

Tech-News 02/06 Folge 1 Fachgebiet: Stahlbeton, Erdbeben

von Dr.-Ing. F.-H. Schlüter
Prüfingenieur für Baustatik VPI
Ingenieure im Bauwesen GbR (ehem. Prof. Eibl + Partner GbR)
Stephanienstr. 102, 76133 Karlsruhe
e-mail: fh.schlueter@iibw.de www.iibw.de

Die neue DIN 4149 – Erdbebensicherung von Massivbauwerken

1 Allgemeines

Im April 2005 ist neue DIN 4149:2005-04 „Bauten in deutschen Erdbebengebieten“ als Weißdruck erschienen und wurde mit Bekanntmachung über die Liste der technischen Baubestimmungen vom 22.11.2005 in Baden-Württemberg bauaufsichtlich eingeführt, ergänzt durch die Anlage 5.1/1 zur LTB. Gegenüber der alten Norm haben sich eine Reihe von Änderungen ergeben. Im vorliegenden Beitrag sollen schwerpunktmäßig die neuen Regelungen bzgl. der Auslegung von Betonbauten erläutert werden. Einleitend wird jedoch noch auf allgemeine Grundlagen und Berechnungskonzepte eingegangen, da diese für das Verständnis wichtig sind.

2 Entwurfsgrundlagen

Beim Entwurf von Gebäuden in Erdbebengebieten ist die frühzeitige Berücksichtigung bestimmter Anforderungen zur Erzielung eines erdbebensicheren Tragwerks von großer Bedeutung. Die Grundaufgabe der Erdbebensicherung besteht darin, durch Entwurf, Konstruktion und Bemessung die einem Bauwerk durch Bodenbewegungen zugeführte Schwingungsenergie so zu lenken, zu verteilen und in andere Energieformen umzuwandeln, dass große Zerstörungen vermieden werden. Dementsprechend ist auf ein klar strukturiertes Tragwerk mit weitgehenden Regelmäßigkeiten sowohl im Grundriss als auch über die Bauwerkshöhe zu achten. Hinsichtlich der räumlichen Tragfähigkeit und Steifigkeit kommt neben den vertikalen Tragelementen der Scheibenwirkung der Geschossdecken große Bedeutung zu. Durch die konstruktive Ausbildung der Gründung und deren Verbindung zum aufgehenden Bauwerk muss sichergestellt werden, dass große Relativverschiebungen der Gründungkörper untereinander verhindert werden und das gesamte Bauwerk in einheitlicher Art und Weise durch die Erdbebenbewegung beansprucht wird. Die einzelnen Bauteile sind so auszubilden, dass sie auch unter zyklischen Beanspruchungen eine ausreichende Fähigkeit

zur Energiedissipation ohne wesentlichen Abfall ihrer Tragfähigkeit gegenüber horizontalen und vertikalen Lasten besitzen. Durch die geforderte Regelmäßigkeit des Gebäudes im Grundriss und im Aufriss kann die Erdbebenbeanspruchung klarer erfasst und bei der Auslegung zielsicher berücksichtigt werden. Ebenso ist der erforderliche Modellierungs- und Berechnungsaufwand – d.h. ebenes bzw. räumliches Modell bzw. Berücksichtigung einer oder mehrerer Schwingungsformen – und die Größe des Verhaltensbeiwertes von den Regelmäßigkeitskriterien abhängig.

3 Grundlegende Berechnungskonzepte

Die neu DIN 4149:2005-04 unterscheidet sich gegenüber der Vorgängernorm vor allem in der Definition der Einwirkungen, während die grundlegenden Berechnungskonzepte dieselben sind. Auch in der neuen Fassung erfolgt die Tragwerksbemessung auf der Basis von Schnittgrößen, die mit Hilfe linear-elastischer Modelle ermittelt werden. Die nichtlinearen und dissipativen Eigenschaften bestimmter Baustoffe und Tragwerksarten werden vereinfacht und pauschal durch Abminderungsfaktoren, den sog. Verhaltensbeiwerten q , berücksichtigt. Für die Bemessung wird das elastische Antwortspektrum durch den Verhaltensbeiwert geteilt und somit die Einwirkung rechnerisch reduziert. Hieraus ergeben sich Zähigkeits- oder Duktilitätsanforderungen, auf die dann die Konstruktion abzustimmen ist. Auch spielen die Regelmäßigkeitseigenschaften und die Bedeutungskategorien hierbei eine Rolle.

Als Standard-Rechenverfahren wird das multimodale Antwortspektrenverfahren verwendet. Bei Erfüllung einer Reihe von Regelmäßigkeitskriterien im Grund- und Aufriss und einer nicht zu kleinen Grundperiode darf jedoch auch das vereinfachte Antwortspektrenverfahren mit nur einer einzigen Schwingungsform zum Einsatz kommen. Nachweise basieren prinzipiell auf Kapazitätsbemessungsüberlegungen, um eine ausreichende Duktilität und Festigkeit sowie die Erhaltung der energiedissipierenden Mechanismen zu gewährleisten. Zur Sicherstellung ausreichender Tragfähigkeitsreserven und Zähigkeit werden ferner umfangreiche Anforderungslisten für Konstruktionsmerkmale zusammengestellt, bei deren Einhaltung der Erdbebennachweis stark vereinfacht wird bzw. ganz entfallen kann. Bei den Nachweisen wird das aktuelle Konzept der Teilsicherheitsbeiwerte eingeführt, als Ersatz des früheren globalen Sicherheitskonzepts, das nicht mehr mit der neuen Normengeneration kompatibel ist.

3.1 Standsicherheitsnachweise

In der alten DIN 4149 sind die Regelungen bezüglich der Nachweise zur Standsicherheit relativ kurz gehalten. Als Lastfallkombination sind die Schnittgrößen nach Theorie 1. Ordnung infolge regelmäßig auftretender Lasten – jedoch ohne Windlasten – mit dem Lastfall Erdbeben zu überlagern. Auf Basis des früher üblichen globalen Sicherheitskonzeptes sind für die so nach der Elastizitätstheorie ermittelten Schnittgrößen zulässige Sicherheitsbeiwerte bzw. Spannungen einzuhalten, die für die verschiedenen Baustoffe bzw. -arten angegeben werden. Die gesamten materialspezifischen Regelungen einschließlich der konstruktiven Maßnahmen zur Gewährleistung einer ausreichenden Zähigkeit sind in der alten Norm auf einer einzigen Seite geregelt.

Die Regelungen in der neuen DIN 4149 sind dagegen wesentlich umfangreicher. Sie lehnen sich sehr stark an den neuen EC 8, Teil 1 an, der einen Umfang von ca. 250 Seiten aufweist. Gegenüber dem Entwurf der DIN 4149 von 2004 wurden in der aktuellen Fassung noch zahlreiche Änderungen und Präzisierungen vorgenommen, die sich teils aus den Anregungen zahlreicher Einsprüche ergeben haben, teils aus Anpassungen an den neuen EC 8. Dies betrifft insbesondere auch die materialspezifischen Regelungen.

In Anpassung an die neue Normengeneration mit Teilsicherheitsbeiwerten und neuen Kombinationsregeln ist in der Erdbebenbemessungssituation der Grenzzustand der Tragfähigkeit nachzuweisen. Forderungen zum Grenzzustand der Gebrauchsfähigkeit werden im Hinblick der Zielrichtung der Norm – primär die Vermeidung von Personenschäden – nicht erhoben und bleiben dem Bauherrn überlassen. Entsprechend der inzwischen eingeführten DIN 1055-100 muss in der Bemessungssituation Erdbeben die Einwirkung unter Berücksichtigung des Verhaltensbeiwertes q kleiner sein als der Widerstand, d.h. der folgende Nachweis muss geführt werden (vgl. DIN 1055-100):

$$\begin{aligned}
 E_{dAE} &\leq R_d \\
 R_d &= R \left\{ \frac{f_k}{\gamma_M} \right\} \\
 E_{dAE} &= E \left\{ \sum G_{k,j} \oplus P_k \oplus \gamma_I \times A_{Ed} \oplus \sum \Psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \right\}
 \end{aligned} \tag{1}$$

Hinsichtlich des Nachweiskonzeptes und der Bezeichnungen wird auf DIN 1055-100 verwiesen. Es sei hier darauf hingewiesen, dass in der obigen Gleichung (1) der Beiwert γ_I nach DIN 1055-100 (Wichtungsfaktor für Einwirkungen aus Erdbeben) nicht identisch ist mit dem Bedeutungsbeiwert γ_I nach DIN 4149. Der Wert γ_I aus DIN 1055-100 kann mit 1.0 angenommen werden.

Die Beanspruchungen infolge Erdbeben A_{Ed} wird entsprechend Gl. (2) bestimmt:

$$A_{Ed} = A \left\{ \sum G_{k,j} \oplus \sum \varphi \cdot \Psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \right\} \quad (2)$$

Das Schwingungsverhalten und die Massenträgheitskräfte werden aus den charakteristischen Werten der ständigen Einwirkung $G_{k,i}$ (Eigengewicht) sowie einem Anteil der Nutz- und Verkehrslasten $Q_{k,i}$ ohne Teilsicherheitsbeiwert, jedoch unter Berücksichtigung spezieller Kombinationsbeiwerte $\varphi \cdot \Psi_{2,i}$ ermittelt. Da es sich beim Erdbeben um einen zyklischen Vorgang handelt, sind alle Schnittgrößen mit wechselnden Vorzeichen zu betrachten. Es wird besonders darauf hingewiesen, dass in Baden-Württemberg die Schneelasten abweichend von den Regelungen der DIN 4149 und DIN 1055-100 in jedem Fall mit einem Kombinationswert $\Psi_2 = 0.5$ zu berücksichtigen sind.

Bei vielen Bauwerken ist Torsionswirkung um die vertikale Achse für die üblichen statischen Lastkombinationen gering. Für den Lastfall Erdbeben trifft dies jedoch oft nicht mehr zu. Hier muss die dynamische Torsionswirkung je nach Verteilung von Horizontalsteifigkeiten und Massen sowie des verwendeten Rechenmodell berücksichtigt werden. Neben der tatsächlichen Exzentrizität e_0 als Abstand zwischen Steifigkeitsmittelpunkt und Massenschwerpunkt müssen noch zusätzliche Exzentrizitäten e_1 und ggf. e_2 berücksichtigt werden. Der Wert e_1 beschreibt eine zufällige Exzentrizität infolge der Unkenntnis der genauen Lage der Geschossmassen, der Wert e_2 die Berücksichtigung der dynamischen Wirkung von sich gegenseitig beeinflussenden Translations- und Torsionsschwingungen, sofern dies im verwendeten Rechenmodell nicht genauer erfasst wird.

Wenn die Bedingungen zur Anwendung des vereinfachten Antwortspektrenverfahrens erfüllt sind, kann die Wirkung durch ein Torsionsmoment als ruhende Belastung infolge exzentrischer Anordnung der horizontalen Erdbebenkraft F_i in jedem Geschoss ermittelt werden. Es sind die einhüllenden Schnittkräfte infolge der beiden Exzentrizitäten e_{min} und e_{max} (vgl. Bild 1) der Bemessung zugrunde zu legen.

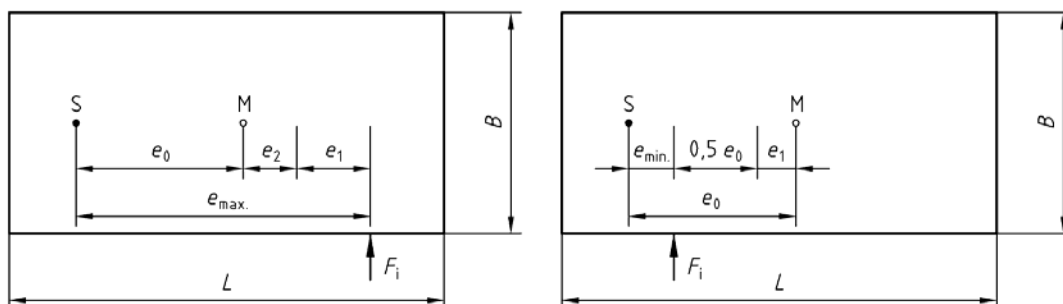


Bild 1: Berücksichtigung der Exzentrizitäten bei vereinfachten Berechnungsmodellen

Die genaue Erfassung der zufälligen Torsionswirkungen ist bei Verwendung eines räumlichen Berechnungsmodells ohne umfangreiche Parameterstudien nur schwer möglich. Daher kann diese Wirkung vereinfacht in jedem Geschoss i durch Ansatz eines Torsionsmomentes M_{1i} um die vertikale Achse erfasst werden, wobei die Torsionsmomente mit wechselnden Vorzeichen, für alle Geschosse jeweils in die gleiche Richtung drehend, anzunehmen sind:

$$M_{1i} = \pm e_{1i} \cdot F_i \quad (3)$$

Die beiden orthogonalen Horizontalkomponenten der Erdbebeneinwirkung sind im Allgemeinen als gleichzeitig wirkend zu betrachten. Werden die Beanspruchungen am Tragwerk für jede Horizontalrichtung x und y getrennt ermittelt, ist der Maximalwert jeder Beanspruchung als Quadratwurzel der Summe der Quadrate der für die beiden Richtungen berechneten Werte zu ermitteln. Alternativ können die Beanspruchungen als Einhüllende der beiden folgenden Kombinationen berechnet werden:

$$\begin{aligned} E_{Edx} \oplus 0.3 \cdot E_{Edy} \\ E_{Edy} \oplus 0.3 \cdot E_{Edx} \end{aligned} \quad (4)$$

Die Vertikalkomponente der Erdbebeneinwirkung beträgt in der Regel 70% der Horizontalkomponente. Sie braucht im Allgemeinen nur bei horizontalen Tragelementen wie Biegeträgern berücksichtigt werden, die vertikale Elemente wie Stützen tragen. Im Übrigen ist diese Beanspruchung durch die Auslegung gegen die üblichen Vertikallasten abgedeckt und braucht nicht gesondert nachgewiesen werden.

Der Nachweise der Standsicherheit gilt bei einfachen Bauwerken als erbracht, wenn bestimmte in der Norm aufgeführte Konstruktionsmerkmale eingehalten werden. Der Nachweis gilt auch als erbracht, wenn die mit $q=1$ (elastisches Antwortspektrum) ermittelte Gesamterdbebenkraft in jeder Richtung kleiner ist als die Gesamthorizontalkraft, für die das Bauwerk bei den üblichen Kombinationen auf Basis einer linear-elastischen Berechnung für die entsprechende Richtung bemessen wird.

Sind genauere Nachweisverfahren erforderlich, ist die Tragfähigkeit und die erforderliche Duktilität in Abhängigkeit des für die Schnittgrößenermittlung zugrunde gelegten Verhaltensbeiwertes q für die tragenden Bauteile und das Gesamttragwerk nachzuweisen. Eine Übersicht über die Bandbreite für q in Abhängigkeit der verwendeten Baustoffe bzw. Bauart bietet die

Tabelle 1. Hieraus wird ersichtlich, dass die Verhaltensbeiwerte im Betonbau im Vergleich mit den anderen Baustoffarten vergleichsweise moderat festgelegt wurden.

Tabelle 1: Bandbreite der Verhaltensbeiwerte q für verschiedene Baustoffarten

Bauart	min q	max q
Betonbau	1,5	3,0
Stahlbau	1,5	8,0
Holz	1,5	4,0
Mauerwerk	1,5	2,5

4 Auslegung von Betonbauten

4.1 Allgemeine Grundlagen

Als Betonbauten werden Bauwerke des Hoch- und Ingenieurbauwes aus dem Anwendungsbereich der DIN 4149 bezeichnet, die in erster Linie nach DIN 1045-1 ausgelegt werden. Neben üblichen Regelungen der DIN 1045-1 sind in DIN 4149 zusätzliche Regeln angegeben, die bei Betonbauten in deutschen Erdbebengebieten zu beachten sind. Im Rahmen dieses Beitrages können nicht alle spezifischen Regelungen für diese Bauart behandelt werden, da der Umfang des Betonbaus nahezu 1/3 der Norm umfasst und damit zu groß ist. Vielmehr soll hier auf grundsätzliche Zusammenhänge und diejenigen Regelungen eingegangen werden, die den größten Teil der in der Praxis vorkommenden Fälle abdeckt. Weiterführende allgemeine Hinweise zur Auslegung von Betonbauten sind in [6] bis [13] wiedergegeben.

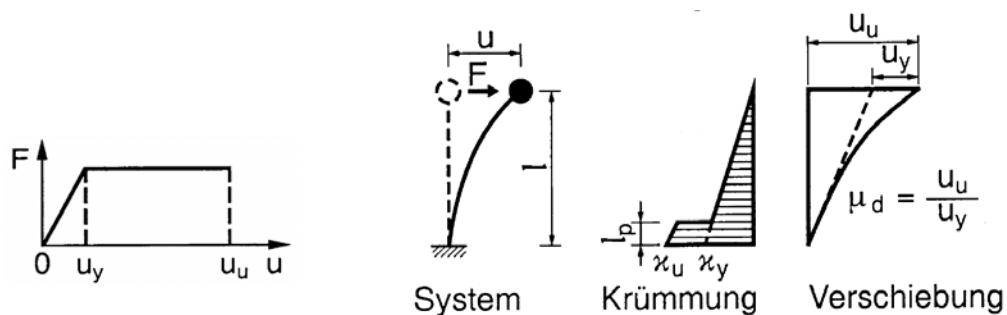
Es sei darauf hingewiesen, dass Betonbauten, bei denen Rahmen aus Stützen und Pilz- oder Flachdecken primär zur Aussteifung und Abtragung der horizontalen Belastungen aus Erdbeben genutzt werden sollen, nicht durch die Regelungen der DIN 4149 erfasst sind. Nur für Pilz- oder Flachdeckensysteme, bei denen die horizontale Aussteifung über getrennt Elemente wie Treppenhauskerne etc. erfolgt, sind möglich. Hierbei sind die Regelungen des Kapitels 8.4 zu beachten.

Grundsätzlich muss der Erdbebennachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit folgende zwei Aspekte umfassen:

- Nachweis der Tragfähigkeit für die mit dem Verhaltensbeiwert q abgeminderte Erdbebeneinwirkung

- Nachweis der Duktilität, die die vorausgesetzte Abminderung der Erdbebeneinwirkung erst ermöglicht

Bei einem Bauwerk unter Erdbebeneinwirkungen gehen die plastischen Strukturverformungen von den am höchsten beanspruchten Querschnitten aus. Bei stabförmigen Tragwerken sind dies in der Regel die Stabenden, an denen sich praktisch Fließgelenke ausbilden. Somit hängt die plastische Verformungsfähigkeit einer Struktur maßgeblich von der Rotationsfähigkeit dieser Plastifizierungsbereiche ab, bestimmt durch die Plastifizierungslänge l_p und dem sog. Krümmungsduktilitätsfaktor μ_ϕ . Die Plastifizierungslänge l_p wiederum hängt in erster Linie vom Verhältnis Zugfestigkeit zur Fließgrenze des Bewehrungsstahles ab. Der Krümmungsduktilitätsfaktor μ_ϕ als Verhältnis der Krümmung im Versagenszustand χ_u und dem Wert beim Beginn des Plastifizierens χ_y wird aus den Dehnungszuständen des betrachteten Querschnitts abgeleitet. Hierbei können sowohl Betonversagen als auch Stahlversagen maßgeblich werden. Um eine hohe Duktilität infolge Betonversagen zu erreichen kann man zum einen die Betonbruchstauchung durch Umschnürung (Bügel) erhöhen oder die Druckzonenhöhe begrenzen. Letzteres kann erfolgen durch Begrenzung der bezogenen Druckkraft, der Anordnung von Druckbewehrung oder der Begrenzung des Zugbewehrungsgrades. Einige Zusammenhänge sind in Bild 2 bis Bild 4 dargestellt.



Verschiebungsduktilitätsfaktor

$$\mu_d = u_u / u_y$$

Krümmungsduktilitätsfaktor

$$\begin{aligned} \mu_\phi &= \chi_u / \chi_y \\ &= 1 + \frac{(\mu_d - 1) \cdot l^2}{3l_p(l - 0.5l_p)} \end{aligned}$$

Plastischer Drehwinkel

$$\begin{aligned} \varphi_p &= l_p(\chi_u - \chi_y) \\ &= l_p \cdot \chi_y(\mu_\phi - 1) \end{aligned}$$

Bild 2: Zusammenhänge zwischen Systemverformung und Duktilitätsfaktoren

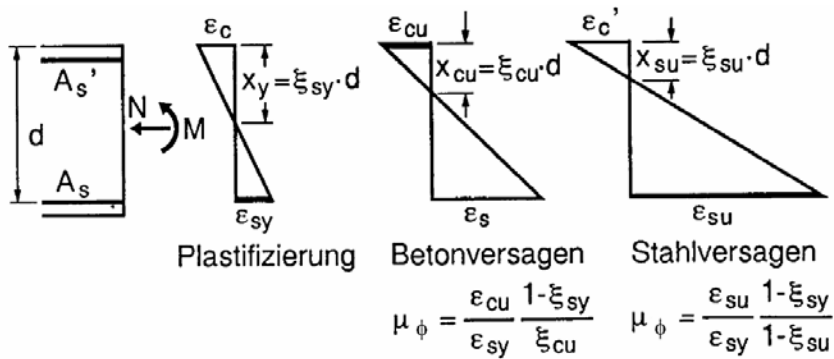


Bild 3: Örtliche Krümmungsduktilität eines Stahlbetonquerschnittes (vgl. [7])

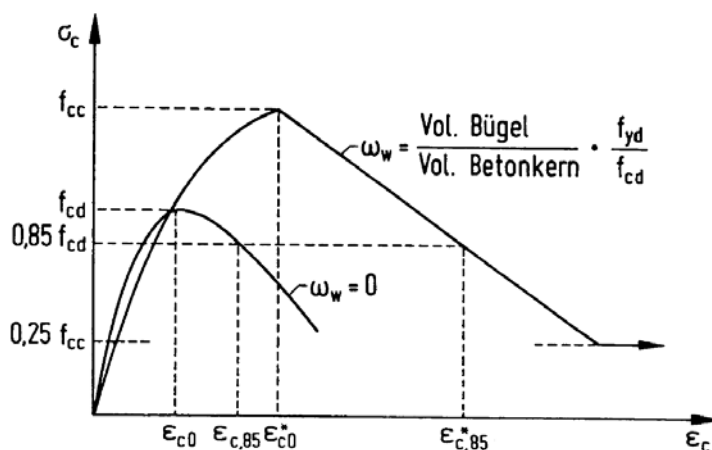


Bild 4: Spannungs-Dehnungsbeziehung einer Stahlbetonstütze mit und ohne Umschnürring (vgl. [7])

Je nach Größe der Erdbebeneinwirkung und –gefährdung werden an die erforderliche Duktilität und den notwendigen Nachweisen unterschiedliche Anforderungen gestellt.

4.2 Duktilitätsklassen

Um für Bauvorhaben in Gebieten mit unterschiedlicher Erdbebengefährdung eine vom Aufwand angemessene Erdbebensicherung zu ermöglichen sind in DIN 4149 ähnlich wie im Eurocode 8 unterschiedliche Duktilitätsklassen eingeführt. Bei Betonbauten werden jedoch in Abweichung zum EC 8 nur zwei Duktilitätsklassen mit entsprechend abgestuften Verhalten-

beiwerten und konstruktiven Zusatzmaßnahmen vorgesehen. Unter Berücksichtigung, dass in Deutschland starke Erdbeben nur sehr selten vorkommen, kann hier auf Regelungen für die höchste Duktilitätsklasse DCH nach EC 8 verzichtet werden.

Die **Duktilitätsklasse 1** entspricht Tragwerken mit natürlicher Duktilität, welche im Allgemeinen vor allem durch Begrenzung von bezogener Längskraft und Bewehrungsgrad der Stahlbetonbauteile gesichert wird. In den Erdbebenzonen 1 und 2 können diese Maßnahmen unter gewissen Voraussetzungen auch entfallen.

Die **Duktilitätsklasse 2** entspricht Tragwerken, die durch konstruktive Maßnahmen, wie z. B. Umschnürung des Betons in kritischen Bereichen, so ausgebildet werden, dass sowohl das Gesamttragwerk als auch seine kritischen Bereiche eine erhöhte lokale und globale Duktilität aufweisen.

Um die erforderlichen lokalen und globalen Duktilitäten zu sichern, sind in DIN 4149 für alle zum Tragwerk gehörenden Bauteile in jeder Duktilitätsklasse spezifische Vorschriften sowie unterschiedliche Werte für den Verhaltensbeiwert q angegeben.

Darüber hinaus ist jetzt bauartunabhängig in Kapitel 7 der DIN 4149 festgelegt, dass der Tragfähigkeitsnachweis für die seismische Lastkombination mit dem Bemessungsspektrum für lineare Berechnung unter Annahme im Wesentlichen linear-elastischen Verhaltens mit einem Verhaltensbeiwert $q = 1,0$ für die horizontale und vertikale Richtung geführt werden kann. Hierbei sind die Teilsicherheitsbeiwerte für Baustoffeigenschaften entsprechend der ständigen und vorübergehenden Bemessungssituation zu verwenden. Die wechselnden Beanspruchungsrichtungen sind selbstverständlich zu beachten. Hierdurch ist es möglich, auch solche Baustoffe und Bauarten anzuwenden, für die in der Norm keine expliziten Regelungen enthalten sind. Besondere Anforderungen an die Duktilität werden hier nicht gestellt.

4.3 Materialeigenschaften und Sicherheitsnachweise

Im Anwendungsbereich der Norm darf kein Beton verwendet werden, dessen Betonfestigkeitsklasse kleiner ist als C 16/20. Bei Bauwerken der Duktilitätsklasse 2 ist mindestens ein Beton C20/25 zu verwenden. Diese Abstufung wurde u.a. auch mit Rücksicht auf die Bewertung bestehender Bauwerke festgelegt. Für Neubauten empfiehlt sich die Verwendung eines C25/30, der in der Regel nicht teurer ist als ein C20/25.

Der Betonstahl für Bauteile, die zur Abtragung von Erdbebeneinwirkungen genutzt werden, muss die Anforderungen an hochduktilen Stähle nach DIN 1045-1, Tabelle 11 (im EC 2 mit Typ B bezeichnet) erfüllen, d.h. $\varepsilon_{uk} \geq 5\%$, $(f_t / f_y)_k \geq 1,08$ und $f_t / f_{yk} \leq 1,3$. Diese Forderung muss in den Bewehrungsplänen kenntlich gemacht werden. Um auf der Baustelle Verwechslungen zu vermeiden sollte in einem Bauvorhaben in Erdbebengebieten grundsätzlich der hochduktilen Bewehrungsstahl verwendet werden.

Bei den Nachweisen im Grenzzustand der Tragfähigkeit dürfen für die Bemessungssituation Erdbeben die Teilsicherheitsbeiwerte für Baustoffeigenschaften γ_M entsprechend den Festlegungen für die außergewöhnliche Bemessungssituation nach DIN 1045-1 angesetzt werden. Gleichzeitig ist jedoch ein möglicher Festigkeitsabfall der Baustoffe infolge Schädigung durch zyklische Verformungen sowie eine Minderung der Tragfähigkeit infolge Abplatzen der Betondeckung in den kritischen Bereichen von Stahlbetonbauteilen zu berücksichtigen. Diese Forderung kann näherungsweise als erfüllt angesehen werden, wenn stattdessen die in DIN 1045-1 für die ständige und vorübergehende Bemessungssituation angegebenen Teilsicherheitsbeiwerte γ_c und γ_s angewendet werden. Dabei wird vorausgesetzt, dass das Verhältnis zwischen der Restfestigkeit – unter Berücksichtigung von Festigkeitsabfall und Abplatzen der Betondeckung – und der ursprünglichen Festigkeit näherungsweise dem Verhältnis der γ_M -Werte für die außergewöhnliche Lastkombination und für die Grundkombination entspricht.

In DIN1045-1 enthält die Gl. (67) zur Bestimmung des Bemessungswertes der einaxialen Festigkeit des Betons $f_{cd} = \alpha \cdot f_{ck} / \gamma_c$ einen Beiwert α , der die Langzeitwirkung auf die Druckfestigkeit des Betons berücksichtigen soll. Dieser Wert beträgt üblicherweise 0,85. Es wird in Fachkreisen teilweise diskutiert, dass dieser Wert bei Erdbebennachweisen mit 1,0 anzunehmen sei, da die Erdbebeneinwirkung nur eine kurzzeitige Belastung darstelle. Es ist jedoch zu beachten, dass, wie bereits erwähnt, ein nicht genau quantifizierbarer Festigkeitsabfall infolge Schädigung durch die zyklischen Verformungen bis in den plastischen Bereich gegeben ist und daher der Wert α wie bei Langzeiteinwirkung mit 0,85 anzunehmen ist.

Zur Ermittlung der Schnittgrößen erlaubt die neue DIN 1045-1 neben der linear-elastischen Berechnung mit Umlagerung auch Verfahren nach der Plastizitätstheorie oder Nichtlineare Verfahren. Für die Erdbebenbemessungssituation sind diese Verfahren jedoch zunächst nicht zulässig, da hier die große Gefahr besteht, dass die vorhandene plastische Verformbarkeit bzw. Duktilität von Stahlbetonquerschnitten doppelt ausgenutzt wird. Kommen diese Verfahren dennoch zur Anwendung, ist nachzuweisen, dass ausreichend plastische Reserven vorhanden sind und die Bauteile die zum Abtrag der Erdbebeneinwirkung herangezogen werden, nicht von den Umlagerungen nach DIN 1045-1 betroffen sind.

4.4 Hinweise für Duktilitätsklasse 1

In der Duktilitätsklasse 1 erfolgt die Ermittlung der Beanspruchung unter Verwendung eines Verhaltensbeiwertes von

$q = 1.5$ für horizontale Einwirkung

$q = 1.0$ für vertikale Einwirkung

Dies erfolgt unabhängig vom Tragsystem oder der Regelmäßigkeit des Bauwerks. Die Bemessung und Konstruktion erfolgt nach DIN 1045-1 bei Ansatz der üblichen Material-Teilsicherheitsbeiwerte γ_M für die ständige und vorübergehende Bemessungssituation. Der Beton muss mindestens der Festigkeitsklasse C16/20 entsprechen, der Bewehrungsstahl "hochduktil" sein.

Zusätzlich sind weitere Vorschriften, die in erster Linie auf eine Verbesserung der Duktilität abzielen, einzuhalten:

- Für Stahlbetonwände, die zur Erdbebensicherung herangezogen werden, ist der aus der Berechnung erhaltene Wert der Querkraft mit einem Faktor $\varepsilon=1.5$ zu erhöhen und damit die Bemessung durchzuführen. Hierdurch soll sichergestellt werden, dass bei zyklischen Verformungen Biegeversagen vor Schubversagen (Festigkeitsabfall) eintritt.
- In symmetrisch bewehrten Druckgliedern (Stützen und Wände), die für die Abtragung der horizontalen Erdbebenlasten über Biegebeanspruchung herangezogen werden, darf der Bemessungswert der bezogenen Längskraft $v_d = N_{sd} / (A_c \cdot f_{cd})$, mit N_{sd} = Bemessungswert der aufzunehmenden Längskraft und A_c = Gesamtfläche des Betonquerschnitts, den Grenzwert $v_d = 0.25$ für Stützen und $v_d = 0.20$ für Wände nicht überschreiten.
- In Rahmenriegelanschlüssen mit Rechteckquerschnitt wird der höchste zulässige Bewehrungsgrad der Zugbewehrung auf $\rho_{max} = 0.03$ beschränkt. Der Bewehrungsquerschnitt auf der Druckseite muss mindestens der Hälfte der Zugbewehrung entsprechen.
- Bei der Berechnung der Verankerungslänge von Bewehrungsstäben in Stützen, die zur Biegetragfähigkeit in den kritischen Bereichen beitragen, ist das Verhältnis der er-

forderlichen zur vorhandenen Querschnittsfläche der Bewehrung immer mit 1,0 anzusetzen, d.h. eine Abminderung ist nicht zulässig.

In den Erdbebenzonen 1 und 2 können die oben genannten zusätzlichen Maßnahmen entfallen, wenn die in Druckgliedern (Stützen und Wände) vorgesehene Bewehrung einer Bemessung für die um 20 % erhöhte Erdbebenbeanspruchung entspricht. Praktisch bedeutet dies, das man entweder für die Bemessung die nach Gl. (2) ermittelte Erdbebenbeanspruchung A_{Ed} um 20% erhöht oder näherungsweise 20% mehr Bewehrung einlegt als rechnerisch erforderlich. Bei üblichen Bauwerken in den Erdbebenzonen 1 und 2 wird in den überwiegenden Fällen die erforderliche Bewehrung in Stahlbetonkonstruktionen ohnehin nicht durch den Lastfall Erdbeben bestimmt, so dass diese Forderung leicht erfüllt werden kann.

Für die Nachweisführung für Betonbauten der Duktilitätsklasse 1 sind die Regelungen in der neuen Norm nicht wesentlich umfangreicher als nach der alten Norm. Nach Einschätzung des Verfassers dürfte diese vergleichsweise einfache Vorgehensweise in der Praxis überwiegend angewendet werden und führt zu konstruktiv und wirtschaftlich sinnvollen Lösungen der Erdbebensicherungen.

4.5 Hinweise für Duktilitätsklasse 2

Soll ein Bauwerk entsprechend der Duktilitätsklasse 2 ausgelegt werden, sind umfangreiche Nachweise und Maßnahmen zur Sicherung der örtlichen Duktilität erforderlich. DIN 4149 lehnt sich hier weitgehend an die entsprechenden Regelungen des EC 8 für die Duktilitätsklasse DCM an. Je nach Tragwerkstyp kann die rechnerische Erdbebeneinwirkung mit Verhaltensbeiwerten von

$$\begin{aligned} q &= 1.5 \text{ bis } 3.0 && \text{für horizontale Einwirkung} \\ q &= 1.0 && \text{für vertikale Einwirkung} \end{aligned}$$

abgemindert werden. Dies erfolgt in Abhängigkeit vom Tragwerkstyp, der Regelmäßigkeit des Bauwerks sowie der vorherrschenden Versagensart bei Wandsystemen. Allerdings muss man sich diese Abminderung, die gegenüber der Duktilitätsklasse 1 doppelt so groß sein kann, mit einem erhöhten Nachweis- und Konstruktionsaufwand erkaufen. In der Bundesrepublik Deutschland als Schwachbebengebiet wird diese Duktilitätsklasse nach Einschätzung des Verfassers nur bei ausgewählten Bauwerken Anwendung finden.

Die Regelungen können im Rahmen dieses Beitrages nicht im Detail wiedergegeben werden (allein 22 Seiten Normtext). Hier wird auf die Ausführungen in der Norm verwiesen. Zum Überblick sollen nur einige Gesichtspunkte angesprochen werden.

Zur Erzielung der erforderlichen globalen Duktilität des Tragwerks sollen die potenziellen Bereiche für die Bildung plastischer Gelenke eine hohe plastische Rotationsfähigkeit besitzen. Dabei soll duktiler Versagen (z. B. Biegeversagen) mit genügend großer Zuverlässigkeit vor sprödem Versagen (z. B. Schubversagen) eintreten. Dies ist in der Regel der Fall, wenn für die primär zur Abtragung der horizontalen Erdbebeneinwirkungen herangezogenen Bauteile in allen kritischen Bereichen, einschließlich an den Stützenenden, eine ausreichende Krümmungsduktilität vorhanden ist und örtliches Ausknicken gedrückter Bewehrungsstäbe in Bereichen möglicher plastischer Gelenke verhindert wird. In DIN 4149 werden entsprechende Anwendungsregeln für Balken, Stützen und Wände angegeben. Bei Bauteilen mit möglichem Schubversagen wie gedrungene Wände oder kurze Koppelbauteile sind zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen vorzusehen.

In der Duktilitätsklasse 2 werden Betonbauten entsprechend ihrem Verhalten unter horizontalen Erdbebeneinwirkungen einem der folgenden Tragwerkstypen zugeordnet:

- Rahmensystem
- Wandsystem
- Mischsystem
- Kernsystem
- Umgekehrtes-Pendel-System

Rahmensysteme, Mischsysteme und Wandsysteme müssen eine Mindest-Torsionssteifigkeit aufweisen, ansonsten sind sie den Kernsystemen zuzuordnen.

In Abhängigkeit dieser Tragwerkstypen ergibt sich der Grundwert des Verhaltensbeiwertes entsprechend

Tabelle 2.

Tabelle 2: Grundwerte des Verhaltensbeiwertes q_0 in Abhängigkeit vom Tragwerkstyp

Tragwerkstyp	q_0
Rahmensystem, Wandsystem, Mischsystem	3,0
Kernsystem	2,0
Umgekehrtes-Pendel-System	1,7

Der für die Bemessung zu verwendende Verhaltensbeiwert q ist durch zwei weitere Faktoren abzumindern, deren Produkt zwischen 1.0 und 0.4 liegt. Hierdurch soll zum einen die Regelmäßigkeit des Bauwerks und zum anderen die vorherrschende Versagensart bei Wandsystemen berücksichtigt werden.

Stellt man bei einer ersten Betrachtung eines Bauwerks fest, dass in der Duktilitätsklasse 2 der nach Abminderung zu verwendende Verhaltensbeiwert q in der Nähe des Wertes $q = 1.5$ liegt, kann man im Hinblick auf den erforderlichen Nachweisaufwand auch die Duktilitätsklasse 1 zugrundelegen, sofern die dort zusätzlich zur DIN 1045-1 genannten Bedingungen eingehalten werden können. In der Praxis wird in erster Linie die Begrenzung der bezogenen Normalkraft bei hochausgenutzten schlanken Stützen ein Entscheidungskriterium darstellen.

Neben Forderungen zur Ausbildung von Verankerungen und Stößen der Bewehrung werden für die Duktilitätsklasse spezielle Anforderungen an Balken, Stützen und Wände einschl. Mischsystemen und Koppelbauteilen aufgeführt, die alle in erster Linie auf die Steigerung der Duktilität abzielen. Besonderer Bedeutung kommt die Umschnürung und der Bewehrungsverankerung bei. So sind Umschnürungsbügel als Querbewehrung in Balken, Stützen und Wänden als geschlossene Bügel mit $10 d_{bw}$ langen um 135° ins Innere abgebogene Haken vorzusehen.

Beispielhaft werden in Bild 5 bis Bild 8 nur einige typische Konstruktionsdetails kritischer Bereiche wiedergegeben.

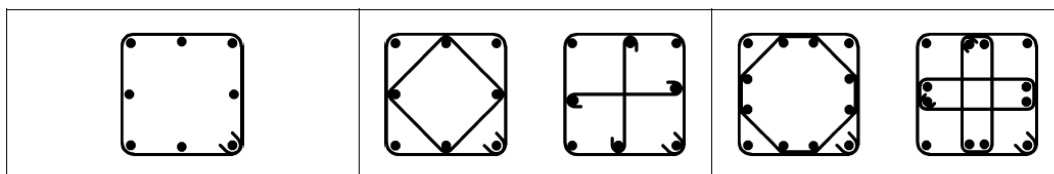
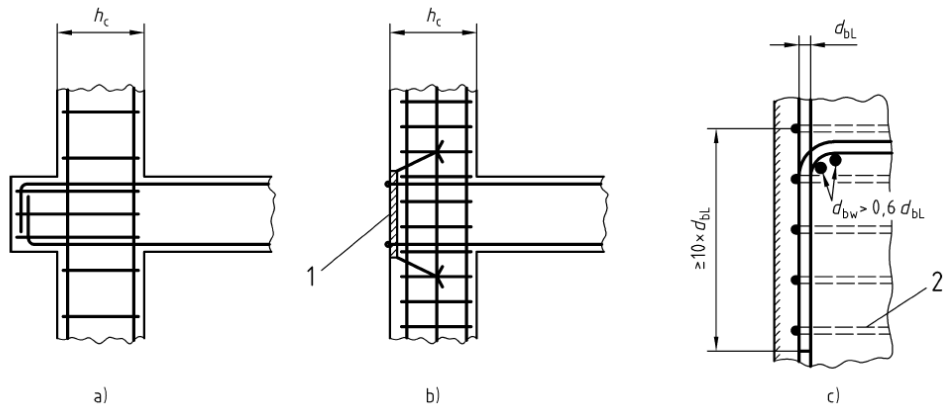


Bild 5: Ausbildung von Umschnürungsbügel



- Legende**
 1 Ankerplatte
 2 die Stützenbewehrung umschließende Umschnürungsbügel

Bild 6: Zusätzliche Verankerungsmaßnahmen in Balken-Stützen-Außenknoten

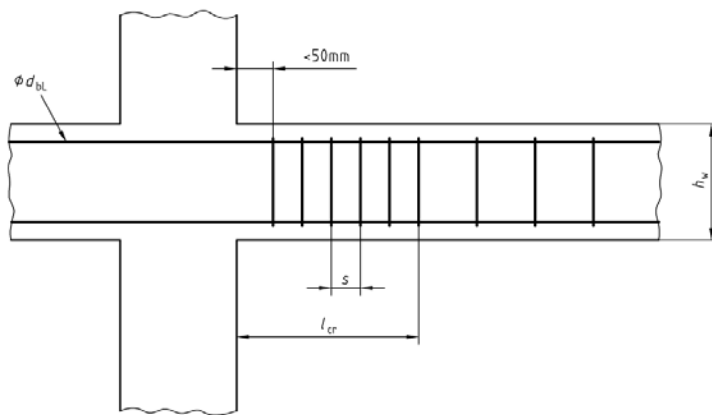


Bild 7: Erhöhte Querbewehrung in kritischen Bereichen von Balken

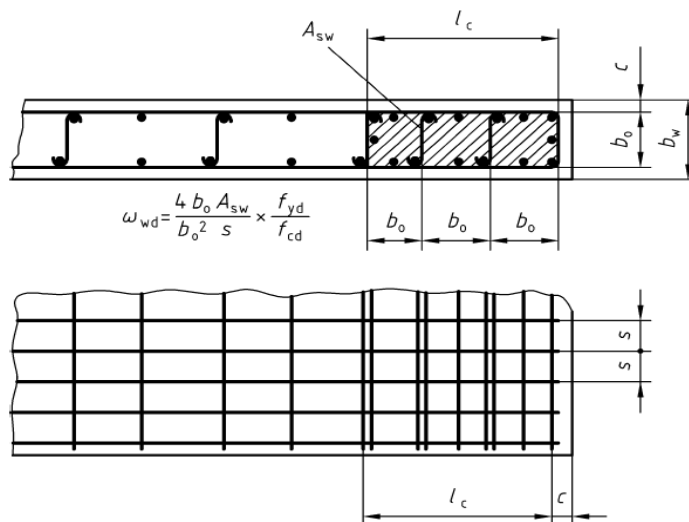


Bild 8: Ausbildung eines umschnürten Randelementes am freien Ende einer Wand

5 Zusammenfassung

Die Grundaufgabe der Erdbebensicherung besteht darin, durch Entwurf, Konstruktion und Bemessung die einem Bauwerk durch Bodenbewegungen zugeführte Schwingungsenergie so zu lenken, zu verteilen und in andere Energieformen umzuwandeln, dass große Zerstörungen vermieden werden. Beim Entwurf von Gebäuden in Erdbebengebieten ist daher die frühzeitige Berücksichtigung bestimmter Anforderungen zur Erzielung eines erdbebensicheren Tragwerks von großer Bedeutung.

Bei den Standsicherheitsnachweisen werden die nichtlinearen energiedissipierenden Effekte eines Tragwerks unter Erdbebeneinwirkung durch Einführung eines globalen Verhaltensbeiwertes berücksichtigt, mit dem die Einwirkung rechnerisch reduziert wird und die in der Praxis geläufigen linear-elastischen Berechnungsverfahren verwendet werden können. Je nach Größe der rechnerischen Abminderung werden Anforderungen an die Duktilität der Konstruktion bzw. einzelnen Bauteile gestellt. Hierzu werden in der neuen Norm sog. Duktilitätsklassen eingeführt.

Für Betonbauten sind in DIN 4149 nur zwei Duktilitätsklassen vorgesehen. Im Vergleich zum Eurocode 8 wird auf Regelungen für die höchste Klasse DCH verzichtet, da in Deutschland starke Erdbeben nur sehr selten vorkommen. In der Duktilitätsklasse 1 beträgt der Verhaltensbeiwert $q = 1,5$, die Bemessung und Konstruktion erfolgt weitgehend nach der baustoffspezifischen Norm DIN 1045-1. In der Duktilitätsklasse 2 beträgt der Verhaltensbeiwert zwischen $q = 1,5$ und $q = 3,0$ je nach Tragwerkstyp. Zusätzlich sind jedoch umfangreiche Maßnahmen und Nachweise zur Sicherung der Duktilität erforderlich. In der Praxis wird sicherlich in den überwiegenden Anwendungsfällen die Einordnung der nachzuweisenden Bauwerke in die Duktilitätsklasse 1 vorgenommen.

Es ist abschließend festzuhalten, dass die neue Norm DIN 4149 gegenüber der Vorgängernorm sicherlich das modernere und bessere Konzept darstellt, da die bei der Ermittlung der Erdbebeneinwirkung zu berücksichtigenden Aspekte wesentlich differenzierter betrachtet werden. Das Vorgehen ist aus ingenieurtechnischer Sicht plausibel und sinnvoll. Es wird nicht mehr, wie bei der alten Norm, alles über den "großen Kamm" geschoren. Der Preis hierfür ist jedoch, dass der Nachweis der Erdbebensicherheit, wo ein solcher gefordert wird, zukünftig oft mit einem höheren Nachweisaufwand verbunden sein wird.

Literatur

- [1] DIN 4149:1981-04 Bauten in deutschen Erdbebengebieten – Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten.
- [2] DIN 4149:2005-04 Bauten in deutschen Erdbebengebieten – Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten.
- [3] Eurocode 8 – Bauten in Erdbebengebieten. Europäische Vornorm, ENV 1998-1-1, CEN, Europäisches Komitee für Normung, Brüssel, 2004.
- [4] DIN 1055 Lastannahmen für Bauten.
- [5] DIN 1045-1:2001-07 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton.
- [6] Meskouris, K., Hinzen, K.-G.: „Bauwerke und Erdbeben. Grundlagen – Anwendung – Beispiele“. Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden: 2003.
- [7] Müller, F.P., Keintzel, E.: „Erdbebensicherung von Hochbauten“. Berlin: Ernst, Verlag für Architektur und techn. Wiss., 1984.
- [8] Eibl, J., Henseleit, O., Schlüter, F.-H.: „Baudynamik“. Betonkalender 1988. Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 1988.
- [9] "Erdbebenauslegung von Massivbauten unter Berücksichtigung des Eurocode 8". Seminar Universität Karlsruhe 29. u .30. März 1993. Schriftenreihe des Instituts für Massivbau und Baustofftechnologie. Karlsruhe 1993
- [10] Paulay, T., Bachmann, H., Moser, K.: „Erdbebenbemessung von Stahlbetonhochbauten“. Birkhäuser Verlag, Basel, Boston, Berlin: 1990.
- [11] Bachmann, Hugo: „Erdbebensicherung von Bauwerken“. 2., überarbeitete Auflage. Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser, 2002.
- [12] „Erdbebegerechter Entwurf von Hochbauten - Grundsätze für Ingenieure, Architekten und Behörden", von Hugo Bachmann; Richtlinie des BWG. Bundesamt für Wasser und Geologie, Biel (CH), 2002.
- [13] Bachmann, H.: „Neue Tendenzen im Erdbebeningenieurwesen“. Beton- und Stahlbetonbau 99, 2004, Heft 5, pp. 356-371.