



Erdbeben bei Yogyakarta (Indonesien) am 27.05.2006, Magnitude $M_w=6.3$; Dr.-Ing. Franz-Hermann Schlüter, SMP Ingenieure im Bauwesen GmbH

Dr.-Ing. Joachim Kretz

Erdbebensicherung von Bauwerken

Berechnungsgrundlagen und -modelle zur Auslegung von Bauwerken gegen seismische Einwirkungen

Mit diesem Artikel wird eine Einführung in die Thematik „Erdbebenbeanspruchung und Erdbebennachweise von Baukonstruktionen“ gegeben. Beginnend mit den Grundlagen zur seismischen Schwingungserregung und Darstellung der Einwirkungen auf Bauwerke aus Erdbeben, werden anschließend die Reaktionen (Antworten) des Bauwerks untersucht. Die dazu anzuwendenden Rechenverfahren werden vorgestellt, wobei das multimodale Antwortspektrenverfahren näher erläutert wird. Dabei werden die in der nationalen Norm, der DIN 4149, angegebenen Regelungen zur linear-elastischen Tragwerksanalyse im Erdbebenfall vorgestellt.

Ziele der erdbebensicheren Auslegung von Baukonstruktionen sind der Schutz von Menschenleben, die Begrenzung von Schäden und die Gewährleistung der Funktionstüchtigkeit baulicher Anlagen, die von Bedeutung für die öffentliche Sicherheit und Infrastruktur sind (z. B. Krankenhäuser, Schulen, ...). Um ein hohes Maß an Erdbebensicherheit zu erreichen ist die Einhaltung grundlegender Entwurfsprinzipien sicherzustellen. Diese Entwurfsprinzipien sind in der Literatur [4, 6, 8, 10] und in den maßgebenden Erdbebennormen [1, 2, 3] ausführlich beschrieben, so dass sich hier

auf die reine Auflistung der Prinzipien beschränkt wird. Zu den grundlegenden Entwurfsprinzipien gehören die konstruktive Einfachheit, die Regelmäßigkeit der Steifigkeits-, Festigkeits- und Massenverteilung im Grund und Aufriss, die Sicherstellung der Scheibenwirkung der Decken in ihrer Ebene mit wirksamen Anschlüssen an die vertikalen Bauteile, die Bevorzugung symmetrischer Bauformen, die Vermeidung spröder Versagensformen in vertikallastabtragenden Bauteilen (Stützen, Wände, ...) sowie eine ausreichend dimensionierte Gründung.

1 Einführung

Die Realisierung erdbebensicherer Bauwerke kann auf mehrere Arten erfolgen. Sehr steife Bauwerke, die die im Erdbebenfall auftretenden Massenkräfte im elastischen Bereich aufnehmen können, stehen an einem Ende des Spektrums. Das andere Extrem bilden sehr weiche Tragwerke (mit großer Eigenperiode), die beispielsweise durch Basisisolierung realisiert werden können. Dabei bewegt sich der Baugrund quasi unabhängig vom Bauwerk, auf das nur geringe Kräfte übertragen werden. Die Mehrzahl der üblichen Bauwerke entspricht einer Ausführung zwischen diesen Extremen. Diese Bauwerke weisen eine mehr oder weniger starke Duktilität auf und können dadurch Spannungsspitzen abbauen bzw. seismische Energie dissipieren.

Die DIN 4149 „Bauten in deutschen Erdbebengebieten“ [1] von 2005 ist die maßgebende deutsche Erdbebenbaunorm. Sie gilt für den Entwurf, die Bemessung und die Konstruktion baulicher Anlagen des üblichen Hochbaus aus Stahlbeton, Stahl, Holz und Mauerwerk. Sie gilt nicht für „Sonderbauwerke“ (z.B. Brücken, Kraftwerke, Produktionsanlagen). DIN 4149 dient als Grundlage für die Erstellung des Nationalen Anhangs zum Eurocode 8. Mit Einführung des Eurocodes 8 werden auch die Sonderbauwerke (Brücken, Silos, Tanks, Rohrleitungen, Türme, Maste und Schornsteine) in verschiedenen Teilen des EC 8 geregelt.

2 Seismische Schwingungserregung

Plötzliche geologische Bruchvorgänge in der Erdkruste führen zum Entstehen von Erdbeben. Der Bevölkerung wird ein Erdbeben i.d.R. durch seine Magnitude, die ein Maß für die am Herd (Hypozentrum) freigesetzte Energie darstellt, mitgeteilt. Die freigesetzte Energie strahlt in Form von Raumwellen entweder als Längswellen (Kompressionswellen) oder als Scherwellen (Transversalwellen) ab. Diese seismischen Wellen breiten sich im Untergrund aus, erreichen die Oberfläche, an der sie starke Bodenbewegungen hervorrufen. Diese Bodenbewegungen werden mittels Seismografen aufgezeichnet, die neben den Amplituden und der Dauer der Starkbebenphase auch den Frequenzgehalt der Bodenbeschleunigung als wichtige Eigenschaften der Erdbebeneinwirkung registrieren. Diese Werte der Erdbebeneinwirkung hängen vom Abstand des Standortes vom Hypozentrum, dem geologischen Untergrund, den die Wellen durchlaufen, und von den lokalen Baugrundverhältnissen ab.

Die zweite Kenngröße eines Erdbebens, die Intensität, charakterisiert die lokale Wirkung innerhalb einer örtlich begrenzten Region. Die seismologische Kennzeichnung der Erdbeben über Magnitude und Intensität ist jedoch kein Mittel zum Entwurf von Ingenieurbauten.

2.1 Tragverhalten eines Bauwerks unter seismischer Erregung

Um ein Bauwerk gegen seismische Einwirkungen auszulegen, ist eine quantitative Beschreibung der seismisch induzierten Bodenbewegungen erforderlich. Hierzu eignen sich direkte Zeitverläufe der Bodenbewegung oder Antwortspektren.

Bei einer Erdbebenerregung treten stets drei Beschleunigungskomponenten gemeinsam auf. Die von der vertikalen Bodenbeschleunigung ausgehende Einwirkung ist für die üblichen Tragwerke des Hochbaus (außer für Brücken, Kragkonstruktionen) weniger relevant, da diese Bauwerke statisch bereits für die Vertikallastabtragung ausgelegt sind. Im Folgenden werden deshalb die Betrachtungen auf die horizontalen seismischen Einwirkungen beschränkt.

Tragwerke reagieren auf horizontale Bodenbeschleunigungen mit bauwerksspezifischen Beschleunigungen, Geschwindigkeiten und Verschiebungen. Starre Bauwerke erfahren die gleichen horizontalen Bewegungen wie der Boden. Die üblichen Tragwerke sind jedoch mehr oder weniger nachgiebig und reagieren deshalb auf die seismische Erregung mit entsprechenden Schwingungen. Die Verläufe der Boden- und Bauwerksbewegungen sind nicht gleich, d. h. das Tragwerk schwingt zusätzlich relativ zum Fundament (Bild 1). Je größer die Bauwerksschlankheit ist, umso ausgeprägter ist der Schwingungseinfluss [4]. Dieser Schwingungseinfluss wirkt sich in einer Verringerung oder in einer Vergrößerung der Tragwerksbeanspruchung gegenüber dem Starrkörperansatz aus.

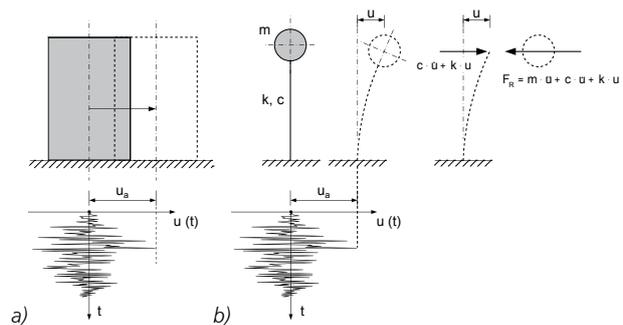


Bild 1. Fußpunkterregung eines Bauwerks
a) starres Bauwerk
b) Einmassenschwinger nach [4]

2.2 Antwortspektren

Um die Beanspruchung eines Tragwerks an einem bestimmten Standort infolge der dort angenommenen/gemessenen seismischen Erregung „realitätsnah“ kennzeichnen zu können, sind die Antwortspektren von größter Bedeutung. Sie beschreiben die Reaktion (Antwort) von Einmassenschwingern auf Fußpunkterregungen mit den jeweiligen Beschleunigungszeitverläufen.

Bild 1b zeigt einen Einmassenschwinger (Masse m , Steifigkeit k , Dämpfung c) im Ruhe- und Schwingungszustand. Die durch die Schwingung in der Masse m geweckte Trägheitskraft ergibt sich zu $F_T = m \cdot \ddot{u} = m \cdot a$. Dabei ist die Rückstellwirkung des Systems von der Relativverschiebung des Tragwerks abhängig.

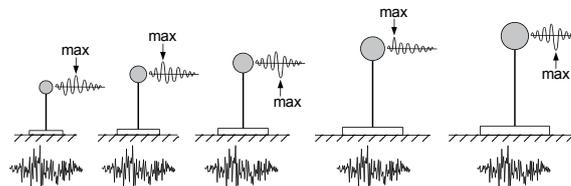
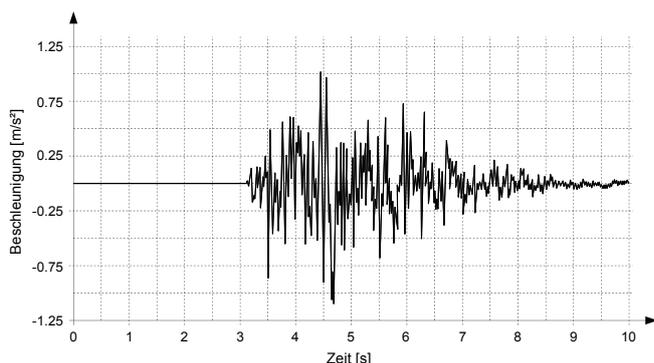
Die Rückstellkraft ermittelt sich zu:

$$F_R = m \cdot \ddot{u} + c \cdot \dot{u} + k \cdot u \quad (1)$$

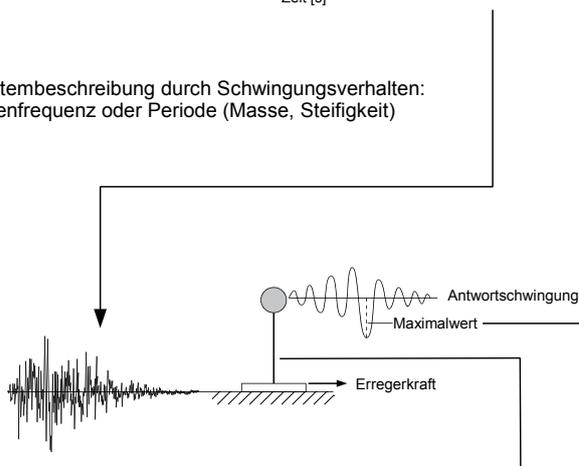
aus der Bewegungsdifferentialgleichung:

$$m \cdot \ddot{u} + c \cdot \dot{u} + k \cdot u = -m \cdot \ddot{u}_g(t) \quad (2)$$

Einwirkung Zeitbereich: Beschleunigungszeitverlauf



Systembeschreibung durch Schwingungsverhalten: Eigenfrequenz oder Periode (Masse, Steifigkeit)



Einwirkung Frequenzbereich: elastisches Antwortspektrum

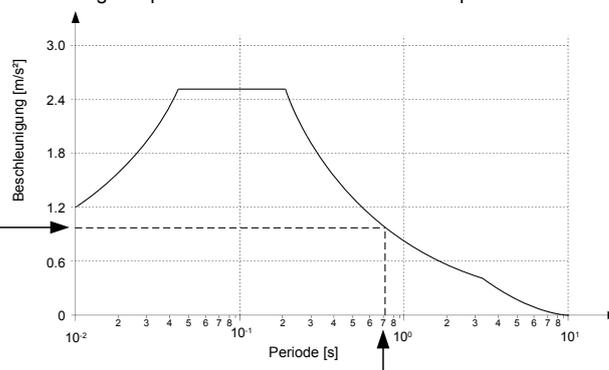


Bild 2. Prinzipielle Ermittlung eines elastischen Antwortspektrums nach [4]

Trägt man die maximalen Antwortbeschleunigungen S_a von sich elastisch verhaltenden Einmassenschwingern des Dämpfungsgrades c über den Eigenperioden T auf, so erhält man das **elastische Antwortspektrum** (Bild 2) eines Erdbebens.

Die vom Tragwerk aufzunehmenden maximalen Horizontalkräfte ermitteln sich durch Multiplikation der Spektralbeschleunigungen S_a mit der Tragwerksmasse m .

Der große Vorteil elastischer Antwortspektren ist darin begründet, dass diese für die Berechnung von Mehrfreiheitsgradsystemen (Mehrmassenschwingern) auf der Grundlage der Eigenformmethode (Multimodalanalyse) unmittelbar verwendet werden können.

Bei der Erdbebenauslegung werden die üblichen Bauwerke nicht so stark ausgelegt, dass sie den maximalen Erdbebenkräften ohne größere Schäden widerstehen können. Einzelne Bauteile werden vielmehr duktil ausgebildet, so dass sie sich durch plastische Verformungen und Energiedissipation weitgehend den aufgezwungenen Bodenverschiebungen entziehen können. In diesem Fall ist das Bauwerk nur für reduzierte Erdbebenbelastungen, und damit wirtschaftlicher, auszulegen. Um die Wirkung dissipativer d.h. energieverzehrender Bauteilduktilitäten zu ermitteln, wurden Einmassenschwinger mit nichtlinearen Rückstelleigenschaften numerisch analysiert [15]. Daraus wurden anschließend zugeordnete **inelastische Antwortspektren** ermittelt. Der prinzipielle Verlauf eines elastischen und inelastischen Antwortspektrums ist in Bild 3 dargestellt. Durch die dissipierte

Energie stellen sich beim inelastischen Antwortspektrum deutlich geringere Reaktionen ein. Die Energiedissipation führt zu mehr oder weniger großen Schäden (z.B. plastische Verformungen) am Tragwerk.

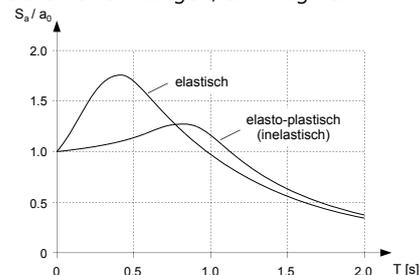


Bild 3. Verlauf eines normierten elastischen und elasto-plastischen Antwortspektrums nach numerischer Analyse nach [15]

Die Berechnung inelastischer (elasto-plastischer) Antwortspektren als Grundlage der Erdbebennachweise ist in der Ingenieurpraxis nicht durchführbar. Für die praktische Tätigkeit sind vielmehr Näherungsverfahren erforderlich, die die nichtlinearen Tragwerkeigenschaften und die Energiedissipation einfach und ausreichend sicher beschreiben.

Als Näherungslösung ist in der Normung [1, 2] die Ermittlung des Bemessungsspektrums über den bau- und konstruktionsabhängigen Verhaltensbeiwert q angegeben. Hierbei wird das elastische Antwortspektrum pauschal durch q dividiert. Dieser Verhaltensbeiwert q soll pauschal die Fähigkeit des gesamten Bauwerks berücksichtigen, Energie durch hauptsächlich duktilen Verhalten seiner Bauteile und/oder anderer Mechanismen, zu dissipieren.

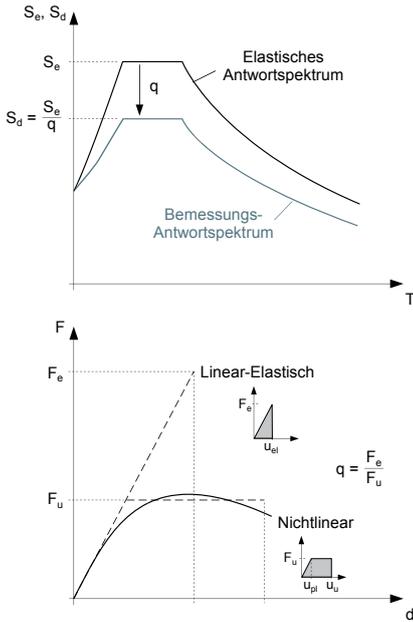


Bild 4. Prinzipieller Verlauf eines elastischen Antwortspektrums und eines zugehörigen Bemessungsspektrums nach [13]

Der Verhaltensbeiwert q lässt sich auch als das Verhältnis der Rückstellkraft F_e im linear-elastischen System zu der minimalen seismischen Kraft F_u des tatsächlichen Tragwerks interpretieren. Im realen Tragwerk sind die zulässigen plastischen Verformungen mit zu berücksichtigen. Diese Vorgehensweise stellt eine starke Vereinfachung dar, um mit geringem Aufwand die vorhandene Duktilität des Tragwerks abzuschätzen. Unter Beachtung der zusätzlichen material-spezifischen Auslegungsregeln [1, 2, 3] der Norm scheint diese Vorgehensweise aber gerechtfertigt.

3 Erdbebeneinwirkung nach DIN 4149

3.1 Erdbebenzonen und Untergrundverhältnisse

Bezüglich der Erdbebengefährdung wird Deutschland in die Erdbebenzonen 0, 1, 2 und 3 eingeteilt (Bild 5 + 6). Jeder Zone wird eine effektive Bodenbeschleunigung a_g sowie ein Intensitätsbereich I (Tab. 1) zugeordnet. Die Grenzen der Erdbebenzonen entsprechen Intensitätsgrenzen von 6.0 – 6.5 – 7.0 und 7.5 der EMS-Skala (Europäische Makroseismische Skala). Der Wert der Bodenbeschleunigung a_g ist Grundlage für den rechnerischen Erdbebennachweis.

Erdbebenzone	Intensitätsintervalle	Bemessungswert der Bodenbeschleunigung a_g [m/s ²]
0	$6 \leq I \leq 6,5$	–
1	$6,5 \leq I \leq 7$	0,4
2	$7 \leq I \leq 7,5$	0,6
3	$7,5 \leq I$	0,8

Tabelle 1. Zuordnung der Intensitätsintervalle und der Bemessungswerte der Bodenbeschleunigung zu Erdbebenzonen nach DIN 4149

Beim Erdbebennachweis ist der Einfluss der örtlichen Untergrundverhältnisse auf die Stärke des möglichen Bebens zu berücksichtigen. Hierbei ist die Beschaffenheit des in den ersten 20 m anliegenden Baugrundes (Baugrundklassen A, B und C) und der geologischen Untergrundverhältnisse (Untergrundklassen R, S und T), die in der Karte in Bild 6 angegeben sind, zu beachten. Als mögliche Kombinationen von Bau- und Untergrundklassen sind A-R, B-R, C-R, B-T, C-T und C-S zugelassen.

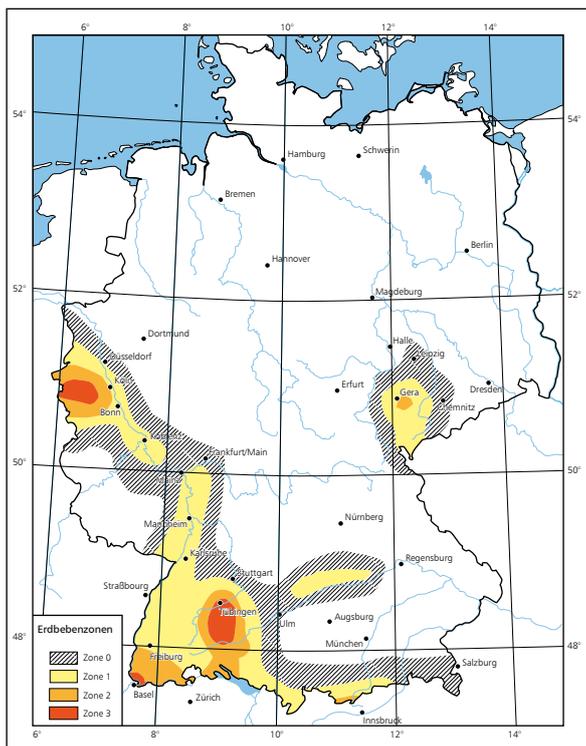


Bild 5. Erdbebenzonen in Deutschland nach DIN 4149 [1]

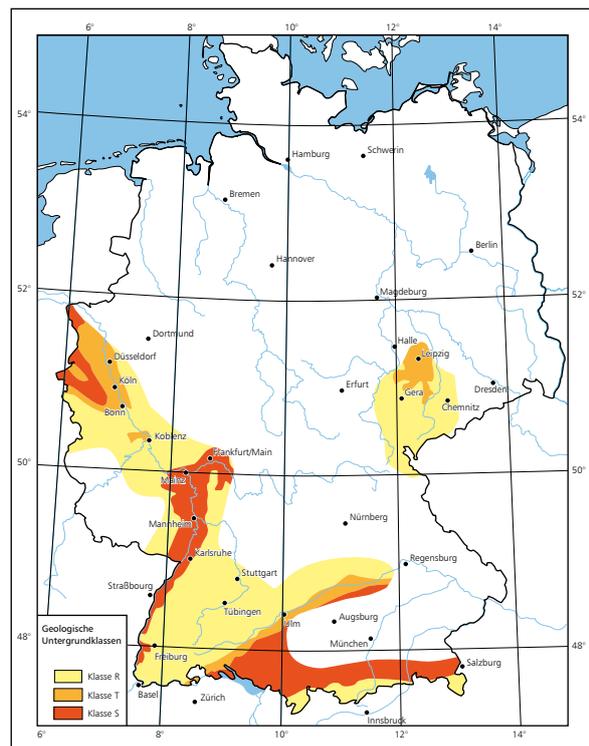


Bild 6. Geologische Untergrundklassen in den Erdbebenzonen nach DIN 4149 [1]

3.2 Elastisches Antwortspektrum

Das elastische Antwortspektrum $S_e(T)$ dient zur Charakterisierung sowohl der Horizontal- als auch der Vertikalkomponenten der örtlichen Erdbebeneinwirkung. Der prinzipielle Verlauf eines elastischen Antwortspektrums ist in Bild 7 dargestellt. Das Spektrum wird definiert durch abschnittsweise Funktionen der Periode zwischen den sogenannten Kontrollperioden T_A , T_B , T_C und T_D .

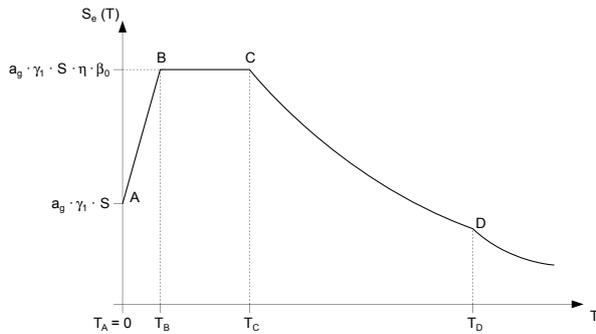


Bild 7. Elastisches Antwortspektrum nach DIN 4149 [1]

Die Funktionsbeschreibung des elastischen Antwortspektrums ist durch folgende Verläufe gegeben:

$$T_A \leq T \leq T_B: S_e(T) = a_g \cdot \gamma_1 \cdot S \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot \beta_0 - 1) \right] \quad (3)$$

$$T_B \leq T \leq T_C: S_e(T) = a_g \cdot \gamma_1 \cdot S \cdot \eta \cdot \beta_0 \quad (4)$$

$$T_C \leq T \leq T_D: S_e(T) = a_g \cdot \gamma_1 \cdot S \cdot \eta \cdot \beta_0 \cdot \frac{T_C}{T} \quad (5)$$

$$T_D \leq T: S_e(T) = a_g \cdot \gamma_1 \cdot S \cdot \eta \cdot \beta_0 \cdot \frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \quad (6)$$

mit

- $S_e(T)$ Ordinate des elastischen Antwortspektrums
- T Schwingungsdauer eines linearen Einmassenschwingers
- a_g Bemessungswert der Bodenbeschleunigung
- γ_1 Bedeutungsbeiwert (nach Tab. 3 der DIN 4149)
(z.B.: $\gamma_1 = 0,8$ für landwirtschaftliche Gebäude; $\gamma_1 = 1,0$ für Wohngebäude; $\gamma_1 = 1,2$ für Schulen; $\gamma_1 = 1,4$ für Krankenhäuser, Feuerwehrhäuser, ...)
- β_0 Verstärkungsbeiwert der Spektralbeschleunigung mit dem Referenzwert $\beta_0 = 2,5$ für 5% viskose Dämpfung
- T_A, T_B, T_C, T_D Kontrollperioden des Antwortspektrums
- S Untergrundparameter
- η Dämpfungs-Korrekturbeiwert mit dem Referenzwert $\eta = 1,0$ für 5% viskose Dämpfung

Untergrundverhältnisse	S	T_B [s]	T_C [s]	T_D [s]
A-R	1,00	0,05	0,20	2,0
B-R	1,25	0,05	0,25	2,0
C-R	1,50	0,05	0,30	2,0
B-T	1,00	0,1	0,30	2,0
C-T	1,25	0,1	0,40	2,0
C-S	0,75	0,1	0,50	2,0

Tabelle 2. Werte der Parameter zur Beschreibung des elastischen horizontalen Antwortspektrums

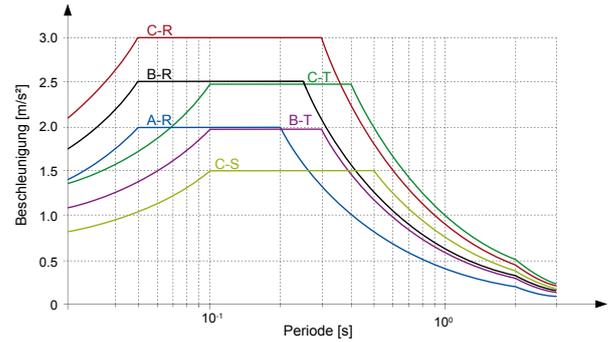


Bild 8. Elastische Antwortspektren für horizontale Bewegungen nach DIN 4149 [1] unter Berücksichtigung der Bau- und Untergrundklassen (für $\gamma_1 = 1,0$ und $a_g = 0,8 \text{ m/s}^2$)

Der Einfluss der Untergrundverhältnisse auf das elastische Antwortspektrum wird für die horizontale Bodenbewegung durch die Parameter der Tabelle 2 und für die vertikale Bodenbewegung durch die Parameter der Tabelle 3 berücksichtigt.

Wertet man die elastischen Antwortspektren mit den Parametern nach Tabelle 2 (bzw. nach Tabelle 3 für vertikale Bewegungen) aus, so entstehen die in Bild 8 aufgetragenen elastischen Antwortspektren für horizontale Bewegungen unter Berücksichtigung der Bau- und Untergrundklassen.

3.3 Bemessungsspektrum

Durch Einführung des Verhaltensbeiwertes q wird (stark vereinfachend) das elastische Antwortspektrum in ein inelastisches Bemessungsspektrum überführt. Wie bereits zuvor erwähnt, soll der Verhaltensbeiwert q pauschal die Fähigkeit des gesamten Bauwerks berücksichtigen, Energie durch hauptsächlich duktilen Verhalten seiner Bauteile und/oder anderer Mechanismen, zu dissipieren. Die Verwendung der Bemessungsspektren ermöglicht die Durchführung einer elastischen Berechnung für das sich inelastisch verhaltende Bauwerk.

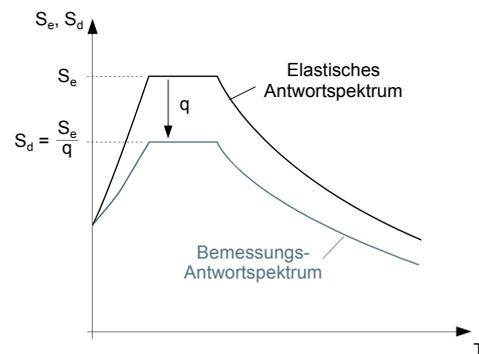


Bild 9. Prinzipieller Verlauf eines Bemessungsspektrums

Untergrundverhältnisse	S	T_B [s]	T_C [s]	T_D [s]
A-R	1,00	0,05	0,20	2,0
B-R	1,25	0,05	0,20	2,0
C-R	1,50	0,05	0,20	2,0
B-T	1,00	0,1	0,20	2,0
C-T	1,25	0,1	0,20	2,0
C-S	0,75	0,1	0,20	2,0

Tabelle 3. Werte der Parameter zur Beschreibung des elastischen vertikalen Antwortspektrums

Das Bemessungsspektrum wird wie folgt festgelegt:

$$T_A \leq T \leq T_B: S_d(T) = a_g \cdot \gamma_1 \cdot S \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot \left(\frac{\beta_0}{q} - 1 \right) \right] \quad (7)$$

$$T_B \leq T \leq T_C: S_d(T) = a_g \cdot \gamma_1 \cdot S \cdot \frac{\beta_0}{q} \quad (8)$$

$$T_C \leq T \leq T_D: S_d(T) = a_g \cdot \gamma_1 \cdot S \cdot \frac{\beta_0}{q} \cdot \frac{T_C}{T} \quad (9)$$

$$T_D \leq T: S_d(T) = a_g \cdot \gamma_1 \cdot S \cdot \frac{\beta_0}{q} \cdot \frac{T_C T_D}{T^2} \quad (10)$$

mit

$S_d(T)$ Ordinate des Bemessungsspektrums
 q Verhaltensbeiwert (entsprechend den Abschnitten 8 bis 12 der DIN 4149)

Wie nachfolgende Tabelle 4 zeigt, ist der Verhaltensbeiwert q stark vom Werkstoff und seiner Duktilitätsklasse abhängig. Die Anforderungen an die konstruktive Ausbildung der Bauteile zur Sicherstellung des duktilen Verhaltens steigen mit der Größe des Verhaltensbeiwertes. Bauartabhängig sind die entsprechenden Anforderungen an die Duktilitätsklassen in den Abschnitten 8 bis 12 der DIN 4149 beschrieben, so dass an dieser Stelle nur auf diese Regelungen verwiesen wird, ohne sie näher zu erläutern.

Bauart	Duktilität	Verhaltensbeiwert q
Stahlbetonbau	Duktilitätsklasse 1	$q = 1,5$
	Duktilitätsklasse 2	$q = 1,7$ bis $3,0$ (je nach Tragwerk)
Stahlbau	Duktilitätsklasse 1	$q = 1,5$
	Duktilitätsklasse 2	$1,5 < q \leq 4,0$
	Duktilitätsklasse 3	$4,0 < q \leq 8,0$
Holzbau	Duktilitätsklasse 1	$q = 1,5$
	Duktilitätsklasse 2	$q = 2,5$
	Duktilitätsklasse 3	$q = 4,0$
Mauerwerksbau	unbewehrtes Mauerwerk	$q = 1,5$
	eingefasstes Mauerwerk	$q = 2,0$
	bewehrtes Mauerwerk	$q = 2,5$

Tabelle 4. Verhaltensbeiwerte q in Abhängigkeit der Bauart und der Duktilitätsklasse nach [13]

Bei Bauteilen der Duktilitätsklasse 1 tritt im Erdbebenfall keine (bzw. eine sehr geringe) Duktilität auf, d. h. das Tragwerk bleibt im elastischen Bereich. Ein gewisses Maß an plastischer Verformung wird bei Bauteilen der Duktilitätsklasse 2 unterstellt (normale Duktilitätseigenschaften). Für Bauteile, für die die Duktilitätsklasse 3 gewählt wird, müssen umfangreiche Nachweise und Sondermaßnahmen sicherstellen, dass das unterstellte zähe Verhalten im Erdbebenfall auch tatsächlich eintritt. Dabei dürfen keine verformungsarmen Spröd- oder Schubversagensmodi auftreten [4].

4 Auslegung von erdbebensicheren Hochbauten

Bei Erdbebenerrregung werden die Tragwerke im wesentlichen durch Horizontalkräfte beansprucht. Dem Aussteifungssystem (vertikal und horizontal) kommt deshalb eine besondere Bedeutung zu. Die im Tragwerk auftretenden Kräfte während des Erdbebens müssen durch Energiedissipation abgemindert werden. Für die Gesamtenergiebilanz des Tragwerks gilt nach [10]:

$$E_{tot} = E_{el} + E_{pl} + E_D \quad (11)$$

mit

E_{tot} Gesamtenergiezufuhr in das Tragwerk
 E_{el} elastische Schwingungsenergie
 E_{pl} hysteretische Energie infolge plastischen Verhaltens
 E_D Energieabsorption infolge Dämpfung

Der elastische Energieanteil ist reversibel (elastische Dehnungen und elastische Stauchungen), so dass das Tragwerk nach Ablauf des seismischen Ereignisses in seine Ausgangsposition kräftefrei zurückkehrt. Nicht reversibel ist hingegen die Energiedissipation E_{pl} . Das Tragwerk reagiert mit plastischen Verformungen. Eine Möglichkeit weitere Energie zu dissipieren, ist über den Einsatz von speziellen Elementen, den Schwingungsdämpfern, möglich.

Die Hauptaufgabe der Erdbebensicherung besteht also darin, die durch die Erdbebenerrregung zugeführte Energie so zu lenken und in andere Energieformen umzuwandeln, dass zu große Zerstörungen vermieden werden. Ein wirtschaftlich optimaler Tragwerksentwurf besteht aus dem richtigen Verhältnis zwischen elastischem und plastischem Energieverzehr.

4.1 Grundlegende Prinzipien des Entwurfs

Die einzuhaltenden Entwurfsgrundsätze für erdbebengerechte Konstruktionen sind in Abschnitt 4 der DIN 4149 angegeben. Die wesentlichen Kriterien werden deshalb nur stichpunktartig aufgelistet. Zur weiteren Vertiefung wird auf die Normen [1, 2] und die weiterführende Literatur [4, 6, 8] verwiesen.

Grundprinzipien:

- Ausbildung einfacher Tragsysteme mit klaren und direkten Wegen der Kraftübertragung
- Regelmäßigkeit in Grund- und Aufriss
- Widerstandsfähigkeit und Steifigkeit in beiden (horizontalen) Richtungen
- Quasi-starre Deckenscheiben zur Lastverteilung auf die Aussteifungselemente
- Torsionssteifigkeit und Torsionswiderstand
- Vermeidung von Steifigkeitssprüngen zwischen übereinander liegenden Geschossen
- Ordnungsgemäße Gründung (Ausbildung so, dass es zu einheitlichen Verschiebungen des gesamten Tragwerks kommt; Ausbildung von Zerrbalken)
- Vermeidung großer Massen in oberen Geschossen

5 Tragwerksmodellierung und -berechnung

5.1 Allgemeines

Die allgemeine Forderung an eine Modellbildung besagt, dass das Tragwerksmodell die Verteilung der Steifigkeit und Masse angemessen wiedergeben muss, so dass alle wesentlichen Verformungen und Tragfähigkeiten für die betrachtete Erdbebeneinwirkung ordnungsgemäß erfasst werden.

Die Finite-Element-Methode, die Stand der Technik ist, ermöglicht eine realistische Beschreibung des Tragverhaltens der Konstruktionen. Die Verteilung der Steifigkeits-, Massen-, Dämpfungs- und auch der Festigkeitseigenschaften im jeweiligen Bauwerk lässt sich mit Hilfe räumlicher Modelle zuverlässig beschreiben.

Werden beim Tragwerksentwurf die o.g. Grundprinzipien hinsichtlich der Verteilung der Steifigkeit und der Masse sowie die Regelmäßigkeitskriterien im Grund- und Aufriss beachtet, erlaubt die Normung [1, 2] anstatt einer räumlichen Berechnung eine vereinfachte Modellbildung. Diese Vereinfachung ermöglicht die Berechnung von zwei ebenen Modellen in den Hauptrichtungen des Tragwerks.

5.2 Tragwerksmodellierung

Tragwerke werden zur Berechnung (statisch oder dynamisch) als Stab- und/oder Flächentragwerke abgebildet. Sie bestehen aus kontinuierlich mit Masse belegten Stäben (Träger, Stützen, ...) oder Flächenelementen (Wände, Decken, ...). Die Modellbildung des zu berechnenden statischen Systems kann dabei auf zwei Arten erfolgen, eine genäherte oder eine genauere Abbildung des Tragwerkes. Die genäherte Modellierung besteht darin, das statische System so zu diskretisieren, dass es durch ein Modell mit diskreten Massen ersetzt wird (vgl. Bild 10). Die Stäbe bzw. Flächenelemente selbst sind dabei massefrei. Bei den üblichen Hochbauten werden bei Anwendung der genäherten Modellbildung die Massen in Höhe der Geschossdecken konzentriert angenommen.

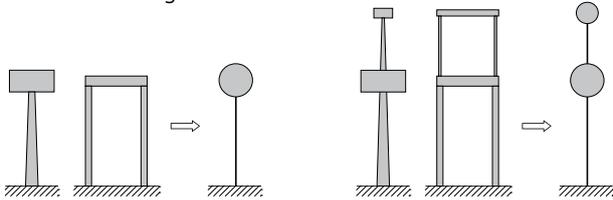


Bild 10. Prinzip der Tragwerksmodellierung für seismische Massen

Die genauere Vorgehensweise berücksichtigt die kontinuierliche Massenbelegung aller Elemente. Damit wird das Tragwerk realitätsnaher abgebildet.

Werden bei einer Modellierung des (räumlichen) Systems die einzelnen Bauteile/Tragglieder als Stabstrukturen abgebildet, ist darauf zu achten, dass die Ersatzstäbe mit den korrekten Eigenschaften (Biegesteifigkeit, Torsionssteifigkeit, ...) abgebildet werden. Bei Betonbauteilen sollten die Steifigkeiten der im Zustand I (Beton ungerissen) ermittelten Querschnitte um ein bestimmtes Maß reduziert werden (Reißen des Betons). DIN 4149 gibt hierzu als Fußnote zu

Abschnitt 6.1 eine Steifigkeitsreduzierung von 50% an. Die starke Reduzierung ist dadurch begründet, dass der Beton unter zyklischer Beanspruchung innerhalb weniger Lastwechsel signifikant an Steifigkeit verliert. Das Verhalten der Verbindungen ist bei der Modellierung möglichst zutreffend zu beschreiben (starre oder gelenkige Verbindungen). Weiter sollte die Tragwerksmodellierung alle tragenden Elemente beinhalten, damit die Differenzen zwischen Modellbildung und tatsächlichem Bauwerk möglichst gering sind.

Die Deckenscheiben verteilen die Horizontallasten über Scheibenwirkung in die aussteifenden vertikalen Stabilisierungssysteme. Üblicherweise sorgen die Deckenscheiben dafür, dass die verschiedenen vertikalen Aussteifungssysteme zusammenwirken. Dazu müssen sie über eine ausreichende Steifigkeit verfügen und eine bestimmte Mindestbewehrung enthalten. Sind die Deckenscheiben z. B. durch größere Deckenöffnungen unterbrochen, muss die Voraussetzung einer „starrten Scheibe“ überprüft werden.

Erfolgt die Diskretisierung mit Flächenelementen (Scheiben, Schalen) sind diese Überprüfungen automatisch im System enthalten. Die Modellierung liefert eine genauere Berechnung der Kräfte und der Verformungen.

Um eine nicht planmäßige (zufällige) Torsionswirkung bei Verwendung eines räumlichen Modells zu berücksichtigen, wird in Abs. 6.2.2.4.3 der DIN 4149 die Berücksichtigung eines Torsionsmomentes vorgegeben mit:

$$M_{1i} = \mp e_{1i} \cdot F_i \tag{12}$$

mit

M_{1i} Torsionsmoment des Geschosses i um seine vertikale Achse
 e_{1i} zufällige Exzentrizität der Geschossmasse i
 F_i am Geschoss angreifende Horizontalkraft

$$e_{1i} = \mp 0.05 \cdot L_i \tag{13}$$

L_i Geschossabmessung senkrecht zur Richtung der Erdbebeneinwirkung

Anmerkung: Die Regelung der DIN 4149 in Abs. 6.2.2.4.3 bzgl. der nicht planmäßigen Torsionswirkung ist in der beschriebenen Form nur bei vereinfachten räumlichen Modellen mit konzentrierten Massen in den Geschossen anwendbar.

Genauere Vorgaben für die Berechnung der Torsionsbeanspruchung infolge nicht planmäßiger Torsionswirkung sind für 3D-FE-Modelle mit kontinuierlich verteilten Massen in DIN 4149 nicht angegeben.

! Die DIN 4149 regelt nicht in allgemeiner Form wie nicht planmäßige Torsionswirkungen bei genaueren räumlichen Berechnungen berücksichtigt werden sollen.

5.3 Berechnungsverfahren

In Abhängigkeit der Regelmäßigkeitskriterien in Grund- und Aufriss ermöglicht DIN 4149 die Ermittlung der Schnittgrößen und Verformungen seismisch beanspruchter Tragwerke mit folgenden Berechnungsverfahren:

- Vereinfachtes Antwortspektrenverfahren
- Multimodales Antwortspektrenverfahren

Beide Verfahren beruhen auf dem elastischen Antwortspektrenverfahren. Diesem Verfahren kommt baupraktisch die größte Bedeutung zu, weil einerseits Ein- als auch Mehrmassensysteme auf der gleichen Grundlage analysiert werden können und andererseits elastische Berechnungen zur Berücksichtigung von inelastischem (elasto-plastischem) Tragwerksverhalten angewendet werden können.

Als Standard-Rechenverfahren gilt das multimodale Antwortspektrenverfahren. Bei diesem Verfahren müssen alle maßgeblich zur Tragwerksantwort beitragenden Modalanteile bei der Berechnung der Kraft- und Verformungsgrößen berücksichtigt werden. Tabelle 5 beschreibt die anzuwendenden Rechenmodelle in Abhängigkeit der Regelmäßigkeitskriterien.

Regelmäßig		Zulässige Vereinfachung		Verhaltensbeiwert
Grundriss	Aufriss	Modell	Berechnung	
ja	ja	eben	Vereinfachtes Antwortspektrenverfahren ^a	Referenzwert ^c
ja	nein	eben	Multimodales Antwortspektrenverfahren	abgemindert
nein	ja	räumlich ^b	Multimodales Antwortspektrenverfahren ^b	Referenzwert ^c
nein	nein	räumlich	Multimodales Antwortspektrenverfahren	abgemindert

^a Falls die Bedingungen von 6.2.2.1 ebenfalls erfüllt sind
^b Unter den besonderen Bedingungen von 6.2.2.4 können die dort beschriebenen einfachen Modelle und Berechnungsverfahren verwendet werden
^c Maßgebender Verhaltensbeiwert nach den Abschnitten 8 bis 12

Tabelle 5. Rechenmodelle in Abhängigkeit der Regelmäßigkeitskriterien nach [1]

5.3.1 Vereinfachtes Antwortspektrenverfahren

Das vereinfachte Antwortspektrenverfahren darf auf Bauwerke angewendet werden, die neben den Regelmäßigkeitsbedingungen auch die Bedingungen $T_1 \leq 4 \cdot T_C$ und $T_1 \leq 2.0 s$ erfüllen. Dabei ist T_1 die Grundperiode des Bauwerks in beide Hauptrichtungen. Aus dem elastischen Antwortspektrum wird für die Eigenschwingzeit T_1 (Grundperiode) die Ordinate $S_a(T_1)$ entnommen. Die horizontale Trägheitskraft ermittelt sich mit der Masse m zu:

$$F = m \cdot S_a(T_1) \tag{14}$$

Die horizontale Trägheitskraft kann als quasi-statische **Erdbeben-Ersatzlast** gedeutet werden.

Zur Bestimmung der Grundschwingzeiten T_1 der beiden ebenen Modelle eines Bauwerks dürfen vereinfachte Beziehungen der Dynamik angewendet werden (z.B. [16]).

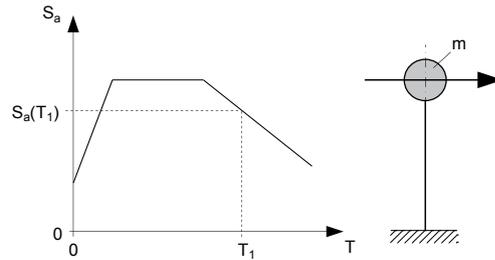


Bild 11. Elastisches Antwortspektrum

Mit der Gesamtmasse M des Bauwerks und der Grundperiode T_1 ergibt sich die Gesamterdbebenkraft F_b zu:

$$F_b = S_a(T_1) \cdot M \cdot \lambda \tag{15}$$

Bei Gebäuden mit mindestens drei Stockwerken und Verschiebungsfreiheitsgraden in jede horizontale Richtung ist die effektive modale Masse der Grundeigenform kleiner als die gesamte Gebäudemasse. Dies wird über den Faktor λ in Gleichung (15) berücksichtigt. λ ist mit dem Wert 0.85 zu berücksichtigen für $T_1 \leq 2.0 \cdot T_C$ für Gebäude mit mehr als zwei Geschossen. In allen anderen Fällen beträgt $\lambda = 1.0$.

Die Verteilung der horizontalen seismischen Kräfte auf das Tragwerk erfolgt beim vereinfachten Verfahren affin zur ersten Eigenform oder vereinfachend höhenproportional. Der einzelnen Massen werden jeweils in Höhe der Geschossdecken angesetzt.

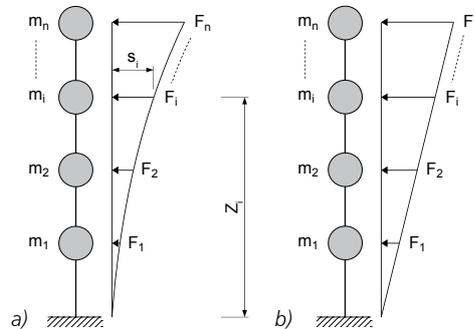


Bild 12. Aufteilung der Erdbebengesamtkraft F_b auf die einzelnen Geschosse
a) affin zur 1. Eigenform
b) vereinfachend höhenproportional

Die Bestimmungsgleichung der Geschosskräfte lautet:

$$F_i = F_b \cdot \frac{s_i \cdot m_i}{\sum s_j \cdot m_j} \tag{16a}$$

$$F_i = F_b \cdot \frac{z_i \cdot m_i}{\sum z_j \cdot m_j} \tag{16b}$$

mit

- F_i die am Geschoss i angreifende Horizontalkraft
- F_b die Gesamterdbebenkraft
- s_i, s_j die Verschiebungen der Massen m_i, m_j in der Grundschwingungsform
- m_i, m_j Geschossmassen
- z_i, z_j Abstand vom Fußpunkt

Durch planmäßige oder durch zufällige Exzentrizitäten werden Torsionswirkungen erzeugt, die bei der Ermittlung der Beanspruchungsgrößen zu berücksichtigen sind.

Im Falle einer symmetrischen Verteilung von Horizontalsteifigkeit und Masse darf die nicht planmäßige Torsionswirkung durch Vergrößerung der Schnittgrößen mit dem Faktor δ berücksichtigt werden. Die Schnittgrößen sind dabei an zwei nach den Hauptrichtungen ausgerichteten Modellen zu ermitteln.

$$\delta = 1 + 0.6 \cdot \frac{x}{L_e} \quad (17)$$

mit

x	Abstand des betrachteten Bauteils zum Massenschwerpunkt des Bauwerks, gemessen senkrecht zur Richtung der betrachteten Erdbebeneinwirkung
L_e	Abstand zwischen den beiden äußersten Bauteilen, die Horizontallasten abtragen

Ein weiteres Näherungsverfahren zur Berücksichtigung der Torsion wird in DIN 4149 in Abschnitt 6.2.2.4.2 angegeben. Damit sind Tragwerke bzgl. der Torsionswirkung nachzuweisen, die zwar die Kriterien der Regelmäßigkeit im Grundriss nicht erfüllen, die aber steife Decken und entsprechende Außen- und Innenwände besitzen. Darüber hinaus liegen die Steifigkeits- und Massenmittelpunkte der einzelnen Geschosse näherungsweise auf einer vertikalen Geraden. Bei Anwendung dieses Näherungsverfahrens dürfen die Bauwerke nicht höher als 10 m sein. Nähere Angaben zu diesem Verfahren sind DIN 4149 zu entnehmen.

5.3.2 Multimodales Antwortspektrenverfahren

Das multimodale Antwortspektrenverfahren ist allgemein sowohl für ebene als auch für räumliche Systeme anwendbar. Die Anwendung des multimodalen Antwortspektrums in Verbindung mit einer räumlichen Tragwerksberechnung entspricht dem Stand der Technik. Bei räumlichen Modellen muss die Erdbebeneinwirkung in Richtung aller maßgebenden horizontalen Richtungen im Grundriss und in den zugehörigen orthogonalen Achsen angesetzt werden.

In der Literatur [8, 10] ist dieses elastische Berechnungsverfahren beschrieben. Die wesentlichen Rechenschritte des multimodalen Antwortspektrenverfahrens werden nachfolgend benannt, ohne die einzelnen Rechenschritte detailliert vorzustellen. Zur weiteren Vertiefung wird auf die genannte Literatur verwiesen.

Bei Tragwerken, die mittels der multimodalen Analyse nachgewiesen werden, erfolgt die Diskretisierung des Systems entweder über mehrere Punktmassen (Mehrmassenschwinger) oder über ein kontinuierlich mit Masse belegtes System (genauere Modellierung).

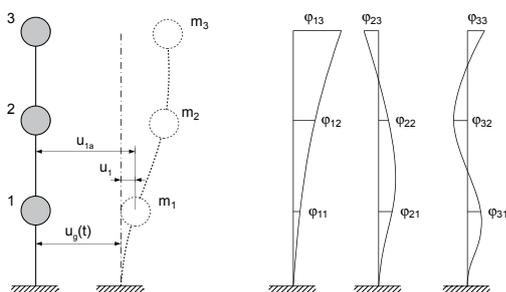


Bild 13. Bezeichnungen der multimodalen Analyse

In Bild 13 ist beispielhaft ein Massenschwinger mit drei Punktmassen und den zugehörigen Eigenformen dargestellt.

Berechnungsschritt 1:

Durchführung einer dynamischen Eigenwertanalyse

Zunächst werden die Eigenformen der Schwingungen Φ_n und die Eigenschwingzeiten $T_n, n = 1 \text{ bis } k$ des Tragwerks ermittelt. DIN 4149 gibt vor, dass die Beanspruchungsgrößen aus allen wesentlichen Schwingungsformen zu berücksichtigen sind. Diese Bedingung ist erfüllt, wenn entweder die Summe der effektiven modalen Massen der berücksichtigten Schwingungsformen mindestens 90% der Gesamtmasse des Tragwerks beträgt oder alle Schwingungsformen mit effektiven modalen Massen von mehr als 5% der Gesamtmasse berücksichtigt werden. Sonst sind mindestens k Eigenformen zu berücksichtigen mit $k=3 \cdot \sqrt{N}$ und $T_k \leq 0.20 \text{ s}$. Dabei ist N die Anzahl der Geschosse über OK Fundament.

Berechnungsschritt 2:

Ermittlung der effektiven modalen Massen

(getrennt für jede Hauptrichtung)

Berechnungsschritt 3:

Ermittlung der modalen seismischen Bemessungskräfte

Berechnungsschritt 4:

Elastische Tragwerksberechnung

Diese ist getrennt für jede Eigenform durchzuführen. Anschließend erfolgt die Ermittlung der Schnittgrößen und Verformungen (modale Antwortgrößen) E_{Edn} .

Berechnungsschritt 5:

Ermittlung der Antwortgrößen E_{Ed} durch

Kombination der modalen Größen E_{Edn} .

Die SRSS-Regel ist die häufigste Kombinationsvorschrift, die für unabhängige Eigenformen gilt. Unabhängige Eigenformen liegen vor, wenn die Eigenformen weit voneinander liegen. Dies kann durch die Bedingung $T_i \leq 0.9 T_j$ überprüft werden. Die SRSS-Regel besagt, dass die resultierenden Größen gleich der Wurzel der Summe der Quadrate (Square Root of the Sum of Squares) der einzelnen Modalgrößen sind.

$$E_E = \sqrt{\sum E_{Ei}^2} \quad (18)$$

mit

E_E	betrachtete Schnittgröße oder Verschiebung infolge Erdbebeneinwirkung
E_{Ei}	Wert dieser Schnittgröße oder Verschiebung infolge Erdbebeneinwirkung, entsprechend der Schwingungsform i

Liegen die Schwingungsformen jedoch sehr nahe beieinander, muss anstelle der SRSS-Regel eine genauere Kombinationsvorschrift z. B. die CQC-Methode (complete quadratic mode combination method) verwendet werden (siehe weiterführende Literatur).

Das multimodale Antwortspektrum liefert die resultierenden Beanspruchungsgrößen in beide Horizontalrichtungen E_{Edx} , E_{Edy} sowie in vertikaler Richtung E_{Edz} . Die beiden orthogonalen Horizontalkomponenten der Erdbebeneinwirkung sind im allgemeinen als gleichzeitig wirkend zu betrachten. Diese sind dann entweder mittels der SRSS-Regel oder vereinfacht mit der 30%-Regel zu überlagern.

Die Kombinationsregel bei Berücksichtigung der beiden Horizontalkomponenten für die Erdbebeneinwirkung A_{Ed} lautet:

$$A_{Ed} = \mp E_{Edx} \oplus \mp 0.30 \cdot E_{Edy} \quad (19)$$

$$A_{Ed} = \mp 0.30 \cdot E_{Edx} \oplus \mp E_{Edy} \quad (20)$$

Sind sowohl die Horizontalkomponenten als auch die Vertikalkomponente zu überlagern, ergibt sich nachfolgende Kombinationsregel:

$$A_{Ed} = \mp E_{Edx} \oplus \mp 0.30 \cdot E_{Edy} \oplus \mp 0.30 \cdot E_{Edz} \quad (21)$$

$$A_{Ed} = \mp 0.30 \cdot E_{Edx} \oplus \mp E_{Edy} \oplus \mp 0.30 \cdot E_{Edz} \quad (22)$$

$$A_{Ed} = \mp 0.30 \cdot E_{Edx} \oplus \mp 0.30 \cdot E_{Edy} \oplus \mp E_{Edz} \quad (23)$$

Bei Verwendung eines räumlichen Modells ist die Erfassung der nicht planmäßigen Torsionswirkung nur schwer möglich. Vereinfacht kann diese Wirkung in jedem Geschoss i durch den Ansatz eines Torsionsmomentes M_{ii} um die vertikale Achse erfasst werden. Die Torsionsmomente sind mit wechselndem Vorzeichen für alle Geschosse jeweils in die gleiche Richtung drehend anzusetzen (siehe hierzu entsprechende Anmerkungen im Kapitel Tragwerksmodellierung).

Nicht planmäßige Torsionswirkung

$$M_{1i} = \mp e_{1i} \cdot F_i \quad (24)$$

mit

M_{ii} Torsionsmoment des Geschosses i um seine vertikale Achse
 e_{ii} zufällige Exzentrizität der Geschossmasse i
 F_i am Geschoss angreifende Horizontalkraft

$$e_{1i} = \mp 0.05 \cdot L_i \quad (25)$$

L_i Geschossabmessung senkrecht zur Richtung der Erdbebeneinwirkung

Elastische Verformungen des Tragwerks werden mit Hilfe linearer Berechnungsverfahren (multimodale Analyse) berechnet. Über einen Verhaltensbeiwert $q > 1.0$ wird aber ein elastisch-plastisches Verhalten unterstellt. Das bedeutet, dass die sich entstellenden Verformungen (d_s) größer als die rein elastisch ermittelten Verformungsanteile (d_e) sein werden. Um das duktile Verhalten des Tragwerks bzgl. der Verformungen zu berücksichtigen, sind die elastischen Verformungsanteile mit dem Faktor q (Verhaltensbeiwert) zu multiplizieren.

$$d_s = q \cdot d_e \quad (26)$$

5.4 Nichtlineare Berechnungsverfahren nach Eurocode 8

Nach Eurocode 8 [2] darf auch als Alternative zu einer linearen Methode (Vereinfachtes Antwortspektrenverfahren oder Multimodales Antwortspektrenverfahren) eine nichtlineare Berechnungsmethode verwendet werden.

Als mögliche nichtlineare Rechenverfahren werden angegeben:

- Nichtlineare statische (pushover) Berechnung
- Nichtlineare Zeitverlaufsrechnung (dynamisch)

Die nichtlinearen Verfahren sind besonders wichtig zur Verfolgung der Schädigungsevolution bei langen, energie-reichen Erdbeben.

Nach DIN 4149 sind nichtlineare Berechnungen nicht vorgesehen, so dass an dieser Stelle diese Verfahren nicht näher beschrieben werden, vielmehr wird auf die weiterführende Literatur verwiesen.

6 Nachweise der Standsicherheit

Der Nachweis ist nach Abschnitt 7 der DIN 4149 zu führen. Es sind folgende Einzelnachweise zu führen:

- Tragfähigkeit
- Duktilität
- Gleichgewicht
- Tragfähigkeit der Gründung
- Erdbebensichere Fugen

6.1 Vereinfachter Nachweis

Vollständig entfallen können die Nachweise der Standsicherheit für Hochbauten der Bedeutungskategorien I bis III (siehe Tab. 3 der DIN 4149), wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

- Die mit einem Verhaltensbeiwert $q = 1.0$ ermittelte Gesamterdbebenkraft ist kleiner als die maßgebende Horizontalkraft, die sich aus den anderen zu untersuchenden Einwirkungskombinationen (z.B. Wind) ergibt und für die das Tragwerk für die ständige und vorübergehende Bemessungssituation bemessen wird.
- Die in Abs. 4.2 der DIN 4149 aufgeführten Empfehlungen für den Entwurf sind erfüllt.

Bei Wohn- und ähnlichen Gebäuden darf auf einen rechnerischen Nachweis verzichtet werden, wenn die nachfolgenden Bedingungen eingehalten sind:

- Die Anzahl der Vollgeschosse überschreitet nicht die Werte der Tabelle 8 nach [1].
- Die Grundlagen zum erdbebensicheren Entwurf sind erfüllt.
- Die Geschosshöhe beträgt max. 3.50 m.
- Für Mauerwerksbauten sind die Regeln nach 11.6 der DIN 4149 eingehalten.
- Bauten in den Erdbebenzonen 2 und 3 entsprechen zusätzlich den Regelmäßigkeitskriterien.

6.2 Rechnerischer Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit

Zur Gewährleistung der Sicherheit gegen Einsturz (Grenzzustand der Tragfähigkeit) in der Erdbebensituation ist die nachfolgende Bedingung hinsichtlich der Tragfähigkeit zu erfüllen:

$$E_d \leq R_d \tag{27}$$

Der Bemessungswert der Beanspruchungsgrößen E_d der Erdbebenbemessungssituation ermittelt sich dabei zu:

$$E_d = E \left[\sum G_{k,j} \oplus P_k \oplus \gamma_1 \cdot A_{Ed} \oplus \sum \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \right] \tag{28}$$

Die Bemessungstragfähigkeit des Bauteils ermittelt sich nach den baustoffbezogenen Anforderungen (charakteristischer Wert f_y des Baustoffs und mit γ_M als Teilsicherheitsbeiwert des Materials im Grenzzustand der Tragfähigkeit für die außergewöhnliche Bemessungssituation) zu:

$$R_d = R \left[\frac{f_y}{\gamma_M} \right] \tag{29}$$

Die Beanspruchungen infolge des Erdbebens ergeben sich dabei zu:

$$A_{Ed} = A \left[\sum G_{k,j} \oplus \sum \varphi \cdot \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \right] \tag{30}$$

mit

- φ nach Tabelle 6 aus [1]
- $\psi_{2,i}$ nach DIN 1055-100, Tabelle A.2 [17]

6.3 Nachweis ausreichender Duktilität

Für das Gesamttragwerk und für die tragenden Bauteile ist die zugrunde gelegte Duktilität nachzuweisen. Der Nachweis kann durch die Einhaltung der baustoffbezogenen Regeln in den Abschnitte 8 bis 12 nach [1] geführt werden.

6.4 Nachweis des Gleichgewichts

Es ist der Nachweis zu führen, dass das Tragwerk auch unter Erdbebeneinwirkung in stabilem Gleichgewicht bleibt. Die Nachweise zu Kippen und Gleiten nach DIN 1054 müssen dabei eingehalten sein.

6.5 Nachweis der Deckenscheiben

Es ist nachzuweisen, dass die Deckenscheiben in der Lage sind, die Erdbebenkräfte an die Vertikalsysteme zu übertragen. Die Auswirkungen von Deckenöffnungen sind nachzuweisen.

6.6 Nachweis der Gründung

Die Anforderungen nach Abschnitt 12 der DIN 4149 sind für die Gründungen und Stützbauwerke zu berücksichtigen. Dabei ist nachzuweisen, dass die Gründung die ermittelten Auflagerkräfte sicher aufnehmen kann. Die Bemessungsschnittgrößen müssen nicht größer angesetzt werden, als die Schnittgrößen aus einer elastischen Berechnung mit dem Verhaltensbeiwert $q = 1.0$.

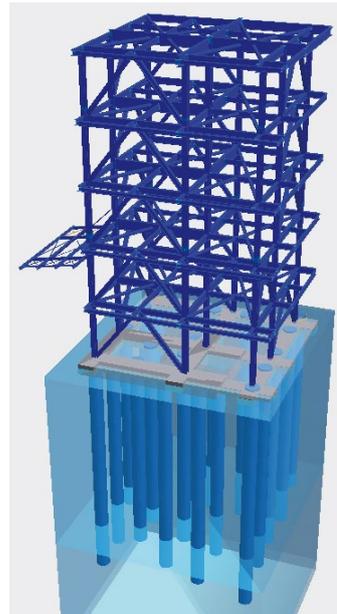


Bild 14. Gründung eines Gerüsts mit Bodenplatte, Pfählen und Zerrbalken

Für seismische Einwirkungen muss die Auslegung der Gründung und ihrer Verbindungen zum Überbau sicherstellen, dass das Gesamttragwerk einer gleichmäßigen Erdbebenanregung ausgesetzt ist. Werden einzelne Gründungselemente (Einzelfundamente, Pfähle) verwendet, wird die Verwendung von Zerrbalken in beide Richtungen oder eine Bodenplatte empfohlen. Bild 14 zeigt die Gründung eines Gerüsts (Pfahlgründung mit Ausbildung von Zerrbalken)

6.7 Nachweis von Fugen

Nach Abschnitt 7.2.6 sind Hochbauten gegen erdbebeninduzierte Zusammenstöße mit angrenzenden Bauwerken oder Bauteilen zu schützen. Dazu sind ausreichend breite Fugen auszuführen.

7 Ausblick auf die Regelungen nach Eurocode 8

Mit der verbindlichen Einführung der Eurocodes (voraussichtlich) in 2012 wird auch die nationale DIN 4149 durch den Eurocode 8 (EC 8) abgelöst werden. Der EC 8 ist wie folgt gegliedert und enthält folgende Teile:

- **DIN EN 1998-1**
Grundlagen und Vorschriften für die Auslegung von Bauwerken des Hoch- und Ingenieurbaus
- **DIN EN 1998-2**
Besondere Vorschriften für Brücken
- **DIN EN 1998-3**
Vorschriften für die Beurteilung und Verbesserung der Erdbebensicherheit bestehender Hochbauten
- **DIN EN 1998-4**
Besondere Vorschriften für Tankbauwerke, Silos und Rohrleitungen
- **DIN EN 1998-5**
Besondere Vorschriften für Gründungen, Stützbauwerke und geotechnische Aspekte
- **DIN EN 1998-6**
Besondere Vorschriften für Türme, Masten und Schornsteine

Wie schon eingangs erwähnt, werden mit Einführung des Eurocodes 8 ergänzend zu den bisherigen Regelungen für übliche Hochbauten künftig auch die Sonderbauwerke (Brücken, Silos, Tanks, Rohrleitungen, Türme, Maste und Schornsteine) geregelt.

Über die entsprechenden Nationalen Anhänge (NA) werden die Eurocodes auf die länderspezifischen Besonderheiten (national festgelegte Parameter) angepasst. Teil 1 des EC 8 (DIN EN 1998-1) wird über den nationalen Anhang DIN EN 1998-1/NA [3] auf das deutsche Sicherheitskonzept angepasst. Da die DIN 4149 [1] als Grundlage für die Erstellung des Nationalen Anhangs DIN EN 1998-1/NA zum Eurocode 8 Teil 1 diente, sind dort im wesentlichen die gleichen Regelungen enthalten wie in der DIN 4149. Auch die „Vereinfachten Auslegungsregeln für einfache Bauten des üblichen Hochbaus“ stehen weiterhin zur Anwendung zur Verfügung. Diese sind im Anhang NA.D der DIN EN 1998-1/NA aufgeführt und damit Bestandteil der nationalen Regelung.

Die wesentlichen Rechenverfahren zum Nachweis der Erdbebensicherheit werden weiterhin die elastischen Antwortspektrenverfahren (vereinfacht oder multimodal) sein. Zusätzlich wird der EC 8 aber auch die Berechnung über die in 5.4 angegebenen nichtlinearen Berechnungsverfahren ermöglichen.

Dr.-Ing. Joachim Kretz
mb AEC Software GmbH
mb-news@mbaec.de

Normen und Literatur

- [1] DIN 4149: Bauten in deutschen Erdbebengebieten – Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten, Ausgabe April 2005. Beuth Verlag.
- [2] DIN EN 1998-1: Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten; Deutsche Fassung EN 1998-1:2004 + AC:2009, Ausgabe Dezember 2010. Beuth Verlag
- [3] DIN EN 1998-1/NA: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten, Ausgabe Januar 2011. Beuth Verlag
- [4] Meskouris, K.; Hinzen, K.-G.: Bauwerke und Erdbeben. Grundlagen – Anwendung – Beispiele. 2. Auflage, Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden 2007
- [5] Petersen, C.: Dynamik der Baukonstruktionen. 1. Auflage 1996 korrigierter Nachdruck 2000, Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden 2000
- [6] Schlüter, F.-H.; Fäcke, A.: DIN 4149/EC8 – Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben. Seminar Universität Kaiserslautern 16. Februar 2011.
- [7] Schlüter, F.-H.: Erdbeben – zur Anwendung der DIN 4149 bei Neu- und Bestandsbauten. Aktuelles Stahlbauseminar Siegen 23.03.2009
- [8] Meskouris, K.; Butenweg, C.: Erdbebensichere Auslegung von Bauwerken nach DIN 4149:2005. In Betonkalender 2008. Ernst & Sohn Verlag, Berlin 2008
- [9] Schlüter, F.-H.; Baur, M.; Cüppers, H.; Fäcke, A.; Kasic, S.; Ruckebrod, C.: Bemessung von Stahlbeton- und Spannbetonbauwerken unter Erdbebenbeanspruchung. In Betonkalender 2008, Ernst & Sohn Verlag, Berlin 2008
- [10] Vayas, I.: Tragverhalten, Auslegung und Nachweise von Stahlhochbauten in Erdbebengebieten. In Stahlbau-Kalender 2008. Ernst & Sohn Verlag, Berlin 2008
- [11] Albert, A.; Goris, A.: Bauten in deutschen Erdbebengebieten (nach DIN 4149). In mb-news 2/2010
- [12] Kretz, J.: Bemessung und Konstruktion eines Stahl-Verbundtragwerks unter Berücksichtigung von seismischen Einwirkungen auf der Grundlage des New Greek Aseismic Codes. Stahlbau 73 (2004), Heft 10, Ernst & Sohn Verlag.
- [13] Ötes, A.: Die neue Erdbebenorm DIN 4149. Universität Dortmund – Schriftenreihe Tragkonstruktionen.
- [14] Erdbebensicher Bauen. Planungshilfen für Bauherren, Architekten und Ingenieure, Wirtschaftsministerium Baden Württemberg, Stuttgart 2008.
- [15] Newmark, N. M.; Rosenblueth, E.: Fundamentals of earthquake engineering, Englewood Cliffs: Prentice-Hall 1971.
- [16] Heuß, S.: Leistungsbeschreibung des BauStatik-Moduls S040 Erdbeben-Ersatzlasten. In mb-news 2/2010
- [17] DIN 1055-100: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 100: Grundlagen der Tragwerksplanung, Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln. Ausgabe März 2001. Beuth Verlag.

i Glossar

Antwortspektrum: Diagramm, das die Reaktion (Antwort) eines (idealisierten) Einmassenschwingers auf eine definierte Schwingungsanregung des Fußpunktes als Funktion der Frequenz beschreibt. Es gibt Beschleunigungs-, Geschwindigkeits- und Verschiebungs-Antwortspektren. Die Antwortspektren werden für die Bemessung von Tragwerken gegen die Einwirkungen aus Erdbeben benötigt.

Intensität: Kennzahl für die Stärke der Bodenerschütterung bei Erdbeben. Sie charakterisiert die lokale Wirkung auf Menschen und Objekte innerhalb einer örtlich begrenzten Region. Die Intensität hängt ab von der Entfernung zum Epizentrum und den örtlichen Untergrundverhältnissen, der Herdtiefe, etc.

Magnitude: Maß für die Stärke eines Erdbebens. Diese Magnituden werden überwiegend aus den Amplituden von Seismogrammen bestimmt.

Duktilität: Eigenschaft eines Werkstoffes oder Bauteils (lokal) bzw. eines Tragwerks (global) sich bei Überbelastung plastisch zu verformen, bevor sie versagen.

- Lokale Duktilität: Fähigkeit eines Bauteils, durch örtliche plastische Verformung Energie zu dissipieren
- Globale Duktilität: Fähigkeit einer Teil-Konstruktion oder eines Bauwerks, durch Bildung plastischer Bereiche Energie zu dissipieren

Dissipation: Vorgang, Energie in andere Energieformen umzuwandeln.

- Dissipativer Bereich: konstruktiv ausgebildeter Bereich eines Tragwerks, in dem hauptsächlich Energie dissipiert wird
- Dissipatives Tragwerk: Tragwerk, das für den Lastfall Erdbeben unter Berücksichtigung seiner Fähigkeit zur Energiedissipation bemessen wird
- Nicht dissipatives Tragwerk: Tragwerk, das für den Lastfall Erdbeben bemessen ist, ohne dabei ein mögliches dissipatives Verhalten zu berücksichtigen; elastische Bemessung

Verhaltensbeiwert: Der Verhaltensbeiwert q berücksichtigt (vereinfachend) pauschal das nichtlineare Verhalten des gesamten Tragwerks unter Berücksichtigung des Zusammenwirkens aller Bauteile, beschrieben bei linearer Berechnung

Bedeutungsbeiwert: Beiwert zur Berücksichtigung der Bedeutung des Erhalts der Funktionsfähigkeit eines Tragwerks im Falle eines Erdbebens

Hypozenrum: Punkt, von dem ein Erdbeben ausgeht. Es wird auch als seismische Quelle bzw. als Bebenherd bezeichnet. Das Hypozentrum wird in der Seismologie charakterisiert durch das Epizentrum und seine Tiefe unter der Erdoberfläche (Herdtiefe)

Epizentrum: Senkrecht vom Hypozentrum auf die Erdoberfläche projiziertes Zentrum eines Erdbebens. Es markiert den Erdbebenherd auf der Landkarte.