

Die neue Erdbebennorm DIN 4149

Prof. Dr.-Ing. A. Ötes
Lehrstuhl für Tragkonstruktionen
Universität Dortmund

1. Einleitung

Mit der Ausgabe der DIN 4149:2005-04 liegt die neue Erdbebennorm „Bauten in deutschen Erdbebengebieten – Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten“ vor [1]. Die Norm wurde in Baden-Württemberg bereits Ende 2005 bauaufsichtlich zur Auslegung von Neubauten eingeführt. Durch Aufnahme in die Musterliste der technischen Baubestimmungen soll die neue Erdbebennorm zum 1.1.2007 in Deutschland bauaufsichtlich verbindlich gemacht werden.

Die neue Erdbebennorm ist eine substantielle Weiterentwicklung der DIN 4149 (April 1981) [2] auf der Grundlage von Eurocode 8 [3]. Die in Eurocode 8 europaweit vereinheitlichten Konzepte zur Beschreibung der seismischen Einwirkungen sowie Regeln zur Berechnung, Bemessung und Konstruktion von Hochbauten in Erdbebengebieten wurden bei der Erarbeitung der Norm berücksichtigt. Die wesentlichen inhaltlichen Erneuerungen gegenüber der bisherigen Norm bestehen

- in der neuen Erdbebenzonenkarte sowie Beschreibung der seismischen Einwirkung

und

- in den Bemessungskonzepten und Konstruktionsregeln zur erdbebensicheren Auslegung von Hochbauten.

In beiden Bereichen wurden die neueren Entwicklungen in der Erdbebennormung aufgenommen und unter Berücksichtigung der lokalen Gegebenheiten (seismologische Besonderheiten, Erfahrung in deutschen Erdbebengebieten) in die Norm eingearbeitet.

Mit der differenzierteren Berücksichtigung der Einflussgrößen insbesondere mit der Eröffnung von Wahlmöglichkeiten in der Tragwerksplanung durch die

- unterschiedliche Berücksichtigung der einzelnen Bauarten (Material)

und

- Wahl der Duktilitätsklassen mit ihren jeweiligen konstruktiven Regeln

unterscheidet sich die neue Erdbebennorm von der bisherigen inhaltlich und konzeptionell. Für das bessere Verständnis der Prinzipien und die sachgemäße Anwendung der Regeln ist ein Hintergrundwissen über die grundlegenden Konzepte des erdbebensicheren Bauens erforderlich bzw. besonders nützlich. In diesem Beitrag werden solche Hinweise begleitend zu der Vorstellung der wesentlichen Inhalte der Norm gemacht.

2. Anwendungsbereich und Ziel der Auslegung

Die DIN 4149 gilt für die baulichen Anlagen des üblichen Hochbaus aus Stahlbeton, Stahl, Holz und Mauerwerk. Das primäre Ziel der Norm ist der Schutz von Menschenleben, d.h. die Sicherstellung der Standsicherheit der Bauwerke (Vermeidung des Einsturzes) auch bei starken Beben. Dafür sind die Bauwerke für das in der Norm spezifizierte Bemessungsbeben so auszulegen, dass sie auch nach dem Beben eine ausreichende Resttragfähigkeit besitzen.

Der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit wird nicht explizit geführt. Diesbezügliche Anforderungen werden durch die Anhebung des erforderlichen Mindesttragwiderstands mit dem so genannten Bedeutungsfaktor nur ansatzweise berücksichtigt.

Mit der Auslegung der Bauwerke gemäß der Norm soll auch ein Widerstand erreicht werden, der sicherstellt, dass schwächere, aber dafür häufigere Beben ohne bzw. mit nur geringem Schaden überstanden werden (Vermeidung von häufigen Schäden).

3. Erdbebeneinwirkung

Die Bestimmung der Erdbebeneinwirkung in DIN 4149 basiert auf folgenden Neuentwicklungen:

- Probabilistische Erdbebenzonenkarte
- Bemessungswerte der Bodenbeschleunigungen als Effektivbeschleunigungen
- Elastisches Antwortspektrum mit Berücksichtigung von Baugrund und geologischem Untergrund
- Geologische Untergrundklassen

Probabilistische Erdbebenzonenkarte

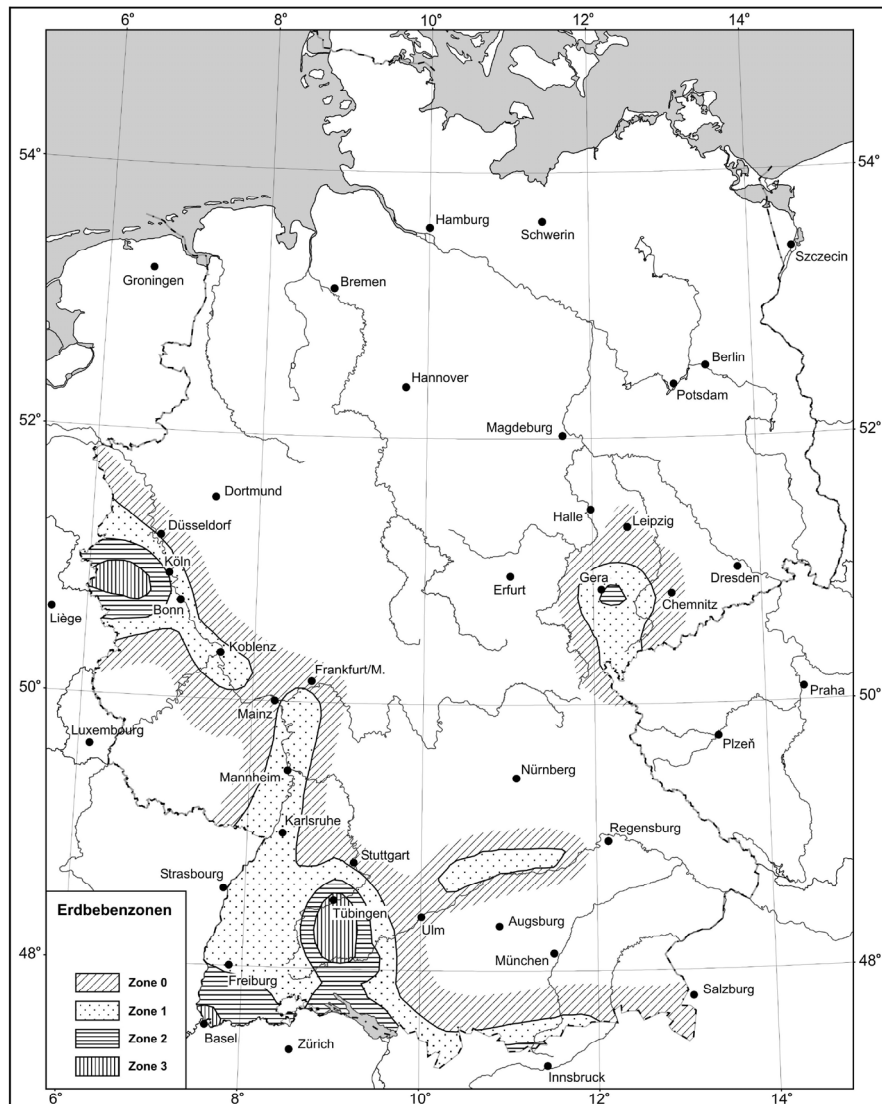


Bild 1: Erdbebenzonen der DIN 4149 [1]

Die neue Zonenkarte (Bild 1), die auf der probabilistischen Einschätzung der Erdbebengefährdung beruht, unterscheidet sich grundsätzlich von der deterministischen Karte der DIN 4149 (April 1981), die auf einmalig beobachteten Maximalintensitäten basiert.

Die Grenzbereiche zwischen den Erdbebenzonen 0 – 1 – 2 – 3 entsprechen Isolinien mit einer Wiederkehrperiode von 475 Jahren für die Intensitäten 6,0 – 6,5 – 7,0 – 7,5 der EMS (Europäische Makroseismische Skala) [4]. Die Wiederkehrperiode von 475 Jahren, die einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von 10% in 50 Jahren entspricht, ist die Referenz-Wiederkehrperiode für die harmonisierten Erdbebengefährdungskarten gemäß Eurocode 8.

Die Anwendung der Norm beschränkt sich auf die Zonen 1 bis 3.

Bemessungswerte der Bodenbeschleunigungen

Den Erdbebenzonen sind Bemessungswerte der Bodenbeschleunigung zugeordnet, die für die jeweilige Referenzintensität der Zone als Effektivbeschleunigung auf felsigem Untergrund ermittelt worden sind (Bild 2) [5].

- Zone 1: $a_g = 0,4 \text{ m/s}^2$
- Zone 2: $a_g = 0,6 \text{ m/s}^2$
- Zone 3: $a_g = 0,8 \text{ m/s}^2$

Erdbebenzone	Intensitätsintervalle	Bemessungswert der Bodenbeschleunigung $a_{g,2}$ m/s ²
0	$6 \leq I < 6,5$	–
1	$6,5 \leq I < 7$	0,4
2	$7 \leq I < 7,5$	0,6
3	$7,5 \leq I$	0,8

Bild 2: Zuordnung von Intensitätsintervallen und Bemessungswerten der Bodenbeschleunigung zu den Erdbebenzonen [1]

Elastisches Antwortspektrum

Mit dem elastischen Antwortspektrum wird die Beschleunigung eines linear-elastischen Einmassenschwingers mit der Eigenschwingzeit T (s) angegeben. Die Ordinate des elastischen Antwortspektrums $S_e(T)$ in DIN 4149 spiegelt verschiedene Einflussgrößen wider (Bild 3).

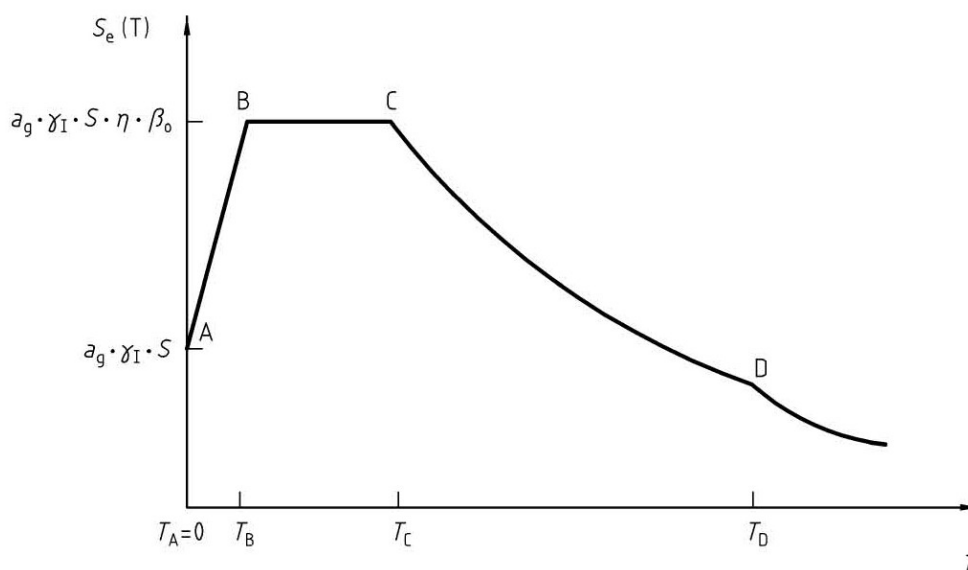


Bild 3: Elastisches Antwortspektrum [1]

Für Eigenperioden im Plateaubereich gilt:

$$S_e(T) = a_g \cdot \gamma_I \cdot S \cdot \eta \cdot \beta_0 \quad (\text{für } T_B \leq T \leq T_C)$$

mit:

- a_g : Bemessungswert der Bodenbeschleunigung je nach Erdbebenzone
- β_0 : Verstärkungsbeiwert der Spektralbeschleunigung
 $\beta_0 = 2,5$ für 5% Dämpfung
- η : Dämpfungsbeiwert ($\eta = 1,0$ für 5% Dämpfung)
- γ_I : Bedeutungsbeiwert in Abhängigkeit der Bedeutung des Bauwerks für den Schutz der Allgemeinheit

$\gamma_I = 1,0$ z.B. Wohngebäude
 $\gamma_I = 1,2$ z.B. Schulen, große Wohnanlagen
 $\gamma_I = 1,4$ z.B. Krankenhäuser

γ_I entspricht im Prinzip einem Sicherheitsfaktor, mit dem die Beschleunigungen ggf. erhöht werden.

S: Untergrundparameter
 Dieser Parameter wird in Abhängigkeit des geologischen Untergrunds (R,T,S) und des Baugrunds (A,B,C) bestimmt (vgl. Bild 4). Mit dem Baugrund wird der oberflächennahe Untergrund bis zu einer Tiefe von etwa 20 m, mit dem geologischen Untergrund der Bereich ab einer Tiefe von 20 m bezeichnet.

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

Baugrundklassen:

A: Feste bis mittelfeste Gesteine
 B: Lockergesteine, grobkörnig
 C: Lockergesteine, feinkörnig

Geologische Untergrundklassen

R: Fels, Festgestein
 B: Flache Sedimentbecken und Übergangszonen
 C: Tiefe Sedimentbecken

Bild 4: Werte für den Untergrundparameter S [1]

In DIN 4149 wird über den unmittelbaren Baugrund hinaus der Einfluss des geologischen Untergrunds auf den Spektralwert (Ordinate, Frequenzbereich) erfasst. Der Felsuntergrund (R) führt zu schmalen Spektren mit höheren Spektralwerten, während die tiefen und mächtigen Sedimentbecken (S) mit ihrer Absorptionswirkung zu niedrigeren Spektralwerten über einem breiten Frequenzbereich führen. In Bild 5 sind die Spektren für die einzelnen Untergrund-Baugrundkombinationen dargestellt.

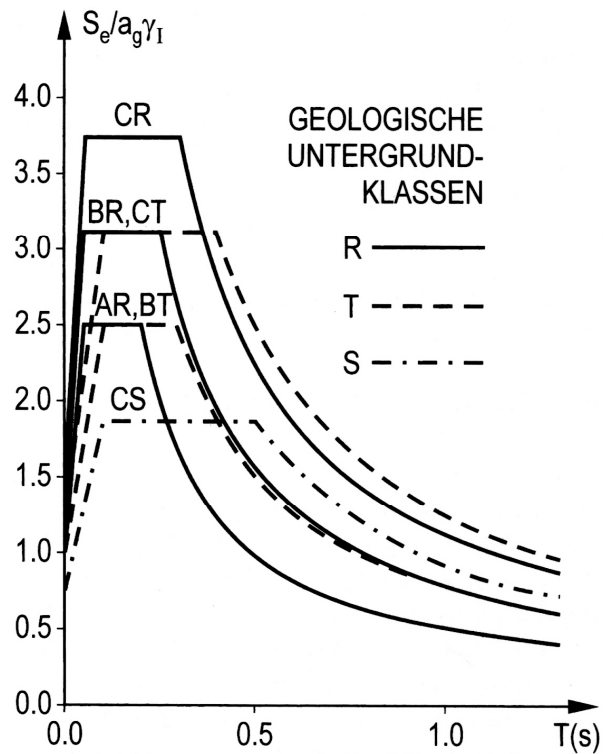


Bild 5: Elastische Antwortspektren für verschiedene Untergrundverhältnisse

Geologische Untergrundklassen

In Bild 6 sind die geologischen Untergrundklassen in den Erdbebenzonen dargestellt.

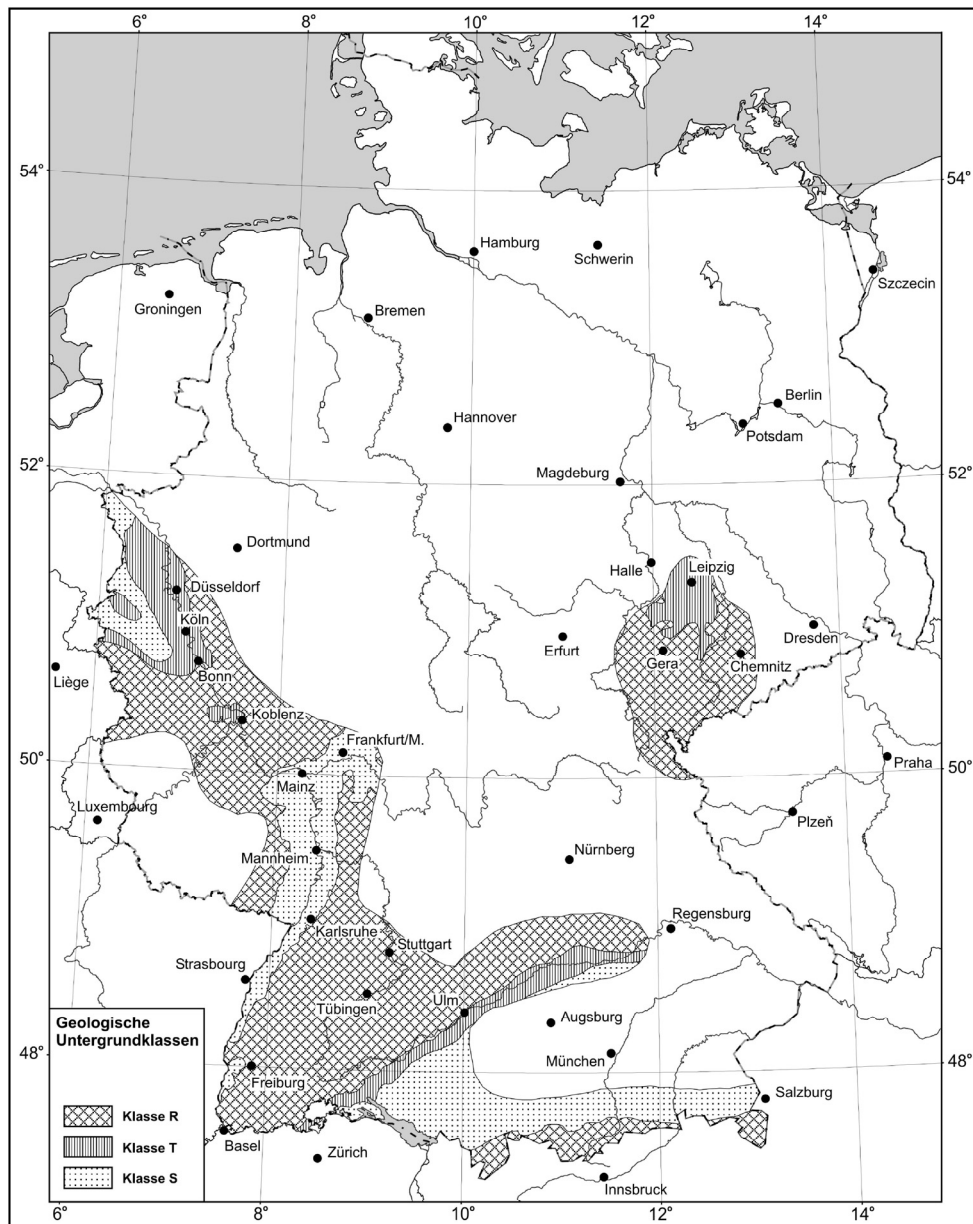


Bild 6: Geologische Untergrundklassen in den Erdbebenzonen [1]

Die Erdbebeneinwirkung lässt sich somit für einen Standort zonen- und untergrundabhängig mit einem Antwortspektrum beschreiben (Bild 7).

Beispiel:

Standort: Tübingen \Rightarrow Erdbebenzone 3: $a_g = 0,8 \text{ m/s}^2$
Untergrund: Geolog. Untergrund Fels \Rightarrow Untergrundklasse R
Baugrund: Feinkörniges Lockergestein \Rightarrow Baugrundklasse C

\Rightarrow Untergrundparameter für die Kombination CR: $S = 1,50$

$\Rightarrow a_g \cdot S = 0,8 \cdot 1,50 = 1,2 \text{ m/s}^2$

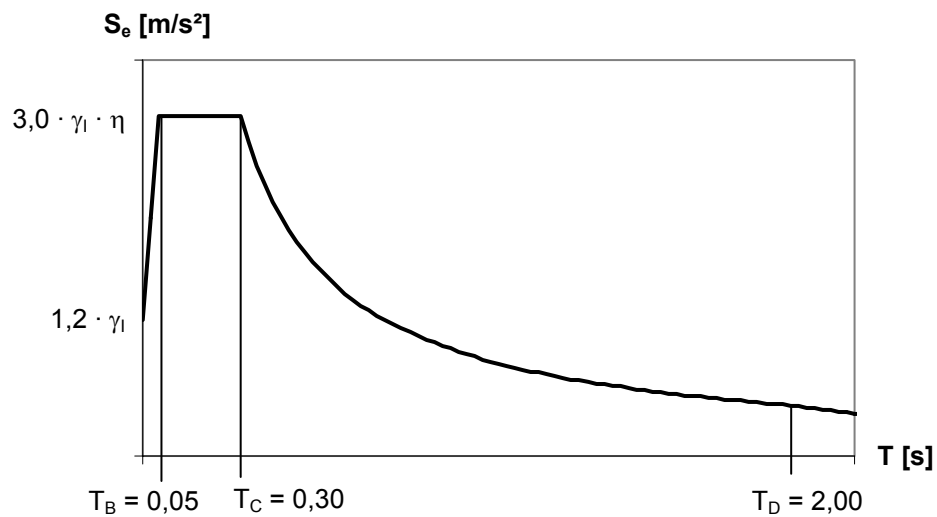


Bild 7: Elastisches Antwortspektrum gemäß DIN 4149
(Standort Tübingen, feinkörniges Lockergestein auf Fels (CR))

4. Konstruktion, Berechnung, Bemessung

Erdbebengerechtes Konstruieren bildet den Ausgangspunkt der erdbebensicheren Auslegung von Bauwerken. Als Entwurfsgrundsätze sind in diesem Zusammenhang insbesondere folgende Konstruktionseigenschaften hervorzuheben:

- Einfachheit des Tragwerks und Aussteifungssystems
- Überschaubare direkte Lastabtragung der Erdbebenkräfte
- Regelmäßiger Aufbau im Vertikalen
- Symmetrischer Aufbau im Grundriss; Vermeidung von größeren Massenzentritäten gegenüber Steifigkeitsmittelpunkt (Bild 8)
- Aussteifung mit ähnlicher Steifigkeit und Tragfähigkeit in jeder der Hauptrichtungen
- Ausreichende Torsionssteifigkeit und –widerstand
- Geschossdecken mit Scheibenwirkung
- Geeignete Gründung zur Sicherstellung einer einheitlichen Bauwerksanregung

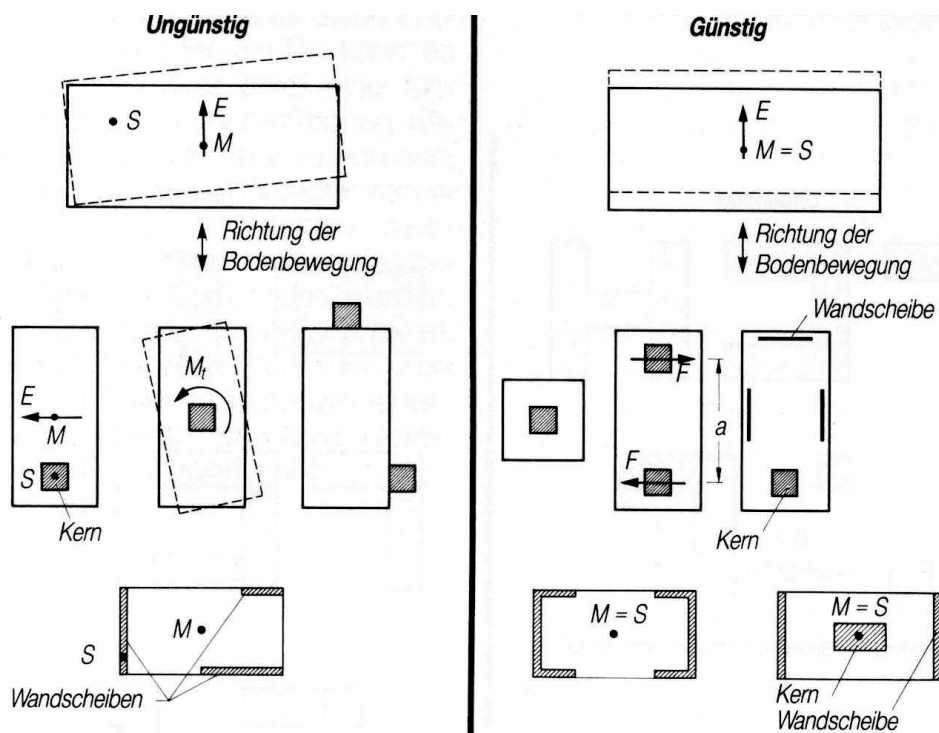
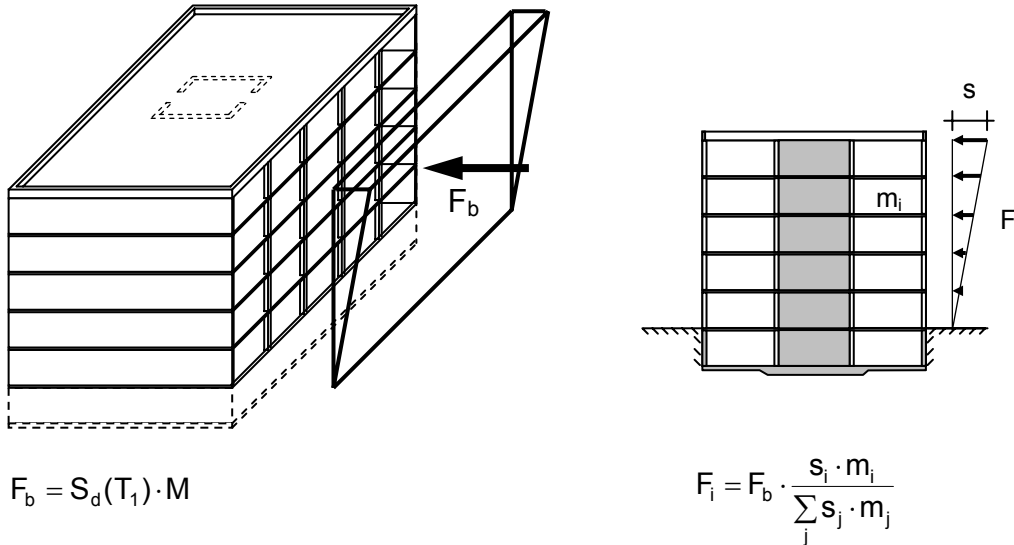


Bild 8: Günstige und ungünstige Verteilung von Massen und Steifigkeiten im Grundriss [5]

Entsprechend sind diese und weitere ergänzende Konstruktionsmerkmale in DIN 4149, Kapitel 4 als Grundprinzip für Entwurf und Bemessung explizit angegeben. Sie bilden auch die Basis für die Anwendung der Regeln der Norm zur Berechnung und Bemessung der Tragwerke.

So ermöglicht zum Beispiel die Einhaltung der Regeln für die Regelmäßigkeit (vgl. DIN 4149, Abs. 4.3) die Anwendung des „Vereinfachten Antwortspektrenverfahrens“, bei dem die Erdbebenkräfte „einfach“ mit der linearisierten Grundschwingungsform des Bauwerks ermittelt werden dürfen (Bild 9).



$$F_b = S_d(T_1) \cdot M$$

$$F_i = F_b \cdot \frac{s_i \cdot m_i}{\sum_j s_j \cdot m_j}$$

Bild 9: Vereinfachtes Antwortspektrumverfahren

Das Antwortspektrenverfahren ist in DIN 4149 als Referenzverfahren für die Bestimmung der Erdbebenkräfte angegeben. Mit einem linear-elastischen Tragwerksmodell können die Erdbebenkräfte unter Berücksichtigung der Schwingungseigenformen und der Verwendung des Normspektrums bestimmt werden. Wenn die Voraussetzungen für die vereinfachte Berechnung mit der Grundschwingungsform nicht erfüllt sind, sind die Kräfte für eine ausreichende Anzahl der Schwingungsformen zu ermitteln. Die zugehörigen Schnittgrößen und Verschiebungen werden nach den angegebenen Kombinationsregeln zur Bestimmung der Maximalwerte überlagert.

Vor dem Hintergrund, dass die Erdbebenauslegung des Bauwerks für ein Erdbebenereignis mit der Wiederkehrperiode von 475 Jahren geführt wird, ist es ein Gebot der Wirtschaftlichkeit, die nichtlinearen Tragreserven gezielt zu nutzen. Voraussetzung dafür ist jedoch duktiler Verhalten, d.h. plastische Verformbarkeit des Tragwerks ohne einen nennenswerten Rückgang seines Tragwiderstandes. Diese Eigenschaft bietet die Möglichkeit, die bei einem Erdbeben dem Bauwerk zugeführte Energie durch plastische Formänderungsarbeit in den Schwingungszyklen zu dissipieren. Mit steigender Seismizität wird die Tragwerksduktilität neben dem Tragwiderstand zu einem weiteren wesentlichen Element der Planungsstrategie. Die Duktilität ist nicht nur ein Mittel für die wirtschaftliche Dimensionierung des Tragwerks; bei starken Erdbeben, deren Größe im Voraus nur schwer quantifizierbar ist, ist sie für das Überleben des Tragwerks dringend erforderlich.

DIN 4149 erlaubt die Nutzung des nichtlinearen Verhaltens mit Energiedissipation zur Bemessung der Bauwerke für Kräfte, die kleiner als die linear-elastischen Reaktionskräfte sind (vgl. Bild 10).

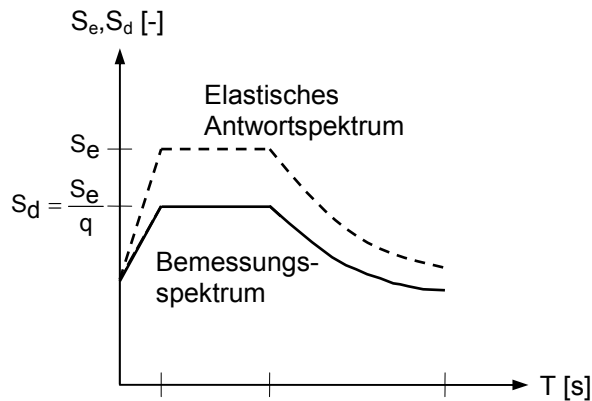


Bild 10a: Antwortspektren nach DIN 4149 [1]

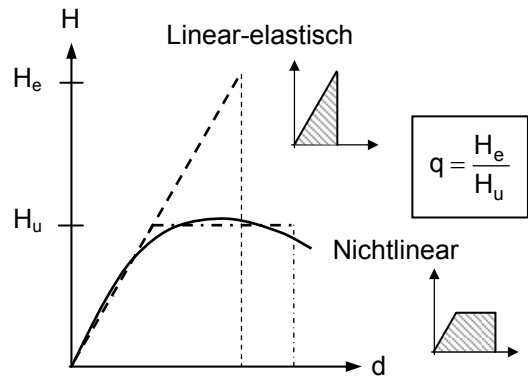


Bild 10b: Kraft-Verschiebungsbeziehung des Tragwerks - Verhaltensbeiwert q

Hierzu wird das elastische Antwortspektrum durch den konstruktions- und bauart-spezifischen Verhaltensfaktor q auf das Bemessungsspektrum abgemindert. Im Plateaubereich gilt:

$$S_{d(T)} = \frac{S_{e(T)}}{q}$$

Es handelt sich hier um ein praxisbezogenes Näherungsverfahren, bei dem die nichtlinearen, dissipativen Trageigenschaften eines Bauwerks in einer linearen Tragwerksberechnung pauschal mit einem Beiwert berücksichtigt werden.

Die Verhaltensfaktoren sind in Abhängigkeit vom Tragsystem und Bauart in den einzelnen Materialabschnitten angegeben. Bild 11 gibt einen Überblick über die einzelnen Bereiche (min /max q).

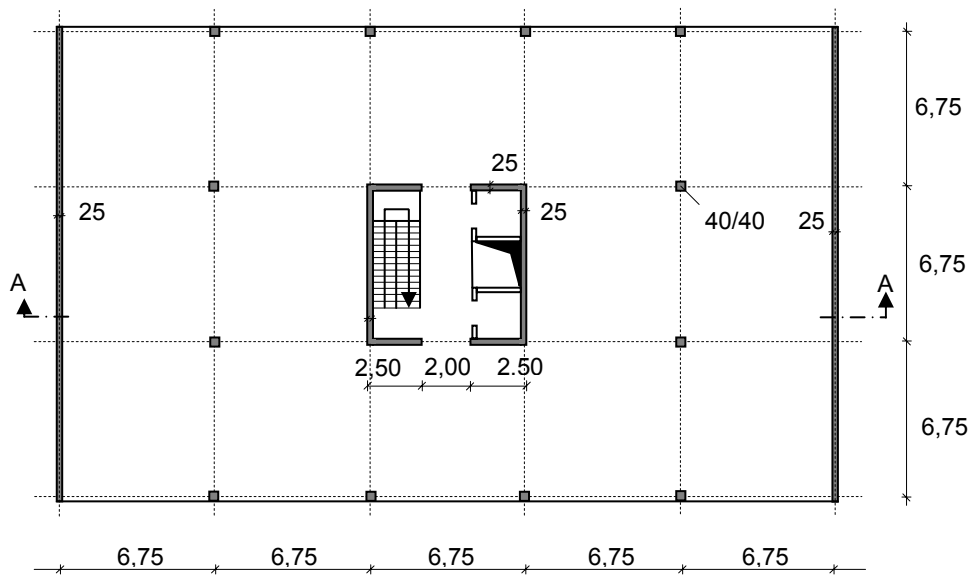
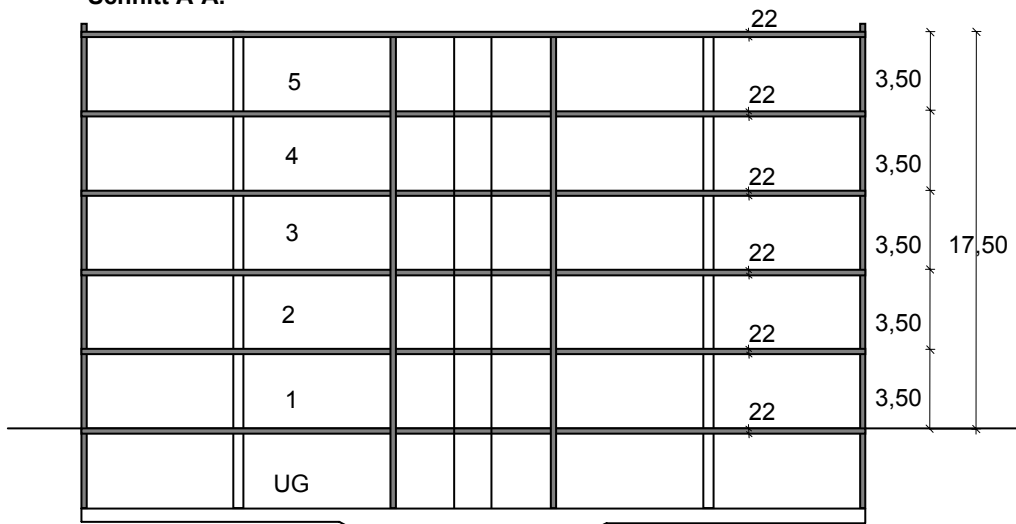
Bauart	Verhaltensbeiwert	
	min q	max q
Beton	1,5	3,0
Stahl	1,5	8,0
Holz	1,5	4,0
Mauerwerk	1,5 (unbewehrt)	2,5 (bewehrt.)

Bild 11: Verhaltensbeiwerte nach DIN 4149 [1]

Die in Bild 11 angegebenen Verhaltensbeiwerte dürfen jedoch nur dann in Ansatz gebracht werden, wenn die Voraussetzungen für die entsprechende Energie-dissipationsfähigkeit gegeben sind bzw. durch besondere Maßnahmen im Tragwerk sichergestellt werden. Höhere Werte für den Verhaltensfaktor erfordern bestimmte Tragwerksarten und die sorgfältige konstruktive Durchbildung der Bauteile, damit das entsprechende Duktilitätspotenzial im Tragwerk erreicht werden kann.

Beispiel

Bürogebäude

**Schnitt A-A:**

Standort siehe oben (Tübingen, Erdbebenzone 3)

Bedeutungskategorie II \Rightarrow Bedeutungsfaktor $\gamma_I = 1,0$

Stahlbetontragwerk mit aussteifenden Wänden

Wahlmöglichkeiten für die Bemessung:

1. Duktilitätsklasse 1 \Rightarrow Verhaltensbeiwert $q = 1,5$ (q_{\min})
2. Duktilitätsklasse 2 \Rightarrow Verhaltensbeiwert $q = 3,0$ (q_{\max})
unter Beachtung von DIN 4149, Abs. 8.3.3.1
„Tragwerkstyp“: Wandsystem

Hier gewählt: Duktilitätsklasse 1

Voraussetzungen nach DIN 4149, Abs. 8.2:

- Betonfestigkeitsklasse \geq C 16/20 (hier: C30/37)
- Betonstahl: Hochduktiler Stahl (Typ B)
- Bemessungswert der bezogenen Normalkraft für den Aussteifungskern:

$$v_d = \frac{N_d}{A_C \cdot f_d} \leq 0,2 \quad (\text{DIN 4149, Abs. 8.2.(5)c})$$

Kontrolle:

Lasteinzugsfläche Kern:

$$A = 13,5 \cdot 13,5 = 182 \text{ m}^2$$

Belastung pro m² Geschosdecke:

$$q = 7,5 + 0,7 = 8,2 \text{ kN/m}^2$$

Querschnittsfläche Kern:

$$A_C = 5,75 \text{ m}^2$$

$$N_d = 5 \cdot (182 \text{ m}^2 \cdot 8,2 \text{ kN/m}^2 + 5,75 \text{ m}^2 \cdot 3,28 \text{ m} \cdot 25 \text{ kN/m}^3) = 9820 \text{ kN}$$

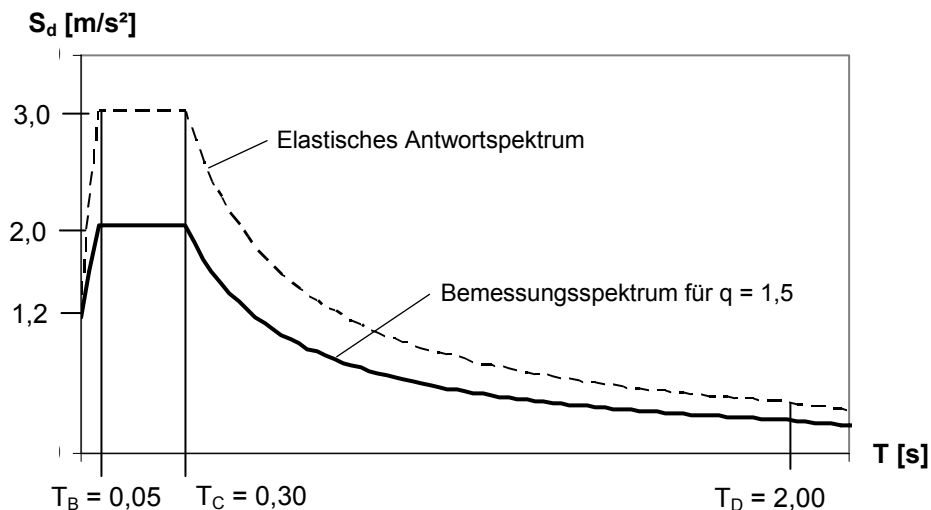
$$f_d = 0,85 \cdot 30,0/1,5 = 17,0 \text{ MN/m}^2$$

$$v_d = \frac{9,28 \text{ MN}}{5,75 \text{ m}^2 \cdot 17,0 \text{ MN/m}^2} = 0,09 < 0,2$$

Die Voraussetzungen gemäß DIN 4149, Abs. 8.2 sind erfüllt.

Bemessungsspektrum für horizontale Erdbebeneinwirkung:

mit dem Verhaltensfaktor $q = 1,5$: $S_d = \frac{S_e}{q} = \frac{S_e}{1,5}$ (im Plateau)



Berechnungsverfahren:

Kontrolle der Voraussetzungen für das vereinfachte Antwortspektrenverfahren:

- Konstruktive Regeln für die Regelmäßigkeit im Grundriss und Aufriss erfüllt
- Grundschwingzeit in Gebäudelängsrichtung

$$T_1 = \frac{2\pi \cdot h^2}{\alpha_1^2} \sqrt{\frac{m_1}{h_1 \cdot EI}}$$

mit $h = 17,50 \text{ m}$ (Gebäudehöhe über Kellergeschoss)
 $\alpha_1 = 1,73$ (Schwingzeitbeiwert)
 $m_1 = 750 \text{ t}$ (Geschossmasse)
 $h_1 = 3,50 \text{ m}$ (Geschosshöhe)
 $EI = 96300 \text{ MN} \cdot \text{m}^2$ (Biegesteifigkeit in Gebäudelängsrichtung)

$$T_1 = \frac{2\pi \cdot 17,5^2 \text{ m}^2}{1,73^2} \sqrt{\frac{750 \frac{\text{kN} \cdot \text{s}^2}{\text{m}}}{3,50 \text{ m} \cdot 96,3 \cdot 10^6 \text{ kN} \cdot \text{m}^2}}$$

$$T_1 = 1,0 \text{ s} < 4 \cdot T_C = 4 \cdot 0,3 \text{ s} = 1,2 \text{ s} \quad (\text{DIN 4149, Abs. 6.2.2.1 erfüllt})$$

In Gebäudequerrichtung ist die Eigenschwingzeit kürzer.

Gesamterdbebenkraft in Gebäudelängsrichtung:

$$F_b = S_d(T_1) \cdot M \cdot \lambda$$

S_d : Aus dem Bemessungsspektrum für $T_1 = 1,0 \text{ s} > T_C = 0,3 \text{ s}$
 $< T_D = 2,0 \text{ s}$

$$S_d(T_1) = 2,0 \text{ m/s}^2 \cdot 0,3 \text{ s} / 1,0 \text{ s} = 0,6 \text{ m/s}^2$$

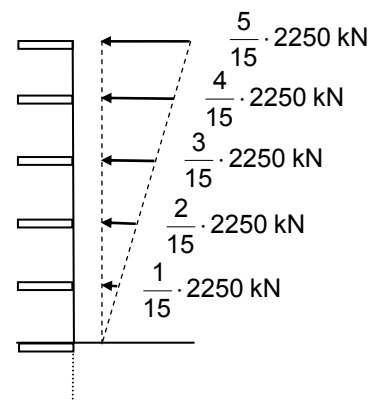
$$M = 5 \cdot 750 = 3750 \text{ t}$$

$$\lambda = 1,0 \quad (T_1 > 2 \cdot T_C)$$

$$F_b = 0,6 \text{ m/s}^2 \cdot 3750 \text{ t} = 2250 \text{ kN}$$

Verteilung auf die Geschosdecken:

$$F_i = F_b \cdot \frac{h_i \cdot m_i}{\sum h_j \cdot m_j}$$



5. Nachweis der Standsicherheit, konstruktive Durchbildung

Der Nachweis der Tragfähigkeit ist gemäß DIN 1055-100 für die Erdbebenbemessungssituation wie folgt zu führen:

$$E_d \leq R_d$$

$$E_d = E [\sum G_k \oplus P_k \oplus \gamma_1 \cdot A_{Ed} \oplus \sum \psi_{2,i} \cdot Q_{ki}] \leq R_d$$

$$\text{mit } R_d = R \left[\frac{f_k}{\gamma_M} \right]$$

Es muss nachgewiesen werden, dass der Bemessungswert der jeweiligen Schnittgröße in der Erdbebenbemessungssituation kleiner als die Bemessungstragfähigkeit des Bauteils, ermittelt nach baustoffbezogenen Anforderungen, ist. Hierbei sind die bauart- und tragwerksspezifischen Verhaltensbeiwerte, falls erforderlich auch die Wirkungen nach Theorie II. Ordnung, zu berücksichtigen. Der in DIN 1055-100 genannte Wichtungsfaktor ist für Einwirkungen aus Erdbeben $\gamma_1 = 1,0$ zu setzen.

Über die Tragfähigkeitsbedingung hinaus ist die Duktilitätsbedingung zu erfüllen, d.h. die für die Schnittgrößenermittlung der tragenden Bauteile und des Gesamttragwerks zugrunde gelegte Duktilität ist nachzuweisen. Dieser Nachweis gilt als erfüllt, wenn die in den Abschnitten

- Besondere Regeln für Betonbauten (DIN 4149, Abs. 8)
- Besondere Regeln für Stahlbauten (DIN 4149, Abs. 9)
- Besondere Regeln für Holzbauten (DIN 4149, Abs. 10)
- Besondere Regeln für Mauerwerksbauten (DIN 4149, Abs. 11)
- Besondere Regeln für Gründungen und Stützbauwerke (DIN 4149, Abs. 11)

genannten Festlegungen berücksichtigt sind. Mit der Duktilitätsbedingung wird im Prinzip der Ansatz eines Verhaltensfaktors $q > 1$ verifiziert.

Sonderfälle des Nachweises der Standsicherheit:• Ansatz des linear-elastischen Verhaltens ($q = 1$)

In diesem Fall ist der Tragfähigkeitsnachweis mit den Teilsicherheitsbeiwerten für Baustoffeigenschaften γ_M für die ständige und vorübergehende Bemessungssituation zu verwenden.

• Entfallen des Nachweises

Zur Vereinfachung des Erdbebennachweises werden die Nachweise als erbracht angesehen, wenn bestimmte Voraussetzungen erfüllt sind. Folgende Fälle sind denkbar:

1. Gesamterdbebenkraft mit $q = 1 <$ maßgebende Horizontalkraft aus Wind und die grundsätzlichen Entwurfsregeln sind eingehalten.

2. Bei Wohn- und Bürogebäuden (Bedeutungskategorie II):

Anzahl der Vollgeschosse $\leq \max n_G$ (Bild 12)

Erdbebenzone	Bedeutungskategorie	Maximale Anzahl von Vollgeschossen
1	I bis III	4
2	I und II	3
3	I und II	2

Bild 12: Bedeutungskategorie und zulässige Anzahl der Vollgeschosse für Hochbauten ohne rechnerischen Standsicherheitsnachweis

Ferner müssen die grundsätzlichen Anforderungen an erdbebengerechtes Konstruieren erfüllt sein. Für Mauerwerksbauten sind auch zusätzliche bauartspezifische Regeln einzuhalten.

In anderen Fällen ist der Nachweis der Tragfähigkeit explizit zu führen und die der gewählten Duktilitätsklasse entsprechende konstruktive Durchbildung der Bauteile sicherzustellen.

In DIN 4149 sind die in Bild 13 aufgeführten Duktilitätsklassen und zugehörige Verhaltensbeiwerte vorgesehen:

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	$q = 2,5$

Bild 13: Duktilitätsklassen und zugehörige Verhaltensbeiwerte

Betrachtet man die jeweils niedrigste Duktilitätsklasse in den einzelnen Bauarten, so beträgt der korrespondierende Verhaltensbeiwert überall $q = 1,5$ (vgl. Bild 13). Bei diesem relativ niedrigen Wert bleibt die Inanspruchnahme von Duktilität – insbesondere unter Berücksichtigung der üblicherweise vorhandenen Überfestigkeiten – gering. In Stahl-, Holz- und Mauerwerksbauten wird davon ausgegangen, dass mit der Bemessung der Tragwerke gemäß den üblichen Bemessungsnormen und der Einhaltung der Konstruktionsregeln (s.o.) eine Duktilität dieser Größenordnung zur Verfügung steht [7]. In Stahlbetonbauten werden für bestimmte Bauteile (Druckglieder, Rahmenriegel) explizite Forderungen gestellt. Die Duktilität wird durch Begrenzung von bezogener Längskraft und Bewehrungsgrad der Betonbauteile gesichert [8].

Der Ansatz von höheren Verhaltensfaktoren ($q > 1,5$) ist bauartabhängig durch die Wahl von höheren Duktilitätsklassen möglich. In diesen Fällen steigen naturgemäß die Anforderungen an die spezielle konstruktive Ausbildung der Bauteile zur Sicherstellung des duktilen Verhaltens. In Abhängigkeit der Tragsysteme und Bauart sind hier besondere Nachweise und konstruktive Sondermaßnahmen erforderlich.

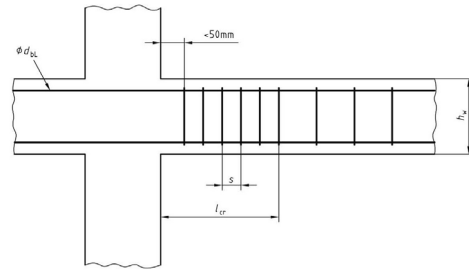
Für die Duktilitätsklasse 2 in Stahlbetonbauten und für die Duktilitätsklassen 2 und 3 in Stahlbauten gelten folgende Prinzipien:

- Zur Erzielung der erforderlichen globalen Duktilität sollen die potenziellen Bereiche für die Bildung plastischer Gelenke eine hohe plastische Rotationsfähigkeit besitzen.
- Dabei soll duktiles Gesamttragverhalten – gesteuert durch den Grenzzustand der Biegetragfähigkeit – mit genügend großer Zuverlässigkeit vor sprödem Versagen (Schubversagen) eintreten.

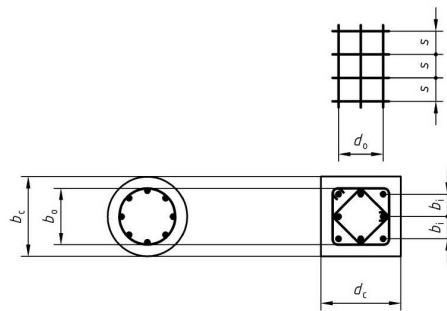
Die oben genannten Ziele setzen eine sorgfältige Abstimmung der Grenztragfähigkeiten der Bauteile (Biegung, Schub, in Stahl- und Holzkonstruktionen auch Verbindungen) voraus. Dies wird in DIN 4149 durch die Anwendung der Regeln der Kapazitätsbemessung (Capacity Design) erreicht. Hier geht es im Prinzip darum, einen dissipativen Gesamtmechanismus sicherzustellen, bei dem die dissipativen Bereiche ihre plastische Tragfähigkeit voll entwickeln können, bevor spröde bzw. weniger duktile Bereiche versagen. Zu diesem Zweck sind die Tragfähigkeiten der Sprödbereiche so zu dimensionieren, dass sie höher als aus der Forderung des Gleichgewichts mit dem benachbarten dissipativen Bereichen unter Berücksichtigung von Überfestigkeiten liegen. So wird erreicht, dass die „Kapazität“ der dissipativen Bauteile die Kapazität des Tragsystems bestimmt und das damit verbundene gutmütige dissipative Verhalten sicherstellt [9].

Nach der Sicherstellung des duktilen Gesamttragverhaltens (globale Duktilität) sind die zugehörigen potenziellen plastischen Gelenkbereiche durch entsprechende konstruktive Maßnahmen so auszubilden, dass sie das erforderliche Maß an lokaler Duktilität aufweisen.

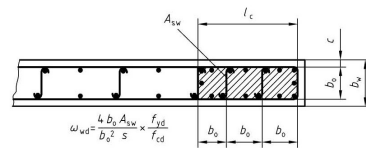
In Stahlbetonbauteilen wird dies in der Regel durch eine enge Umschnürung der Stabendbereiche erreicht (Bild 14).



Balken



Stützen



Wände

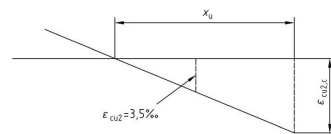
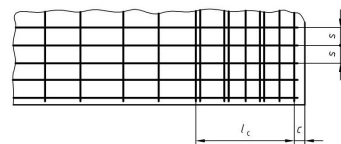


Bild 14: Konstruktive Maßnahmen im Stahlbetonbau [1]

Die hohen Verhaltensbeiwerte für Stahlbauten (Bild 15) machen eine sorgfältige konstruktive Durchbildung des Gesamttragwerks notwendig. Mit der Kapazitätsbemessung ist in Abhängigkeit der Konstruktionsart der gewünschte dissipative Grenzmechanismus sicherzustellen. Zur bestmöglichen Nutzung des plastischen Formänderungsvermögens des Werkstoffs sind die Bauteile so auszubilden, dass kein frühzeitiges Stabilitätsversagen eintritt. Entsprechend sind in druckbeanspruchten Bauteilen Querschnittsklassen 2 bzw. 1 zu verwenden und Schlankheiten zu begrenzen.

Tragwerkstyp	Skizze und Schätzwert α_u/α_1	Verhaltensbeiwert q
1		$5 \cdot \frac{\alpha_{II}}{\alpha_I} \leq 8$
2	a)	4
	b)	2

Bild 15: Tragwerkstypen und Verhaltensbeiwerte für Stahlbauten – Auszug aus [1]

In Holzbauten sind die Duktilitätsklassen mit dem Tragwerkstyp und der Anzahl der dissipativen Bereiche mit stiftförmigen Verbindungsmitteln verbunden.

In Mauerwerksbauten sind höhere Verhaltensbeiwerte bei den Bauweisen „Eingefasstes Mauerwerk“ und „Bewehrtes Mauerwerk“ möglich [9]. In der Norm sind die zugehörigen konstruktiven Anforderungen angegeben.

Bemerkungen zur Anwendung in der Praxis:

Angesichts der Tatsache, dass es sich in deutschen Erdbebengebieten um eine im Prinzip niedrige Seismizität (vgl. Eurocode 8) handelt, kann davon ausgegangen werden, dass der Ansatz von großen Verhaltensbeiwerten und hohen Duktilitätsklassen in den meisten Fällen nicht notwendig ist.

Die Bemessung der Bauwerke mit einem Verhaltensbeiwert $q = 1,5$ wird in der Praxis den üblichen Fall darstellen. Das Wissen um die Möglichkeiten zur Erhöhung der Duktilität kann jedoch auch in einzelnen Fällen dazu genutzt werden, durch sinnvolle Konstruktionsmaßnahmen das Duktilitätspotenzial des Tragwerks zur Erhöhung der Erdbebensicherheit anzuheben.

6. Zusammenfassung

Die neue Erdbebennorm DIN 4149:2005-04 wurde auf der Grundlage von Eurocode 8 unter Berücksichtigung der neueren Entwicklungen in der Beschreibung der seismischen Einwirkungen und in der Erdbebenauslegung von Hochbauten erarbeitet. Sie dient damit auch als Grundlage für Regelungen in einem Nationalen Anhang zu einer zukünftigen EN 1998-1.

Mit der Neufassung der deutschen Erdbebenzonenkarte auf probabilistischer Grundlage und der Entwicklung von untergrundabhängigen Beschleunigungsspektren führt die Norm ein neues weiterentwickeltes Konzept für Erdbebenwirkungen ein.

Die Auslegung der Bauwerke gegen Erdbeben wird unter Berücksichtigung der Nutzung, Konstruktion und Bauart differenziert vorgenommen. Duktile Trageigenschaften und Energiedissipationsfähigkeit können bei der Bemessung durch den so genannten Verhaltensbeiwert erdbebenlastmindernd berücksichtigt werden. Zusätzlich zu den allgemeinen Konstruktionsregeln für Bauten in Erdbebengebieten sind die vorgeschriebenen Nachweiskonzepte für den Nachweis der Tragfähigkeit und Duktilität bauart- und konstruktionsabhängig anzuwenden.

Literatur

- [1] DIN 4149: 2005-04: Bauten in deutschen Erdbebengebieten. Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten
Normenausschuss im Bauwesen (NABau) im DIN – April 2005, Berlin
- [2] DIN 4149-1: 1981-04: Bauten in deutschen Erdbebengebieten. Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten, April 1981, Berlin
- [3] EN 1998-1: 2004. Eurocode 8. Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben. Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten.
- [4] Grünthal, G., Bosse, C.: Probabilistische Karte der Erdbebengefährdung der Bundesrepublik Deutschland – Erdbebenzonenkarte für das Nationale Anwendungsdokument zum Eurocode 8. Forschungsbericht, Geo Forschungszentrum Potsdam 1996
- [5] Schwarz, J., Grünthal, G.: Bauten in deutschen Erdbebengebieten – zur Einführung der DIN 4149:2005. Bautechnik 82 (2005) H. 8, S. 486 – 499.
- [6] Erdbebensicher Bauen. Planungshilfe für Bauherren, Architekten und Ingenieure
Innenministerium Baden Württemberg
- [6] Erdbebensicher Bauen. Planungshilfe für Bauherren, Architekten und Ingenieure
Innenministerium Baden Württemberg
- [7] Ötes, A., Löring, S.: Zum Tragverhalten von Mauerwerksbauten unter Erdbebenbelastung.
Bautechnik 83 (2006) H. 2, S. 125 – 138.
- [8] Keintzel, E.: Entwicklung der Erdbebenauslegung von Stahlbetonbauten in Deutschland.
Beton- und Stahlbetonbau 93 (1998), S. 245 – 251
- [9] Paulay, T., Bachmann, H., Moser, K.: Erdbebenbemessung von Stahlbetonhochbauten,
Birkhäuser Verlag, 1990
- [10] Ötes, A., Elsche, B.: Erhöhung der Tragfähigkeit von KS-Wänden unter Erdbebenlasten durch Bewehrung. Universität Dortmund – Schriftenreihe Tragkonstruktionen, Heft 2, 2005