Risiken bzgl. Grundbruch, Hangrutschung und Setzung infolge Bodenverflüssigung oder Bodenverdichtung bei Erdbeben am Bauwerksstandort auf. Der Baugrund besteht aus keinen tiefgründig unverfestigten Ablagerungen in lockerer Lagerung (z. B. lockerer Sand) bzw. solchen in weicher oder breiiger Konsistenz (z. B. Seeton, Schlick). Das heißt die dominierenden Scherwellengeschwin-

digkeiten sollten mindestens 150 m/s betragen. Die Bodeneigenschaft entlang der Brücke sollte so homogen sein, dass nicht mehr als ein Bodentyp an den Auflagern des Brückenüberbaus angesetzt werden muss. Sind die Bedingungen zum Baugrund und Untergrund nicht eingehalten, sind genauere Betrachtungen nach DIN EN 1998 notwendig.

- Dieses Konzept ist nur für Brücken ohne seismische Isolation gedacht. Sonder- und Großbrücken werden in diesem Konzept nicht betrachtet. Aufgrund ihrer spezifischen Konstruktionen wird eine Vereinheitlichung dem tatsächlichen dynamischen Verhalten nicht gerecht.
- Es wird davon ausgegangen, dass im Überbau eine Mindestbewehrung von  $\varnothing 12$  mm je 15 cm vorhanden ist.

## 5.2 Bestimmung der Bemessungs-Bodenbeschleunigung

Die im Nationalen Anhang zu DIN EN 1998-1:2020 [5] festgelegte Definition der Erdbebeneinwirkung erfolgt über eine zonenfreie Beschreibung mit Angabe der spektralen Antwortbeschleunigung für das Untergrundverhältnis A-R im Plateaubereich  $S_{ap,R}$  (s. Kapitel 3.2). Die zugehörige Referenzspitzenbodenbeschleunigung für das Untergrundverhältnis A-R,  $a_{gR}$ , ist für eine Wiederkehrperiode von  $T_{NCR} = 475$  Jahre wie folgt definiert:

$$a_{gR} = S_{ap,R} / 2,5$$

Die Anpassung des Sicherheitsniveaus im Hinblick auf die Bedeutung der Brücke erfolgt mit Bedeutungsfaktoren.

Für die Ermittlung der spektralen Antwortbeschleunigung im Plateaubereich für andere Untergrundverhältnisse muss der Wert  $S_{ap,R}$  mit dem Bodenparameter  $S$  multipliziert werden. Der Bodenparameter ist im Nationalen Anhang zur DIN EN 1998-1:2020 gegeben (siehe Tabelle 1). Damit ergibt sich die Bemessungs-Bodenbeschleunigung unter Berücksichtigung der Bedeutung des Bauwerks und des Untergrundverhältnisses zu

$$a_g \cdot S = a_{g,R} \cdot \gamma_I \cdot S = S \cdot \gamma_I \cdot S_{ap,R} / 2,5.$$

### 5.3 Grenzwert

Die Grenzwerte der Bemessungs-Bodenbeschleunigung zur Einstufung in die Bemessungsstufe werden für das Untergrundverhältnis C-R angegeben. Nach DIN EN 1998-1/NA:2020 [5] darf auf weitere Untersuchungen zur Bestimmung der Baugrundklasse verzichtet werden, wenn ungünstige Baugrundverhältnisse nach DIN EN 1998-1/NA:2020 [5], NDP zu 3.1.2(1), Abschnitt (ii) ausgeschlossen werden können und die Erdbebeneinwirkung unter der Baugrundklasse C bestimmt wird. Dies ist mit den Anforderungen an den Boden nach Kapitel 5.1 erfüllt.

Der zugehörige Bodenparameter wird mit  $S = 1,5$  der DIN EN 1998-1/NA:2020 [5] entnommen. Dieser stellt den ungünstigsten Wert der betrachteten Untergrundverhältnisse dar und ist auch für die in der geplanten DIN EN 1998-1/NA:2020 [5] angegebenen Bodenparameter in Abhängigkeit der Spektralbeschleunigung abdeckend.

Dieses Konzept ist für Autobahnbrücken und Brücken an Bundesstraßen gedacht. Daher scheint die Ansetzung des Bedeutungsbeiwerts der Bedeutungskategorie II mit  $\gamma_I = 1,0$  angemessen.

Daraus folgt für die Bemessungs-Bodenbeschleunigung für das Untergrundverhältnis C-R einer Brücke der Bedeutungskategorie II zu

$$a_g \cdot S = 0,60 \cdot S_{ap,R}$$

Der Wert  $a_g \cdot S$  wird als Grenzwertparameter für die Einstufung der Brücken in die Bemessungsstufen gewählt.

Die oben getroffenen Annahmen dienen einer Verallgemeinerung der Ansätze. Die Grenzwerte können bzw. müssen bei Abweichungen der zuvor definierten Eingangsparameter über die Modifizierungsbeiwerte nach Tabelle 4 präzisiert werden.

Parameter	Modifizierungsbeiwert
Bedeutungskategorie III	1,30
Baugrund	$S / 1,5$
Auslegungsdauer X Jahre	$1 / (50 / X)^{1/3}$

Tab. 4: Modifizierungsbeiwerte für abweichende Parameter

### 5.4 Stufe I: Keine explizite Erdbebenbemessung

Für die Brücken, die die Voraussetzungen der Stufe I einhalten, ist kein expliziter Erdbebennachweis erforderlich, wenn eine Bemessung für Betriebslasten erfolgt ist. Brücken können der Stufe I zugeordnet werden, wenn eine der folgenden Bedingungen erfüllt ist.

- In der DIN EN 1998-1/NA:2020 [5] ist kein expliziter Erdbebennachweis für Fälle von sehr niedriger Seismizität notwendig. Fälle sehr niedriger Seismizität sind über das Produkt  $a_g \cdot S$  definiert, das den Wert  $0,5 \text{ m/s}^2$  nicht überschreiten darf.
- Ebenfalls ist nach DIN EN 1998-2/NA:2011 [2] unabhängig vom Brückentyp für Brücken der Bedeutungskategorie I kein Erdbebennachweis erforderlich. Die Einstufung in die Bedeutungsklassen ist wie in Kapitel 3.2.3 erläutert nicht eindeutig. Die Zuordnung der Straße zu Bedeutungskategorien für die hier betrachteten klassischen Überführungsbauwerke könnte beispielsweise über die Verkehrsstärke (DTV-Kfz und DTV-SV) realisiert werden.
- Bei der Bemessung einer Brücke für Betriebslasten müssen horizontale Lasten berücksichtigt werden. Eine Möglichkeit auf den Erdbebennachweis zu verzichten, ist nachzuweisen, dass ein bereits berücksichtigter Lastfall mit horizontalen Lasten die Brücke stärker belastet als die Erdbebeneinwirkung. Um möglichst viele Fälle abzudecken, wurden in Kapitel 6.3 jeweils nur die minimal auftretenden horizontalen Betriebslasten angesetzt.

Da zur Verifizierung des Konzepts die minimal anzusetzenden Windlasten verwendet werden, kann es im Einzelfall möglich sein, durch den Abgleich der tatsächlich auftretenden Windlast mit der Gesamterdbebenkraft in Querrichtung  $E_{H,Y}$  auf einen Erdbebennachweis zu verzichten. Dazu muss folgendes Kriterium eingehalten sein:

$$L \cdot w_k \cdot \gamma_w = M \cdot 2,5 \cdot \eta \cdot (a_g \cdot S) = E_{H,Y}$$

mit

L: Bauwerkslänge in m

$w_k$ : Windeinwirkung  $w_k$  nach DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12, Tabelle N.N.5 in  $\text{kN/m}^2$

$\gamma_w$ : Teilsicherheitsbeiwert für Windeinwirkungen nach DIN EN 1990/NA

M: Gesamtmasse der Brücke unter Berücksichtigung der mitwirkenden Massen aus den Ausbaulasten und den Verkehrslasten

$\eta$ : Dämpfungskorrekturbeiwert (= 1,0 für 5 % viskose Dämpfung)

$a_g \cdot S$  Grenzparameter nach Kapitel 5.3

Alternativ kann auch der Vergleich über die angesetzten Anpralllasten auf Fahrzeugrückhaltesysteme erfolgen.

$$H_{\text{Tab.4.9}} = E_{H,Y}$$

mit

$H_{\text{Tab.4.9}}$ : Anpralllast an Fahrzeugrückhaltesystem (DIN EN 1991-2/NA:2012-08; Tabelle 4.9)

$E_{H,Y}$ : Gesamterdbebenkraft in Querrichtung

## 5.5 Stufe II: Unter Einhaltung konstruktiver Regeln keine explizite Erdbebenbemessung

Für Brücken, die in die Stufe II eingestuft werden, soll durch erdbebengerechtes Konstruieren auf die Notwendigkeit eines expliziten Erdbebennachweises verzichtet werden. Die nachfolgende Aufzählung konstruktiver Regelungen ist als mögliche konstruktive Regelungen zu verstehen, muss nicht auf jeden Brückentyp zutreffen und wird anhand der numerischen Berechnungen in Kapitel 6 erprobt.

Für die Auslegung der Lager kann eine Erdbebenersatzlast berücksichtigt werden. Diese ergibt sich aus der Gesamterdbebenlast in die jeweilige Richtung und der Anzahl der vorhandenen Auflager in die jeweilige Richtung.

$$A_i \geq M \cdot 2,5 \cdot \eta \cdot (a_g \cdot S) / n_i$$

mit

$A_i$ : Auflagerkraft in Richtung i

M: Gesamtmasse der Brücke unter Berücksichtigung der mitwirkenden Massen aus den Ausbaulasten und den Verkehrslasten

$\eta$ : Dämpfungskorrekturbeiwert (= 1,0 für 5 % viskose Dämpfung)

$a_g \cdot S$  Grenzparameter nach Kapitel 5.3

$n_i$ : Anzahl der Festlager in Richtung i

Für bestimmte Brückentypen kann es ausreichend sein, in bestimmten Bereichen wie den Auflagern eine zusätzliche untere Bewehrung einzulegen. Eine geeignete Zusatzbewehrung wird in Kapitel 6 untersucht.

## 5.6 Stufe III: Vereinfachte Erdbebenbemessung

In der DIN EN 1998-2/2011-12 wurde unter Abschnitt 2.3.7 (1) eine Möglichkeit geschaffen, vereinfachte Verfahren für Fälle niedriger Seismizität einzuführen. Es wird jedoch empfohlen, diese vereinfachten Verfahren auf Brücken zu beschränken, die ein beschränkt duktilen/im Wesentlichen linear elastisches Strukturverhalten aufweisen. Daher wird für diese Bemessungsstufe ein Verhaltensbeiwert von  $q \leq 1,5$  festgelegt. Für bestimmte lokale Nachweise kann es nötig sein, den Verhaltensbeiwert auf  $q = 1,0$  zu setzen, um ein beschränkt duktilen Verhalten der Struktur sicherzustellen (z. B. Lagerbemessung oder Vermeidung von Sprödbruch besonderer nicht-duktiler Bauteile).

Für vereinfachte Methoden können oft einfache statische Systeme mit einer statischen Ersatzlast beaufschlagt werden. Dazu wird in den meisten Fällen die Grundschiwingdauer des Systems benötigt. Zur Vereinfachung kann der Plateauwert des Bemessungsspektrums verwendet werden. Dies kann zu einer unwirtschaftlichen Bemessung führen, wenn die Grundschiwingdauer der Brücke sehr niedrig ist. Für das Untersuchungsfeld liegen erfahrungsgemäß Grundschiwingdauern vor, für die dies nicht zu erwarten ist. Nach der geplanten DIN EN 1998-1/NA:2020 [5] kann der Plateauwert des Bemessungsantwortspektrums wie folgt ermittelt werden:

$$S_{ap,R} \cdot \gamma_1 \cdot S \cdot \eta$$

mit

$$\eta = \sqrt{\frac{10}{5+\xi}} \geq 0,55$$

$\xi$  Wert der viskosen Dämpfung der Brücke in Prozent nach DIN EN 1998-2:2011 [1], 4.1.3 (1)

$\gamma_1$  Bedeutungsbeiwert nach DIN EN 1998-2/NA Tabelle NA.1

S Bodenparameter nach DIN EN 1998-1/NA Tabelle NA.3

Die viskose Dämpfung einer Brücke wird in der DIN EN 1998-2:2011 [1] über das Material der Pfeiler bestimmt, da davon ausgegangen wird, dass dort der größte Teil der Verformungsenergie während der seismischen Antwort dissipiert wird. Für Stahlbetonpfeiler wird eine viskose Dämpfung von 5 % angegeben.

Die Brücken mit Plattenbalkenquerschnitt können unter Einhaltung der zusätzlichen Bedingungen, die in DIN EN 1998-2/NA:2011 festgesetzt sind, mit dem vereinfachten Verfahren nach Anhang A dieser Norm bemessen werden. Dabei ist jedoch darauf zu achten, dass die Vorgaben bezüglich der Anregung in Längsrichtung bei unverschieblicher Lagerung am Widerlager beachtet werden.

Für die Brücken mit Plattenquerschnitt und Rahmenbrücken ist dies nicht möglich. Das in DIN EN 1998-2/NA:2011 beschriebene Verfahren gilt nur für annähernd gerade Balkenbrücken. Die Brücken mit Plattenquerschnitt werden in Kapitel 6 als Schalenelement abgebildet, da die Querrichtung entscheidend zum Lastabtrag beiträgt und eine Abbildung als Balkenelement daher nicht sinnvoll ist. Bei den in diesem Bericht untersuchten Rahmenbrücken handelt es sich um integrale Brücken. Das Zusammenwirken des Überbaus mit den Widerlagern und das der Widerlager mit dem Boden spielt für den Lastabtrag eine entscheidende Rolle. Daher ist auch bei Rahmenbrücken das vereinfachte Verfahren nicht zielführend.

## 5.7 Stufe IV: Explizite Erdbebenbemessung

Diese Stufe wird zur Vollständigkeit aufgeführt. Sie gilt für Brücken, die nicht die Voraussetzungen nach Kapitel 6.1 erfüllen oder nicht in die anderen Stufen eingeordnet werden können. Für diese Brücken muss eine explizite Erdbebenbemessung nach DIN EN 1998-2/2011 + NA [1], [2] durchgeführt werden.

Da die Aufgabenstellung eine vereinfachte Bemessung im Lastfall Erdbeben fordert, wird diese Stufe nicht weiter betrachtet.

## 6 Verifizierung des Konzepts für die vereinfachte Erdbebenauslegung von Straßenbrücken (AP 4)

### 6.1 Untersuchte Brückentypen

In diesem Kapitel wird das Konzept aus Kapitel 5 für die in Kapitel 4 definierten Brückentypen und Parametervariationen erprobt. Es werden Plattenbalkenbrücken, Plattenbrücken und offene Rahmenbrücken untersucht. Als Materialien der Brücken wurden Stahlbeton und Spannbeton sowie für die Plattenbalkenbrücken und Rahmenbrücken auch Stahlverbundquerschnitte mit offenen und geschlossenen Profilen betrachtet.

Die Breite der Brücken wird so gewählt, dass darauf eine Straße mit Regelquerschnitt RQ 15,5 verlaufen kann. Die Ergebnisse sind für schmalere Querschnitte abdeckend.

Die Modelle werden mit dem Programmpaket Sofistik 2020 entweder als Stabwerk oder als Flächen-tragwerk erstellt. Die Modellierung kann den Anhängen C bis M entnommen werden.

### 6.2 Materialien

#### 6.2.1 Beton

Es wird ein Beton der Festigkeitsklasse C30/37 nach DIN EN 1992-1-1 angesetzt. Bei Verwendung eines Betons mit einer höheren Festigkeitsklasse bis C50/60 können die Ergebnisse dieses Berichts als abdeckend betrachtet werden. Nach DIN EN 1992-1-1 ergeben sich folgende Materialkennwerte:

Festigkeitsklasse	C 30/37
Druckfestigkeit	$f_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$
Zugfestigkeit	$f_{ctm} = 2,9 \text{ N/mm}^2$
E-Modul	$E_{cm} = 33\,000 \text{ N/mm}^2$

#### 6.2.2 Betonstahl

Als schlaffer Betonstahl wird B500B angesetzt. In DIN EN 1998-2:2011-12, Abschnitt 5.2.1 (2) wird für die Duktilität des Bewehrungsstahls mindestens Klasse B gefordert. Nach DIN EN 1992-1/NA ergeben sich folgende Materialkennwerte:

Stahlgüte	B500B
Streckgrenze	$f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$
Zugfestigkeit	$f_{uk} = 525 \text{ N/mm}^2$
E-Modul	$E = 200\,000 \text{ N/mm}^2$

### 6.2.3 Spann Stahl

Für die vorgespannten Bauteile werden zwei Spannglieder mit je 19 Litzen berücksichtigt. Für die Litzen wird Spann Stahl Y1500/1770 angesetzt.

Stahlgüte	Y1500/1770
Streckgrenze	$f_{yk} = 1500 \text{ N/mm}^2$
Zugfestigkeit	$f_{uk} = 1700 \text{ N/mm}^2$
E-Modul	$E = 195\,000 \text{ N/mm}^2$

Querschnittsfläche  
je Spannglied  $A_y = 4719 \text{ mm}^2$

Hüllrohrabmessungen  $D_i/D_A = 65/102 \text{ mm}$

Maximale Exzentrizität  $e = 13,1 \text{ mm}$

Der Verlauf der Spannglieder kann dem jeweiligen Anhang entnommen werden.

### 6.2.4 Baustahl

Für die Profile aus Baustahl wird S 355 angesetzt. Die Ergebnisse können auch als abdeckend für S 460 angesehen werden. Nach DIN EN 1993-1-1 ergeben sich folgende Materialkennwerte:

Stahlsorte	S 355
Streckgrenze	$f_{yk} = 355 \text{ N/mm}^2$
Zugfestigkeit	$f_{uk} = 490 \text{ N/mm}^2$
E-Modul	$E = 210\,000 \text{ N/mm}^2$

## 6.3 Belastung

In diesem Abschnitt werden Lasten der ständigen/vorübergehenden Einwirkungskombination zusammengestellt, die bei allen Brückentypen berücksichtigt werden.

### 6.3.1 Eigengewicht

Das Eigengewicht der Brücke wird programmintern entsprechend der Querschnitte und Baustoffe ermittelt. Für Stahl- und Spannbeton wird eine Wichte von  $25 \text{ kN/m}^3$  und für Baustahl eine Wichte von  $78,5 \text{ kN/m}^3$  verwendet.

### 6.3.2 Ausbaulasten

Die Ausbaulasten wirken symmetrisch und werden daher ohne Exzentrizität angeordnet. Bei der Ermittlung der Eigenformen werden entsprechende Rotationsmassen manuell hinzugefügt.

Fahrbahnbelag:

Der Belagsaufbau wird mit 8 cm und einer Wichte von  $25 \text{ kN/m}^3$  inkl. einem Mehreinbau von  $0,5 \text{ kN/m}^2$  über die Fahrbahnbreite  $b$  angesetzt (ARS 22/2012 [28]):

$$g_{k, \text{Belag}} = 0,08 \text{ m} \times 25 \text{ kN/m}^3 + 0,5 \text{ kN/m}^2 = 2,5 \text{ kN/m}^2$$

Kappe:

Die Kappen werden analog zu Kapitel 1 der RiZ-ING [29] ausgebildet. Das Eigengewicht inkl. Geländer (je  $0,5 \text{ kN/m}$ ) und Schutzplanke ( $1 \text{ kN/m}$ ) ergibt sich zu:

$$g_{k, \text{Kappe}} = (0,40 \text{ m}^2 \times 25 \text{ kN/m}^3 + 1,5 \text{ kN/m}) \times 2 = 23,0 \text{ kN/m}$$

### 6.3.3 Verkehrslasten

Lastmodell 1 (nach DIN EN 1991-2 [18]); siehe Bild 16

### 6.3.4 UDL (Flächige Verkehrsbelastung)

Die Grundlast von  $2,5 \text{ kN/m}^2 \times 1,2$  wird zwischen den Geländern auf einer Breite von (Brückenbreite

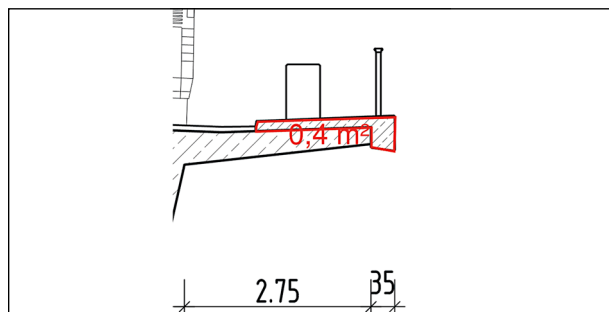


Bild 15: Darstellung der Kappe aus [30]

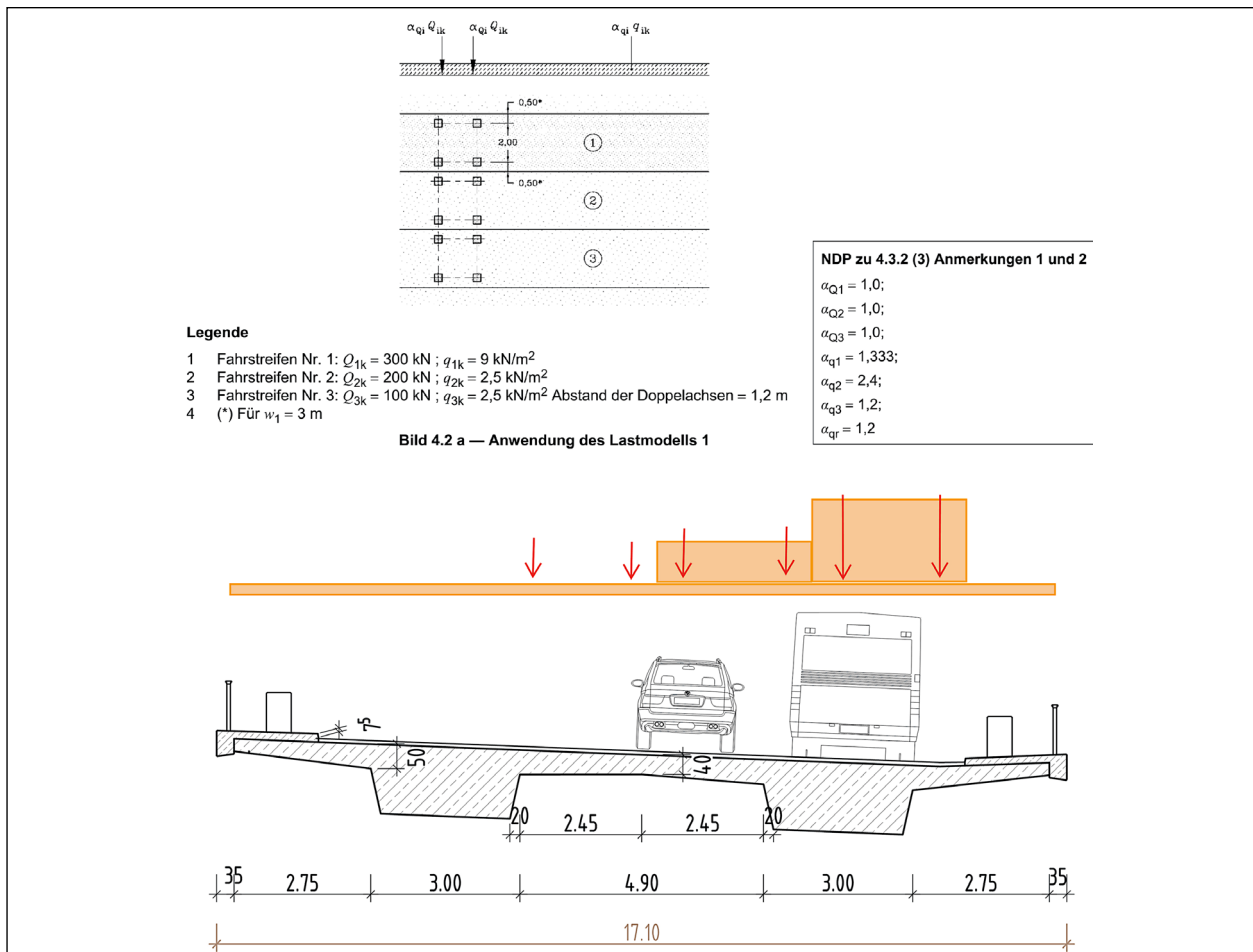


Bild 16: Darstellung Lastmodell 1 nach DIN EN 1991-2 [18]

– 2 x 0,25 m) angesetzt. Die Hauptspur beginnt am Schrammbordrand. Nach DIN EN 1991-2 beträgt die Fahrstreifenbreite 3,00 m.

Grundlast:

$$1,20 \cdot 2,5 \text{ kN/m}^2 = 3,0 \text{ kN/m}^2$$

Überlast Hauptspur:

$$1,33 \cdot 9,0 \text{ kN/m}^2 - 3 \text{ kN/m}^2 = 9,0 \text{ kN/m}^2$$

Überlast Nebenspur:

$$2,40 \cdot 2,5 \text{ kN/m}^2 - 3 \text{ kN/m}^2 = 3,0 \text{ kN/m}^2$$

### 6.3.5 TS (Einzellasten aus Verkehr)

HS: 4 x 150 kN ( $e_y = 6,0 \text{ m}$ ;  $e_y = 4,0 \text{ m}$ )

NS1: 4 x 100 kN ( $e_y = 3,0 \text{ m}$ ;  $e_y = 1,0 \text{ m}$ )

NS2: 4 x 50 kN ( $e_y = 0,0 \text{ m}$ ;  $e_y = -2,0 \text{ m}$ )

Anmerkung: Aufgrund der Modellierung des Plattenbalkens als 1-Stabsystem ist die Querverteilung nicht erfasst, sodass die Bemessung für die Hauptträger günstiger ist. Diese Vereinfachung ist für die

Aussagen zu Erdbeben etwa 10~12 % konservativ. Um den Effekt der Querverteilung näherungsweise zu erfassen, wurde bei der Berechnung die Wölbkrafttorsion berücksichtigt.

### 6.3.6 Lastfall Anfahren und Bremsen

Die Bremslast ergibt sich in Abhängigkeit der Gesamtlänge zu  $360 + 3,6 \times L_{\text{ges}} < 900 \text{ kN}$  und wird gleichmäßig verteilt über die gesamte Länge aufgebracht.

### 6.3.7 Temperatur

Es werden der konstante und der linear veränderliche Anteil der Temperaturbeanspruchung nach DIN EN 1991-1-5:2010 [32] angesetzt. Temperaturunterschiede zwischen Bauteilen werden berücksichtigt.

Die maximalen und minimalen Außenlufttemperaturen betragen nach DIN EN 1991-5/NA:2010-12 [33]:

$$T_{\text{Ed,min}} = -24 \text{ }^\circ\text{C}$$

$T_{Ed,max} = 37 \text{ }^\circ\text{C}$

Für den linear veränderlichen Temperaturanteil werden die Werte aus DIN EN 1991-1-5:2010, Tabelle 6.1 [32] verwendet und mit dem Faktor  $k_{sur}$  nach DIN EN 1991-1-5:2010, Tabelle 6.2 [32] multipliziert.

**6.3.8 Wind**

Die Windlasten werden gemäß DIN EN 1991-1-4 [16] ermittelt. Es werden jeweils die niedrigsten Windlasten angesetzt (Annahme: Windzone I, Binnenland,  $z_e \leq 20 \text{ m}$ ). Niedrige Windlasten führen zu weniger tragfähigen Querschnitten aus ständige/vorübergehende Lasten und sind somit für die Erdbebenuntersuchungen maßgebend. Für die Ermittlung der Belastung aus Wind wird sowohl die Beanspruchung von Wind auf die Brücke ohne Verkehrsband als auch von Wind auf die Brücke mit Verkehrsband untersucht.

**6.3.9 Anpralllasten auf Fahrzeugrückhaltesysteme**

Für die horizontale Auflagerlast in Brückenquerrichtung werden als außergewöhnliche Belastung die Anpralllasten auf Fahrzeugrückhaltesysteme berücksichtigt (Tabelle 5).

Es wird die Klasse A berücksichtigt. Niedrige Anpralllasten führen zu weniger tragfähigen Quer-

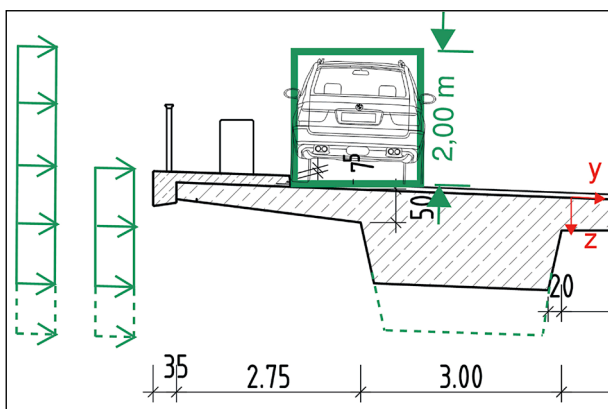


Bild 17: Darstellung Windlastmodell nach DIN EN 1991-1-4

Klasse	Horizontalkraft (kN)
A	100
B	200
C	400
B	600

Tab. 5: Anpralllasten nach DIN EN 1991-2/NA:2012-08 [19]

schnitten und sind somit für die Erdbebenuntersuchungen maßgebend.

**6.4 Erdbeben**

Das Erdbebenspektrum wird in Anlehnung an DIN EN 1998-1/NA:2020 für die ungünstigste Baugrundklasse C festgelegt.

Nach DIN EN 1998-1/NA:2020 darf bei unbekannter geologischer Untergrundklasse ein einhüllendes Antwortspektrum verwendet werden. „Für den Bodenparameter S sind dazu die der geologischen Untergrundklasse R zugeordneten Werte der Tabelle NA.3 zu verwenden. Für die Kontrollperiode  $T_C$  sind die der geologischen Untergrundklasse S zugeordneten Werte der Tabelle NA.2 zu verwenden.“

Unter diesen Annahmen ergeben sich folgende Kontrollperioden:

- für das horizontale Antwortspektrum:
 
$$T_B = 0,10 \text{ s} \quad T_C = 0,50 \text{ s} \quad T_D = 2,00 \text{ s}$$
- für das vertikale Antwortspektrum:
 
$$T_B = 0,05 \text{ s} \quad T_C = 0,20 \text{ s} \quad T_D = 1,20 \text{ s}$$
 mit  $a_{vg} / a_g = 0,7$

Um Unsicherheiten in der Modellierung der Steifigkeiten (z. B. zu hohe Steifigkeiten der festen Lager) abzudecken, wird das Plateau auf der sicheren Seite liegend von  $T_B$  bis  $T_A = 0 \text{ s}$  fortgeführt, Bild 19.

Bei der Auswertung wird die Erdbebenintensität  $a_g \cdot S = S_{ap,R} / 2,5 \cdot \gamma_I \cdot S$  variiert; der Plateauwert ergibt sich somit zu  $2,5 \cdot a_g \cdot S \cdot \eta$ .  $\eta$  kann zu 1,0 gesetzt werden, da die Dämpfung beim Bemessungs-Spektrum (mit q-Faktor) keinen Einfluss hat.

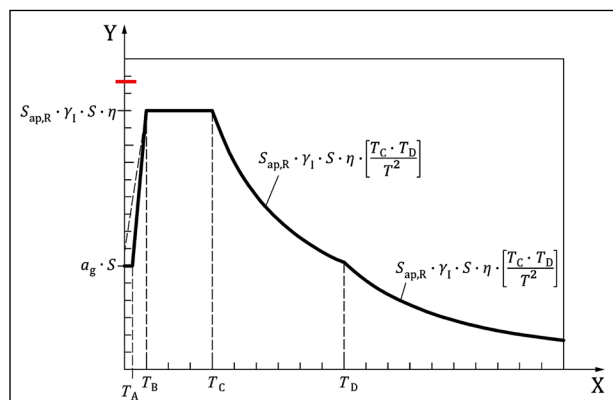


Bild 18: Spektrum aus DIN EN 1998-1/NA:2020

Unter Berücksichtigung des maximalen  $S_{ap,R}$ -Werts von  $4,0 \text{ m/s}^2$  aus Bild NA.1 DIN EN 1998-1/NA:2020, einem maximalen Bodenparameter von  $S = 1,5$  und einem maximalen Bedeutungsbeiwert von  $\gamma_1 = 1,30$  erhält man einen maximalen Wert von  $a_g \cdot S = 3,12 \text{ m/s}^2$ .  $a_g \cdot S$  wird entsprechend für  $0,1 \text{ m/s}^2$ ,  $0,5 \text{ m/s}^2$ ,  $1,0 \text{ m/s}^2$ ,  $2,0 \text{ m/s}^2$ ,  $3,0 \text{ m/s}^2$  und  $4,0 \text{ m/s}^2$  untersucht.

In DIN EN 1998-1, 4.3.3.5.2 ist festgelegt, dass die vertikale Erdbebenkomponente zu berücksichtigen ist, wenn  $a_{Vg} > 2,5 \text{ m/s}^2$  ist. Mit einer maximal angenommenen  $a_g \cdot S < 4 \text{ m/s}^2$  ergibt sich ein maximales  $a_{Vg} < 0,7 \times 4,00 / 1,5 = 1,9 \text{ m/s}^2$ . Daher kann bei der Biege- und Schubbemessung der Überbauten aus Stahlbeton und Stahlverbund die vertikale Erdbebenkomponente vernachlässigt werden. Allerdings ist nach DIN EN 1998-2, 4.1.7 die Auswirkung der vertikalen Erdbebenkomponente bei vorgespannten Betonfahrbahnplatten sowie bei Lager und Verbindungen immer zu berücksichtigen.

Bei der Ermittlung der Eigenwerte werden neben den Ausbaulasten die Lasten aus der flächigen Verkehrsbelastung mit 20 % als zusätzliche Masse berücksichtigt (s. DIN EN 1998-2:2011-12, 4.1.2(4) + NA.D).

Die Ermittlung der Erdbebenbelastung erfolgt mittels des modalen Antwortspektrumverfahren.

Wenn nach Einbeziehung aller Modalbeiträge mit  $T \geq 0,033 \text{ s}$  die Summe der effektiven modalen Massen  $(\sum M_i)_C$  unter 90 % der Gesamtmasse der Brücke  $M$  beträgt, werden die endgültigen Zustandsgrößen infolge Erdbebenbelastung mit  $M/(\sum M_i)_C$  multipliziert, siehe DIN EN 1998-2:2011, 4.2.1.2.

### 6.5 Einwirkungskombinationen sowie Teilsicherheits- und Kombinationsbeiwerte

Die Kombinationen werden DIN EN 1990/NA/A1 [35] entnommen.

- Kombinationen von Einwirkungen bei ständigen oder vorübergehenden Bemessungssituationen (Grundkombinationen): **NCI zu 6.4.3.2(3)**
- Kombinationen von Einwirkungen für Bemessungssituationen bei Erdbeben: **NCI zu 6.4.3.4(2)**
- Teilsicherheitsbeiwerte der Einwirkungen: **Tabelle NA.A2.1**
- Kombinationsbeiwerte: **Tabelle A2.1**

NDP zu A2.2.6 (1)

**Tabelle A2.1 — Empfehlung für die Zahlenwerte der  $\psi$ -Faktoren für Straßenbrücken**

Einwirkung	Bezeichnung	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$	
Verkehrslasten (siehe EN 1991-2, Tabelle 4.4)	gr1a (LM1+Lasten auf Gehwegen oder Radwegen) <sup>a</sup>	Doppelachse Gleichmäßig verteilte Last	0,75 0,40	0,75 0,40	0,2
		Gehweg- und Radwegbelastung <sup>b</sup>	0,40	0,40	
	gr1b (Einzelachse)		0	0,75	
		gr2 (Horizontalkräfte)		0	0
		gr3 (Gehwegbelastung)	0	<del>0,40</del> gestrichener Text <del>(AC)</del>	0
		gr4 (LM4 – Menschengedränge)	0	<del>—</del> gestrichener Text <del>(AC)</del>	0
	gr5 (LM3 – Spezialfahrzeuge)	0	<del>—</del> gestrichener Text <del>(AC)</del>	0	
Windkräfte	$F_{Wk}$				
	Ständige Bemessungssituationen Bauausführung	0,6 0,8	0,2 —	0 0	
	$F_{Tr}^*$	1,0	—	—	
Temperatur- einwirkungen	$T_k$	0,8 <sup>c</sup>	0,6	0,5	
Schneelasten	$Q_{Sn,k}$ (während der Bauausführung)	0,8	—	—	
Lasten aus Bauausführung	$Q_c$	1,0	—	1,0	

<sup>a</sup> Die empfohlenen Werte für  $\psi_0$ ,  $\psi_1$ ,  $\psi_2$  für gr1a und gr1b gelten für Straßenverkehr, der den Anpassungsfaktoren  $\alpha_{Qi}$ ,  $\alpha_{Ql}$ ,  $\alpha_{Qr}$  und  $\beta_Q$  gleich 1 entspricht. Die Werte für die gleichmäßig verteilte Last entsprechen seltenen Verkehrssituationen mit normalem Verkehr und Anhäufung von LKWs. Für andere Straßenklassen oder ungewöhnliche Verkehrssituationen können in Verbindung mit der Wahl der  $\alpha$ -Faktoren andere Zahlenwerte zutreffend sein. Zum Beispiel kann für die gleichmäßig verteilte Last im System LM1 ein Wert  $\psi_2$  ungleich Null angenommen werden, wenn die Brücke ständig durch einen kontinuierlich fließenden Schwerverkehr beansprucht wird. Siehe auch EN 1998.

<sup>b</sup> Der Kombinationswert für Gehweg- und Radwegbelastung, aufgeführt in Tabelle 4.4a der EN 1991-2, ist ein „abgeminderter Wert“. Die  $\psi_0$ - und  $\psi_1$ -Faktoren sind auf diesen Wert anwendbar.

<sup>c</sup> Der empfohlene Zahlenwert für  $\psi_0$  für Temperatureinwirkungen darf für die Grenzzustände der Tragfähigkeit EQU, STR und GEO in den meisten Fällen auf 0 abgemindert werden. Siehe auch die Eurocodes für die Bemessung.



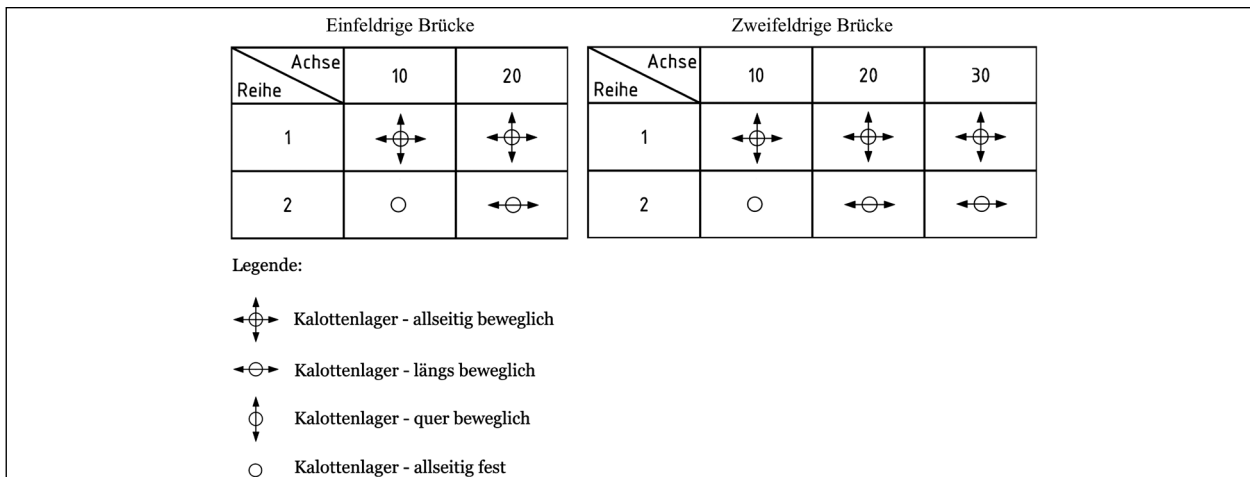


Bild 19: Lagerschema einfeldrige und zweifeldrige Brücke

### 6.6 Lagerung

Die Lagerung des Überbaus erfolgt mit Kalottenlagern. Der Festpunkt befindet sich hierbei in einer der Widerlagerachsen. Das Lagerkonzept für einfeldrige und zweifeldrige Brücken ist in Bild 19 dargestellt. Feste Auflager werden mit Federn modelliert. Für die Kalottenlager wird als Federsteifigkeit  $1 \times 10^8$  kN/m angesetzt. Die Ergebnisse sind auf Elastomerlager übertragbar, sofern der Abtrag von Horizontalkräften durch gesonderte, starre Festhaltekonstruktionen (z. B. Knaggen) erfolgt.

Es wird davon ausgegangen, dass das Widerlager und der Boden im Verhältnis zur Brücke und der Lager als starr angesehen werden können.

Für die Mittelstütze wurde ein maximaler und ein minimaler Steifigkeitswert ermittelt, in dem auch die Steifigkeit des Bodens mitberücksichtigt wird. Die dynamischen Federsteifigkeiten werden für die Ermittlung der Eigenfrequenzen sowie der Erdbebenbelastung verwendet. Durch die Betrachtung einer minimalen Bettung des Mittelaufagers und einer maximalen Bettung sind Steifigkeitsbereiche für das Mittelauflager nach Tabelle 6 abgedeckt.

Die zu verwendende Federsteifigkeit für das Mittelauflager kann beispielsweise wie folgt bestimmt werden:

$$k_{i,j} = \frac{1}{\frac{1}{k_{i,Boden,j}} + \frac{1}{k_{i,ers}}}$$

Mit

$k_{i,Boden} =$   
Bodenfedersteifigkeiten in der Richtung i

	Statische Federsteifigkeiten [kN/m]		Dynamische Federsteifigkeiten [kN/m]	
	$k_{y,stat}$	$k_{z,stat}$	$k_{y,dyn}$	$k_{z,dyn}$
maximal	$3,20 \times 10^5$	$1,20 \times 10^6$	$3,40 \times 10^5$	$1,30 \times 10^6$
minimal	$5,00 \times 10^4$	$2,20 \times 10^5$	$9,90 \times 10^4$	$4,60 \times 10^5$

Tab. 6: Grenzabschätzung statische und dynamische Steifigkeit der Mittelstütze

j: statisch oder dynamisch

$k_{i,ers} =$   
Ersatzfedersteifigkeit des mittleren Stützbauewerks in der Richtung i

Für die Ermittlung der Ersatzfedersteifigkeit wurden folgende Annahmen für das mittlere Stützbauewerk getroffen:

- Je eine Stütze unter jedem Steg des Plattenbalkens
- Breite der Stütze in Querrichtung = Breite des Plattenbalkenstegs = 3,00 m
- Breite der Stütze in Längsrichtung = 1,7 bis 2,1 m (Schlankheit  $\lambda < 25$ )
- Stützhöhe = 6,00 bis 7,50 m

### 6.7 Zusammenfassung

Für die in diesem Kapitel angegebenen Randbedingungen wurden die Brückentypen mit den entsprechenden Parametervariationen für ständige/vorübergehende Lasten und Erdbebenlasten ausgelegt. Die Auswertung der Ergebnisse sind in den Anhängen C bis M dokumentiert. Sie lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die für den Betriebsfall angesetzten Horizontalkräfte aus Anfahren/Bremsen, Wind und Anprall sind deutlich geringer als die aus einem Erdbeben resultierenden Horizontalkräfte. Für keine der untersuchten Brücken ist es daher möglich, vollständig auf einen Erdbebennachweis zu verzichten. Die Stufe I wird daher durch die in DIN EN 1998-1 festgelegte Grenze für sehr niedrige Seismizität von  $a_g \cdot S = 0,5 \text{ m/s}^2$  definiert.
- Mit Ausnahme des Durchlaufträgers mit Stahlbetonquerschnitt und des Durchlaufträgers mit Verbundquerschnitt konnte für alle Brückentypen die Stufe II definiert werden. Die definierte Mindestbewehrung deckt in diesen Fällen die Beanspruchung aus Erdbeben ab. Die Stahlspannungen im Verbundträger sind in allen Fällen geringer als jene im GZT. Die Stabilität der Stahlträger wurde hierbei nicht untersucht. Eine weiterführende Betrachtung der Stahlträger im Rahmen zukünftiger Studien ist anempfohlen.
- Bei dem Einfeldträger Stahlbeton, dem Durchlaufträger Spannbeton und dem Einfeldträger Verbund ist ab einer Stützweite  $L > 20 \text{ m}$  für den Stahlbetonquerschnitt und  $L > 25 \text{ m}$  für den Spannbeton- bzw. den Verbundquerschnitt eine konstruktive Abdeckung der Erdbebenlasten nicht mehr möglich.
- Bei den anderen untersuchten Einfeldträgern und Durchlaufträgern wird die Grenze über die Länge definiert.
- Für Einfeldträger und Durchlaufträger ist es in den meisten Fällen ausreichend, nur die Lager zu bemessen.
- Bei den Rahmenbrücken ist die aufgrund der Erdbebenbelastung erforderliche Bewehrung in der Fahrbahnplatte und in der Widerlagerwand in den meisten untersuchten Fällen geringer als jene im GZT.
- Für Rahmenbrücken resultiert die Zusatzbeanspruchung vorwiegend aus der Massenbeschleunigung des Tragwerks und der aufgelagerten Hinterfüllung. Daher ist es in den meisten Fällen ausreichend, zusätzliche geotechnische Standsicherheitsnachweise unter Berücksichtigung der Massenbeschleunigung zu erfüllen. Dieser Nachweis kann nach Stufe II definiert werden.
- Im Falle der untersuchten Rahmenbrücken zeigt sich eine erhöhte Beanspruchung der Flügelmwände in Horizontalrichtung. Vereinfachte Last-

ansätze nach Stufe II sind in Anhang K, L und M angegeben. Bei höherer Seismizität ist auch die vertikale Bewehrung der Flügelmwände überbeansprucht. In solchen Fällen ist ein vollständiger Nachweis nach DIN 1998-2 angeraten.

- Die Berechnungen der integralen Rahmenbrücken sind nicht ohne weitere Untersuchung auf die Widerlager der gelagerten Brücken übertragbar.
- Der Verbundquerschnitt wurde als Stahlbetonplatte mit stählernen I-Profilen definiert. Der Einfeldträger wurde ebenfalls mit einem Hohlprofil mit vergleichbarer Fläche und vergleichbarem Flächenträgheitsmoment um die starke Achse des Stahlprofils berechnet. Die Ergebnisse weichen  $\pm 10 \%$  von den Ergebnissen des Trägers mit I-Profilen ab. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse des Verbundträgers mit I-Profilen abdeckend für einen Verbundträger mit geschlossenen Profilen sind.

## 7 Vorschläge für eine vereinfachte Erdbebenauslegung von Straßenbrücken (AP 5)

Auf Basis des Konzepts aus Kapitel 5 und dessen Erprobung an verschiedenen, relevanten Brückentypen in Kapitel 6 sind nachfolgend Formulierungsvorschläge für eine vereinfachte Erdbebenauslegung von Straßenbrücken in Deutschland aufbereitet.

### 1. Allgemeines

- (1) Für Brücken der Bedeutungskategorie I brauchen die Vorschriften der DIN EN 1998-2 „Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 2: Brücken“ nicht berücksichtigt werden. Die Definition der Bedeutungskategorie I kann DIN EN 1998-2/NA Tabelle NA.1 entnommen werden.
- (2) In Fällen sehr geringer Seismizität brauchen die Vorschriften der DIN EN 1998-2 nicht berücksichtigt werden. Die Definition von Fällen sehr geringer Seismizität ist der DIN EN 1998-1 zu entnehmen.
- (3) Die Erdbebeneinwirkung  $a_g \cdot S$  wird nach folgender Gleichung ermittelt:

$$a_g \cdot S = \frac{S_{aP,R}}{2,5} \cdot S \cdot \gamma_I \quad (1)$$

Dabei ist

$S_{aP,R}$  spektrale Antwortbeschleunigung im Plateaubereich des Antwortspektrums für das Untergrundverhältnis A-R und eine mittlere Wiederkehrperiode von  $T_{NCR} = 475$  Jahren nach DIN EN 1998-1/NA Bild NA.1 oder der Internetpräsenz des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt);

S Bodenparameter nach DIN EN 1998-1/NA Tabelle NA.3 (S darf auf der sicheren Seite liegend zu 1,5 gesetzt werden);

$\gamma_I$  Bedeutungsbeiwert nach DIN EN 1998-2/NA Tabelle NA.1 ( $\gamma_I$  darf auf der sicheren Seite liegend zu 1,3 gesetzt werden).

(4) Für Erdbebeneinwirkungen sind nur Anforderungen an die Standsicherheit zu erfüllen. Nachweise zur Schadensbegrenzung entfallen.

(5) Voraussetzungen für die Anwendung der vereinfachten Auslegungsregeln sind:

a. Der Bauwerksstandort und die Art des Untergrundes weisen keine besonderen Risiken bezüglich Hangrutschung und Setzung infolge Bodenverflüssigung oder Bodenverdichtung bei Erdbeben auf.

b. Der Baugrund besteht nicht aus mächtigen unverfestigten Ablagerungen in lockerer Lagerung (z. B. lockerer Sand) bzw. solchen in weicher oder breiiger Konsistenz (z. B. Seeton, Schlick), wobei die dominierenden Scherwellengeschwindigkeiten unter 150 m/s liegen.

c. Die Bodeneigenschaften entlang der Brücke schwanken nicht derart, dass mehr als ein Bodentyp an den Auflagern des Brückenüberbaus anzutreffen ist.

(6) Die vereinfachten Auslegungsregeln dürfen für Brücken in Deutschland angewendet werden, wenn folgende Bedingungen und die unter Kapitel (7) bis (9) aufgeführten spezifischen Bedingungen erfüllt sind:

a. Die Brücke liegt im Anwendungsbereich der DIN EN 1998-2.

b. Die Brücke ist für ständige/vorübergehende Lasten nach DIN EN 1991 (z. B. Windlasten, Bremslasten) bemessen.

c. Der Beton hat die Festigkeitsklasse C30/37 bis C50/60, der Bewehrungsstahl hat die Klasse B oder C und der Baustahl hat die Stahlgüte S355 bis S460.

d. Der Querschnitt des Überbaus ist annähernd über die Länge unveränderlich. Die Breite der Brücke entspricht maximal RQ15,5 nach RAS-Q.

e. Die Mindestabmessungen für Bauteildicken nach ZTV-ING Teil 3 und Teil 4 sind eingehalten.

f. Die Brücke ist annähernd gerade und nicht schräg ( $\varphi \leq 20^\circ$  mit  $\varphi$  dem Winkel zwischen Brückenlängsachse und einem rechten Winkel nach DIN EN 1998-2 Bild 4.1).

g. Der Mittelpfeiler der Brücke ist vertikal. Die statische Steifigkeit am oberen Ende des Pfeilers beträgt mindestens  $k_{p,y} = 5 \cdot 10^4$  kN/m in Querrichtung und  $k_{p,z} = 2 \cdot 10^5$  kN/m in Vertikalrichtung. Bei Ermittlung der Steifigkeit muss die Nachgiebigkeit des Bodens berücksichtigt werden, wenn sie mehr als 20 % zur Gesamtverformung beiträgt.

h. In Brückenlängsrichtung ist ein Festlager über dem Widerlager angeordnet. In Brückenquerrichtung ist je Lagerachse ein Lager unverschieblich. Eine schwimmende Lagerung liegt nicht vor.

i. Die Brücke hat keine seismische Isolation.

(7) Die vereinfachten Auslegungsregeln dürfen für Brücken mit statischem System eines Einfeldträgers oder eines Durchlaufträgers mit zwei Feldern und mit Überbauten aus Stahlbeton und Spannbeton angewendet werden, wenn die allgemeinen Bedingungen unter (6) und folgende spezifischen Bedingungen erfüllt sind:

a. Die Brücke ist nach DIN EN 1992-2 bemessen und konstruiert.

b. Die maximale Spannweite  $l$  je Feld beträgt 25 m für Stahlbeton und 40 m für Spannbeton. Die Mindestspannweite darf 0,80-mal die Maximalspannweite nicht unterschreiten.

- c. Der Überbau besteht aus Platten oder Plattenbalken mit durchgehender Fahrbahnplatte. Das Schlankheitsverhältnis liegt zwischen  $l/10$  und  $l/15$  für Stahlbeton und zwischen  $l/15$  und  $l/20$  für Spannbeton.
- d. Der Längsbewehrungsgehalt der Oberflächenbewehrung beträgt jeweils mindestens  $7,5 \text{ cm}^2/\text{m}$ .
- e. Bei Spannbetonbauwerken liegt eine interne Vorspannung im Verbund vor.
- (8) Die vereinfachten Auslegungsregeln dürfen für Brücken mit statischem System eines Einfeldträgers oder einen Durchlaufträgers mit zwei Feldern und mit Überbauten in Verbundbauweise angewendet werden, wenn die allgemeinen Bedingungen unter (6) und folgende spezifischen Bedingungen und erfüllt sind:
- a. Die Brücke ist nach DIN EN 1994-2 bemessen und konstruiert.
- b. Die maximale Spannweite  $l$  je Feld beträgt 50 m. Die Mindestspannweite darf 0,80-mal die Maximalspannweite nicht unterschreiten.
- c. Der Überbau besteht aus offenen oder geschlossenen Stahlquerschnitten mit durchgehender Stahlbeton-Fahrbahnplatte. Die Stahlquerschnitte erfüllen mindestens Querschnittsklasse 3 nach DIN EN 1993-1-1. Das Schlankheitsverhältnis liegt zwischen  $l/18$  und  $l/30$ .
- d. Der Längsbewehrungsgehalt der Stahlbeton-Fahrbahnplatte beträgt jeweils mindestens  $7,5 \text{ cm}^2/\text{m}$  in der oberen und unteren Bewehrungslage.
- (9) Die vereinfachten Auslegungsregeln dürfen für integrale, einfeldrige Rahmenbrücken mit Überbauten aus Stahlbetonplatten, Spannbetonplatten oder in Verbundbauweise angewendet werden, wenn zusätzlich zu Absatz (6) und (7) folgende spezifischen Bedingungen erfüllt sind:
- a. Die maximale Spannweite  $l$  beträgt 15 m für Stahlbeton und Spannbeton sowie 50 m für Überbauten in Verbundbauweise.
- b. Das Schlankheitsverhältnis liegt zwischen  $l/12$  und  $l/15$  für Stahlbeton und für Spannbeton. Für Verbund liegt das Schlankheitsverhältnis zwischen  $l/30$  und  $l/40$ .
- c. Die Widerlager sind nach DIN EN 1992-2 bemessen und konstruiert inklusive rissebeschränkender Mindestbewehrung.
- d. Die maximale Höhe  $H$  der Widerlager beträgt 8 m.
- e. Die Dicke der Widerlagerwände beträgt mindestens 60 cm.
- f. Die Dicke der Flügelwände beträgt mindestens 60 cm. Die Flügelwände sind parallel zueinander und weisen eine Schiefwinkligkeit von maximal  $20^\circ$  auf ( $\varphi \leq 20^\circ$ ).
- g. Die Widerlager sind flach auf einer rechteckigen Fundamentplatte gegründet.

## 2. Vereinfachte Auslegungsregeln für Brücken

- (1) Für Brücken nach Kapitel 1 darf auf einen rechnerischen Nachweis verzichtet werden, wenn die Bedingungen nach Absatz (2), (3), (7) und (8) eingehalten sind.
- (2) Die Erdbebeneinwirkung  $a_g \cdot S$  nach Gleichung (1) muss kleiner als dem der Spannweite  $l$  zugeordnete Grenzwert nach Tabelle 7 sein.
- (3) Feste Lager müssen in der seismischen Einwirkungskombination für Lasten aus Betrieb und für horizontale elastische Erdbebenersatzlasten  $F_{b,x,e}$  in Längsrichtung und  $F_{b,y,e}$  in Querrichtung nach Absatz (4) sowie vertikale elastische Erdbebenersatzlasten nach Absatz (5) gemäß den einschlägigen Regelwerken ausgelegt werden. Die Erdbebenersatzlasten sind im Massenschwerpunkt des Überbaus anzusetzen. Die Verteilung der Gesamterdbebenkräfte auf die Auflager erfolgt entsprechend dem Lagerkonzept. Das Zusammenwirken der Horizontalkomponenten der Erdbebeneinwirkung darf nach Absatz (7) berücksichtigt werden. Die Teilsicherheitsbeiwerte auf der Widerstandsseite dürfen vereinfacht gleich denen für ständige/vorübergehende Lasten gewählt werden.
- (4) Die horizontal elastische Erdbebenersatzlast  $F_{b,h,e} = F_{b,x,e} = F_{b,y,e}$  darf wie folgt bestimmt werden:

$$F_{b,e} = S_{dmax,e} \cdot M \quad (2)$$

Dabei ist

Stat. System	Einfeldträger				2-Feld-Durchlaufträger		Rahmen		
Querschnitt *)	PB	PB	PB	PL	PB	PL	PL	PL	PB
Material *)	StB	SpB	VB	StB	SpB	StB	StB	SpB	VB
Spannweite l [m]	Grenzwerte für $a_g \cdot S$ für eine vereinfachte Erdbebenauslegung [m/s <sup>2</sup> ]								
≤ 10	3,0	3,0	1,0	4,0	1,0	4,0	2,0	1,0	2,0
> 10 und ≤ 15	1,5	3,0	1,0	-	1,0	-	2,0	1,0	2,0
> 15 und ≤ 20	1,0	3,0	1,0	-	1,0	-	-	-	2,0
> 20 und ≤ 25	-	3,0	1,0	-	1,0	-	-	-	2,0
> 25 und ≤ 30	-	3,0	-	-	-	-	-	-	2,0
> 30 und ≤ 35	-	3,0	-	-	-	-	-	-	2,0
> 35 und ≤ 40	-	2,5	-	-	-	-	-	-	2,0
> 40 und ≤ 45	-	-	-	-	-	-	-	-	2,0
> 45 und ≤ 50	-	-	-	-	-	-	-	-	2,0

\*) PB = Plattenbalken, PL = Platte, StB = Stahlbeton, SpB = Spannbeton, VB = Verbund

Tab. 7: Grenzwerte für [m/s<sup>2</sup>] für eine vereinfachte Erdbebenauslegung nach Kapitel 2.

$$S_{dmax,e} = S_{aP,R} \cdot S \cdot \gamma_I;$$

M effektive Gesamtmasse des Bauwerks, die nach Absatz (6) berechnet wird;

$S_{aP,R}, S, \gamma_I$  siehe Absatz 1.(2).

(5) Die vertikale elastische Erdbebenersatzlast entspricht mit  $F_{b,v,e} = 0,7 \cdot F_{b,h,e}$  mit  $F_{b,h,e}$  nach Absatz (4).

(6) Die Gesamtmasse M wird unter Berücksichtigung aller ständigen Einwirkungen inklusive der Masse des Überbaus und 50 % der Masse des Pfeilers sowie 20 % der Verkehrslasten (LM 1) ermittelt.

(7) Das Zusammenwirken der Komponenten der Erdbebeneinwirkung darf durch folgende drei Kombinationen berücksichtigt werden:

$$a) A_{Ed} = E_{Edx} + 0,30 \cdot E_{Eddy} + 0,30 \cdot E_{Edz} \quad (3)$$

$$b) A_{Ed} = 0,30 \cdot E_{Edx} + E_{Eddy} + 0,30 \cdot E_{Edz}$$

$$c) A_{Ed} = 0,30 \cdot E_{Edx} + 0,30 \cdot E_{Eddy} + E_{Edz}$$

Dabei ist

“+“ „zu kombinieren mit“;

$E_{Edx}, E_{Eddy}$  bzw.  $E_{Edz}$  die Beanspruchungsgröße des Lagers infolge der Komponente der Erdbebeneinwirkung in Längs-, Quer- bzw. Vertikalrichtung nach Absatz (4) und (5).

(8) Verschiebliche Lager müssen so ausgebildet sein, dass sie Bemessungswert der Verschiebung  $d_{Ed}$  aufnehmen können.  $d_{Ed}$  darf wie folgt ermittelt werden:

$$d_{Ed} = d_G + 0,5 \cdot d_T + 1,2 \cdot d_E \quad (4)$$

Dabei ist

$d_G$  Langzeitverschiebung aufgrund ständiger und quasi-ständiger Einwirkungen;

$d_T$  Verschiebungen aufgrund Temperaturbewegungen;

$d_E$  Verschiebung infolge Erdbeben; vereinfachend darf  $d_E = 70$  mm angenommen werden.

(9) An verschieblichen Endauflagern muss eine Mindestauflagerlänge  $l_{ov}$  vorgesehen werden. Die Mindestauflagerlänge  $l_{ov}$  darf wie folgt ermittelt werden:

$$l_{ov} = l_m + d_{Ed}$$

Dabei ist

$l_m$  die Mindestlänge des Lagers zur Übertragung der vertikalen Auflagerkraft, jedoch nicht kleiner als 200 mm;

$d_{Ed}$  nach Gleichung (4).

(10) Zwischen konstruktiv unabhängige Einheiten der Brücke (z. B. Überbau und Widerlager) muss für Verschiebungen in Längsrichtung eine Fuge mit einer lichten Breite  $d_{Ed}$  nach Ab-

satz (8) vorgesehen werden, um ein Aneinanderschlagen infolge Erdbeben zu verhindern.

- (11) Der Lastabtrag der Lagerkräfte in Widerlager und Mittelpfeiler muss sichergestellt sein.
- (12) Fundamente integraler Rahmenbrücken müssen in der seismischen Einwirkungskombination für Lasten aus Betrieb und für horizontale elastische Erdbebeneinsatzlasten  $F_{b,x,e}$  in Längsrichtung und  $F_{b,y,e}$  in Querrichtung nach Absatz (4) gemäß den einschlägigen Regelwerken ausgelegt werden. Die Erdbebeneinsatzlasten sind im Massenschwerpunkt anzusetzen. In Gleichung (2) ist als Masse zusätzlich die Masse der Hinterfüllung zu berücksichtigen.
- (13) Flügelwände integraler Rahmenbrücken müssen in der seismischen Einwirkungskombination für Lasten aus Betrieb und für horizontale elastische Erdbebeneinsatzlasten  $F_{b,x,e}$  in Längsrichtung und  $F_{b,y,e}$  in Querrichtung nach Absatz (4) sowie dem dynamische Erddruck infolge Erdbeben gemäß den einschlägigen Regelwerken ausgelegt werden. In Gleichung (2) ist als Masse die Masse der Flügelwand zu berücksichtigen.

### 3. Vereinfachte Berechnungsverfahren für Brücken

- (1) Für Brücken, die den in Kapitel 1 genannten Kriterien genügen, darf die Standsicherheit mit äquivalenten statischen Ersatzlasten nach Absatz (4) nachgewiesen werden. Für schräge Brücken siehe Absatz (7).
- (2) Die Standsicherheit des Überbaus, der Widerlager und der Pfeiler muss für die horizontalen Bemessungs-Erdbebeneinsatzlast  $F_{b,x,d}$  in Längsrichtung und  $F_{b,y,d}$  in Querrichtung nach Absatz (4) und der seismischen Einwirkungskombination nach Absatz (8) gemäß den Anforderungen der einschlägigen Eurocodes nachgewiesen werden.
- (3) Die Standsicherheit der Gründung und die Schubtragfähigkeit von Betonbauteilen muss für die horizontale elastische Erdbebeneinsatzlast nach Absatz 2.(4) und der seismischen Einwirkungskombination nach Absatz (5) gemäß den einschlägigen Regelwerken nachgewiesen werden. Lager und seismische Fugen

müssen nach Absatz 2.(3), (8) und (9) nachgewiesen werden.

- (4) Die horizontale Bemessungs-Erdbebeneinsatzlast  $F_{b,d} = F_{b,x,d} = F_{b,y,d}$  darf wie folgt bestimmt werden:

$$F_{b,d} = S_{dmax,d} \cdot M \quad (5)$$

Dabei ist

$$S_{dmax,d} = S_{aP,R} / 1,5 \cdot S \cdot \gamma_I;$$

$M, S, \gamma_I$  nach Gleichung (2).

- (5) Die Zustandsgrößen dürfen an Balkentragwerk und Flächentragwerken ermittelt werden.
- (6) Die Verteilung der horizontalen Erdbebenkräfte auf den Überbau darf vereinfacht affin zur Massenverteilung erfolgen (d. h. als Linienlast bei Balkenelementen und als Flächenlast bei Flächenelemente; alternativ darf  $S_{dmax,d}$  als Ersatzbeschleunigung verwendet werden). Zur Erfassung von Effekten aus der realen Modalform müssen Biegemomente um 25 % erhöht werden.
- (7) Für schräge Brücken ( $> 20^\circ$ ) ist ein Moment  $M_t$  um die vertikale Achse infolge zufälliger Exzentrizität zu berücksichtigen. Sehr schräge Brücken ( $> 45^\circ$ ) sind in diesem vereinfachten Berechnungsverfahren nicht geregelt. Für schräge Brücken müssen die Zustandsgrößen mittels Flächentragwerken ermittelt werden.

$$M_t = F_{b,x,d} \cdot (0,08 \cdot B) + F_{b,y,d} \cdot 0,08 \cdot L \quad (6)$$

Dabei ist

$$F_{b,x,d}, F_{b,y,d} \quad \text{nach Gleichung (5);}$$

$$L, B \quad \text{Gesamtlänge bzw. Gesamtbreite des Überbaus.}$$

- (8) Das Zusammenwirken der horizontalen Komponenten der Erdbebeneinwirkung darf durch folgende beiden Kombinationen berücksichtigt werden:

$$a) A_{Ed} = E_{Edx} \text{ „+“ } 0,30 \cdot E_{E dy} \quad (7)$$

$$b) A_{Ed} = 0,30 \cdot E_{Edx} \text{ „+“ } E_{E dy}$$

Dabei ist

„+“ „zu kombinieren mit“;

$E_{Edx}$  bzw.  $E_{Edy}$  die Beanspruchungsgröße infolge der Komponente der Erdbebeneinwirkung in Längs- bzw. Querrichtung nach Absatz (4).

- (9) Der Bemessungswert  $E_d$  der Beanspruchungsgrößen in der Erdbeben-Bemessungssituation muss nach folgender Kombination ermittelt werden:

$$E_d = E\left\{\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_{Ed} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}\right\}$$

Dabei ist

$G_{k,j}$  charakteristischer Wert einer ständigen Einwirkung (z. B. Eigengewicht, Ausbaulast, Erddruck);

$P$  Maßgebender repräsentativer Wert einer Vorspannung;

$A_{Ed}$  Bemessungswert einer Einwirkung infolge Erdbeben nach Gleichung (7);

$Q_{k,i}$  charakteristischer Wert einer veränderlichen Einwirkung  $i$ ;

$\psi_{k,i}$  Beiwert für den quasi-ständigen Wert einer veränderlichen Einwirkung  $i$

- (10) Im Pfeiler darf der Bemessungswert der bezogenen Längskraft  $v_d = N_{Ed}/(A_c \cdot f_{cd})$  in der Erdbeben-Bemessungssituation den Wert 0,6 nicht überschreiten.

## Literatur

- [1] DIN EN 1998-2:2011-12: Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 2: Brücken; Deutsche Fassung EN 1998-2:2005 + A1:2009 + A2:2011 + AC:2010; DIN Deutsches Institut für Normung; Ausgabedatum: Dezember 2011.
- [2] DIN EN 1998-2/NA: 2011-03: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 2: Brücken; DIN Deutsches Institut für Normung; Ausgabedatum: März 2011.
- [3] DIN EN 1998-1:2010-12: Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten; Deutsche Fassung EN 1998-1:2004 + AC:2009; DIN Deutsches Institut für Normung; Ausgabedatum: Dezember 2010.
- [4] DIN EN 1998-1/NA:2011-01: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbau; DIN Deutsches Institut für Normung; Ausgabedatum: Januar 2011.
- [5] DIN EN 1998-1/NA:2020 (ENTWURF): Entwurf für den Nationalen Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbau; DIN Deutsches Institut für Normung; Mai 2020
- [6] NF EN 1998-2/NA Eurocode 8 – Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 2: Brücken – National Anhang zu NF EN 1998-2:2006 – Brücken; AFNOR; Ausgabedatum: 06. April 2013.
- [7] SIA 261:2014: Einwirkungen auf Tragwerke; Schweizer Ingenieur- und Architektenverein; Ausgabedatum: 01. Juli 2014.
- [8] IMBSEN, R.A.; Imbsen Consulting: proposed AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design, Subcommittee for Seismic Effects on Bridges T-3; März 2007;

- <http://www.ce.memphis.edu/7119/pdfs/aash-to/2007-03-09guidespec.pdf> (05.02.2020)
- [9] NHI Course No. 130093 and 130093A, LFRD Seismic Analysis and Design of Bridges, Reference manual; U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration; October 2014.
- [10] NZ SP/M/022: Bridge manual SP/M/022, Third Edition, Amendment 3; NZ Transport Agency; Ausgabedatum: Oktober 2018.
- [11] TM: 1-2018-10705 I.NPF 2 (ENTWURF): Entwurf für 1-2018-10705 I.NPF 2 zu Ril 804: Erdbebenbeanspruchung von Eisenbahnbrücken und sonstigen Ingenieurbauwerken; DB Netz AG, ZENTRALE; Stand 17.06.2019.
- [12] Leitfaden: Auslegung von Eisenbahnbrücken unter Erdbebenbeanspruchung in Deutschland, Ausgabe 1: Allgemeines und Rahmenbauwerken; DB Netz AG; Version 0.9; Stand: 06.06.2019.
- [13] Vorläufige Regeln für die Erdbebenbemessung von Brücken; Regierungspräsidium Tübingen; Stand Juni 2012.
- [14] GSHAP GIARDINI, D.; GRÜNTAL, G.; SHEDLOCK, K. M. ; ZHANG, P.: The GSHAP Global Seismic Hazard Map. In: LEE, W.; KANAMORI, H.; JENNINGS, P.; KISSLINGER, C. (eds.): International Handbook of Earthquake & Engineering Seismology, International Geophysics Series 81 B, Academic Press, Amsterdam, 1233-1239, 2003.
- [15] Plan Séisme: <http://www.planseisme.fr/> (06.04.2020)
- [16] DIN EN 1991-1-4:2010-12 Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten; Deutsche Fassung EN 1991-1-4:2005 + A1:2010 + AC:2010; DIN Deutsches Institut für Normung; Ausgabedatum: Dezember 2010.
- [17] DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten ; DIN Deutsches Institut für Normung; Ausgabedatum: Dezember 2010.
- [18] DIN EN 1991-2:2010-12: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken; Deutsche Fassung EN 1991-2:2003 + AC:2010; DIN Deutsches Institut für Normung; Ausgabedatum: Dezember 2010.
- [19] DIN EN 1991-2/NA:2012-08: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken; DIN Deutsches Institut für Normung; Ausgabedatum: August 2012.
- [20] Datenbank des GFZ, Helmholtz-Zentrum, Potsdam; <http://www-app5.gfz-potsdam.de/d-eqhaz16/> (08.04.2020)
- [21] Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung, Abteilung Straßenbau; Sammlung Brücken- und Ingenieurbau, Erhaltung, Anweisung Straßeninformationsbank Segment Bauwerksdaten, ASB-Ing; Stand: 10/2013
- [22] ASCE 7-10: Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures; American Society of Civil Engineers; 2010.
- [23] DIN EN 1998-5:2010: Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 5: Gründungen, Stützbauwerke und geotechnische Aspekte; DIN Deutsches Institut für Normung; Dezember 2010.
- [24] DIN 4149:2005-04: Bauten in deutschen Erdbebengebieten, Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten; DIN Deutsches Institut für Normung; April 2005.
- [25] RAPPS, C.; Risikobasierte Erdbebenkarten für Deutschland; Master- und Projektarbeit; Institut für konstruktiven Ingenieurbau, Universität Kassel; September 2018.
- [26] DIN EN 1990:2010-12: Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010; DIN Deutsches Institut für Normung; Dezember 2010.
- [27] E-Mail von Dipl.-Ing. R. Holst am 21.02.2020 an Wölfel Engineering, „WG: FE 15.651 „vereinfachter Erdbebennachweis von Brücken - Bestandsdaten Brückenbauwerke: Bestäti-



- gung notwendig“ mit der Anlage „erdbebenprojekt\_mit\_stützhöhe\_Abgabe.xlsx“
- [28] ARS 22/2012: Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 22/2012, Sachgebiet 05.2: Brücken- und Ingenieurbau; Grundlagen; Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung; 26.11.2012.
- [29] RiZ-ING: Richtzeichnungen für Ingenieurbauten; Entwurf; [https://www.bast.de/BASt\\_2017/DE/Publikationen/Regelwerke/Ingenieurbau/Entwurf/RIZ-ING.html?nn=1818004](https://www.bast.de/BASt_2017/DE/Publikationen/Regelwerke/Ingenieurbau/Entwurf/RIZ-ING.html?nn=1818004); Stand: 2019/02.
- [30] GEIßLER, K.: Handbuch Brückenbau, Entwurf, Konstruktion, Berechnung, Bewertung und Ertüchtigung; Wilhelm Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften; 2014.
- [31] Sofistik 2020; Service Pack 2020-5.1 Build 2; Sofistik AG.
- [32] DIN EN 1991-1-5:2010-12: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-5: Allgemeine Einwirkungen – Temperatureinwirkungen; Deutsche Fassung EN 1991-1-5:2003 + AC:2009; DIN Deutsches Institut für Normung; Dezember 2010.
- [33] DIN EN 1991-1-5/NA:2010-12: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-5: Allgemeine Einwirkungen – Temperatureinwirkungen; DIN Deutsches Institut für Normung; Dezember 2010.
- [34] BISCH, P. et al: Eurocode 8: Seismic design of buildings, worked examples, JRC, EUR 25204 EN, 2012.e
- [35] DIN EN 1990/NA/A1: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung; Änderung A1
- Bild 3: Seismisches Strukturverhalten nach DIN EN 1998-2:2011 [2]
- Bild 4: Abminderung eines elastischen Antwortspektrums durch den Verhaltensbeiwert  $q$  (beispielhaft)
- Bild 5: Darstellung der räumlichen Verteilung der spektralen Antwortbeschleunigung für das Untergrundverhältnis A-R im Plattebereich  $S_{ap,R}$  für eine Wiederkehrperiode  $T_{NCR} = 475$  Jahre aus [5]
- Bild 6: Statischer Erddruck  $E_0$ , seismische (dynamische) Erddrücke  $\Delta E_d$  und Bettungsfeder  $k_x(z)$  für Rahmenbrücken [11]
- Bild 7: Tragwerksarten von Brücken in Deutschland gebaut 2002 bis 2019
- Bild 8: Balken- und plattenartige Tragwerke, Querschnittstypen
- Bild 9: Balken- und plattenartige Tragwerke, Material des Überbaus
- Bild 10: Balken- und plattenartige Tragwerke, Verteilung der Spannweiten
- Bild 11: Rahmenartige Tragwerke, statisches System
- Bild 12: Rahmenartige Tragwerke, Material des Überbaus
- Bild 13: Balken- und plattenartige Tragwerke, Verteilung der Spannweiten
- Bild 14: Bogenartige Tragwerke, konkrete Art des Tragwerks
- Bild 15: Darstellung der Kappe aus [30]
- Bild 16: Darstellung Lastmodell 1 nach DIN EN 1991-2 [18]
- Bild 17: Darstellung Windlastmodell nach DIN EN 1991-1-4 [16]
- Bild 18: Spektrum aus DIN EN 1998-1/NA:2020 [5]
- Bild 19: Lagerschema einfeldrige und zwei-feldrige Brücke

## Bilder

- Bild 1: Einmassenschwinger mit Fußpunktanregung
- Bild 2: Form und Beschreibung des elastischen Beschleunigung-Antwortspektrums [5]

## Tabellen

- Tab. 1: Bodenparameter  $S$  mit  $S_{ap,R}$  in  $[m/s^2]$
- Tab. 2: Balken- und plattenartige Tragwerke, statisches System im Längsrichtung
- Tab. 3: Verteilung der Teilbauwerke über die Spektralbeschleunigung
- Tab. 4: Modifizierungsbeiwerte für abweichende Parameter
- Tab. 5: Anpralllasten nach DIN EN 1991-2/NA:2012-08 [19]
- Tab. 6: Grenzabschätzung statische und dynamische Steifigkeit der Mittelstütze
- Tab. 7: Grenzwerte für  $a_g \cdot S$   $[m/s^2]$  für eine vereinfachte Erdbebenauslegung nach Kapitel 2

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

#### 2017

**B 135: Wirksamkeit automatischer Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln**

Kohl, Kammerer, Leucker, Leismann, Mühlberger, Gast  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 136: HANV als Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-1-Schäden**

Stranghöner, Lorenz, Raake, Straube †, Knauff  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 137: Verstärkung von Stahlbrücken mit hochfestem Beton**

Mansperger, Lehmann, Hofmann, Krüger, Lehmann € 14,50

**B 138: Rückhaltesysteme auf Brücken – Einwirkungen aus Fahrzeuganprall und Einsatz von Schutzeinrichtungen auf Bauwerken**

Mayer  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 139: Unterstützung der Bauwerksprüfung durch innovative digitale Bildauswertung – Pilotstudie**

Sperber, Gößmann, Reget, Müller, Nolden, Köhler, Kremkau € 16,50

**B 140: Untersuchungen zum Beulnachweis nach DIN EN 1993-1-5**

U. Kuhlmann, Chr. Schmidt-Rasche, J. Frickel, V. Pourostad  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 141: Entwurf von hydrogeothermischen Anlagen an deutschen Straßentunneln**

Moormann, Buhmann  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 142: Einsatz von offenporigen Belägen in Einhausungs- und Tunnelbauwerken**

Baltzer, Riepe, Zimmermann, Meyer, Brungsberg, Mayer, Brenberger, Jung, Oeser, Meyer, Koch, Wienecke  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### 2018

**B 143: Analyse des menschlichen Verhaltens bei Aktivierung von stationären Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln**

Mühlberger, Gast, Plab, Probst € 15,50

**B 144: Nachrechnung von Stahl- und Verbundbrücken – Systematische Datenauswertung nachgerechneter Bauwerke**

Neumann, Brauer € 16,50

**B 145: 8. BAST-Tunnelsymposium vom 6. Juni 2018 in der Bundesanstalt für Straßenwesen Bergisch Gladbach – Tagungsband**

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### 2019

**B 147: Vorbereitung von Großversuchen an Stützkonstruktionen aus Gabionen**

Blosfeld, Schreck, Decker, Wawrzyniak  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### 2020

**B 146: Beurteilung der Ermüdungssicherheit von vollverschlossenen Seilen mit Korrosionsschäden**

Paschen, Dürer, Gronau, Rentmeister  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 148: Übergreifungslängen von Betonstahlbewehrung Maßgebende Einflussparameter in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit**

Maurer, Bettin  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 149: Untersuchungen zum Einfluss von Modellparametern auf die Lebensdauerprognose für Brückenbauwerke**

Keßler, Gehlen € 16,00

**B 150: Beurteilung der Querkraft- und Torsionstragfähigkeit von Brücken im Bestand – erweiterte Bemessungsansätze**

Hegger, Herbrand, Adam, Maurer, Gleich, Stuppak, Fischer, Schramm, Scheufler, Zilch, Tecusan  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 151: Verfahren und Modelle zur Quantifizierung der Zuverlässigkeit von dauerüberwachten Bestandsbrücken**

Ralbovsky, Prammer, Lachinger, Vorwagner  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 152: Bemessung von Kopfbolzendübeln in Randlage unter Vermeidung eines Versagens infolge Herausziehens**

Kuhlmann, Stempniewski  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 153: Kanalbrücke Berkenthin mit temperierter Fahrbahn – Pilotprojekt**

Eilers, Friedrich, Quaas, Rogalski € 15,00

**B 154: Korrosionsschutz von Brückenseilen – Wickelverfahren mit Korrosionsschutzbändern**

Friedrich € 9,00

**B 155: Innovativer und nachhaltiger Ersatzneubau von Betonbrücken**

Wirker, Donner  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 156: Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Monitoringmaßnahmen – Entwicklung eines Konzepts für die Analyse von Nutzen und Kosten**

Schubert, Faber, Betz, Straub, Niemeier, Ziegler, Walther, Majka  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 157: 9. BAST-Tunnelsymposium – Tagungsband**

€ 16,00

**B 158: Beanspruchung orthotroper Fahrbahnplatten infolge der Erneuerung des Brückenbelags**

Friedrich, Eilers, Quaas, Robrecht, Schamne, Staack  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 159: Lebenszyklusmanagement für Bauwerke der Verkehrsinfrastruktur – Entwicklung eines verkehrsträgerübergreifenden, indikatorgestützten Systems**

Lebhardt, Seiler, Gerdas € 15,50

## 2021

### B 160: Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke – Datenerfassungsstrategien und Datenanalyse für intelligente Kalottenlager

Butz

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### B 161: Lagerwege von Brücken

Butz, Mack, Krawtschuk, Maldonado

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### B 162: Druckgurtanschluss in Hohlkastenbrücken – Ingenieurmodelle zur wirklichkeitsnahen Ermittlung der Tragfähigkeit

Müller

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### B 163: Dauerüberwachung von Bestandsbrücken – Quantifizierung von Zuverlässigkeit und Nutzen

Hindersmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### B 164: Intelligente Bauwerke – Verfahren zur Auswertung, Verifizierung und Aufbereitung von Messdaten

Kleinert, Sawo

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### B 165: Reaktions- und Wiederherstellungsprozess für die Straßeninfrastruktur nach disruptiven Ereignissen

Deublein, Roth, Bruns, Zulauf

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### B 166: Verfahren und Modelle zur Quantifizierung der Verfügbarkeit und Sicherheit von Elementen der Straßeninfrastruktur bei außergewöhnlichen Ereignissen

Finger, Stolz, Fischer, Hasenstein, Rinder

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### B 167: Erfahrungssammlung zu Fahrbahnübergängen aus Polyurethan

Staeck, Eilers

€ 15,50

### B 168: Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke Messtechnische Erfassung von Verkehrsdaten auf der Basis von instrumentierten Fahrbahnübergängen

Rill

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### B 169: Entwicklung von Bemessungshilfen für bestehende Stahlbetonkragarme auf Basis nichtlinearer Berechnungen

Neumann, Brauer

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### B 170: Feuerverzinken als dauerhafter Korrosionsschutz für Stahlverbundbrücken – Praxisbericht zum Pilotprojekt

Ansorge, Franz, Düren-Rost, Friedrich, Huckshold, Lebelt, Rademacher, Ungermann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### B 171: Bauwerksprüfung gemäß DIN 1076 – Unterstützung durch (halb-) automatisierte Bildauswertung durch UAV (Unmanned Aerial Vehicles – Unbemannte Fluggeräte)

Morgenthal, Rodehorst, Hallermann, Debus, Benz

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### B 172: Querkrafttragfähigkeit von Spannbetonbrücken – Erfassung von Spannungszuständen in Spannbetonversuchsträgern mit Ultraschallsensoren

Niederleithinger, Werner, Galindo, Casares, Bertschat, Mierschke, Wang, Wiggenhauser

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### B 173: Vermeidung chloridinduzierter Korrosion in Tunnelinnenschalen aus Stahlbeton

Rudolph, Orgass, Schneider, Lorenz, Reichel, Schmidt

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2022

### B 174: Kunststoffabdichtungen unter Brückenbelägen

Dudenhöfer, Rückert

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### B 175: Statische Vergleichsberechnung von gemauerten Gewölbebrücken zur Validierung des Entwurfs der neuen Nachrechnungsrichtlinie (Mauerwerk)

Purtak, Möbius

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### B 176: Erfahrungssammlung zu Fahrbahnübergängen aus Asphalt in geringen Abmessungen – Belagsdehnfugen

Staeck

€ 15,00

### B 177: Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke Synchronisation von Sensorik und automatisierte Auswertung von Messdaten

Freundt, Böning, Fischer, Lau

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### B 178: Intelligente Brücke – Reallabor Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn

Windmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### B 179: Erarbeitung eines vereinfachten Nachweisformats für die Erdbebenbemessung von Brückenbauwerken in Deutschland

Bauer, Gündel, Ries, Karius, Honerboom, Haug

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG  
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen  
Tel.+(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.