

# Die Erdbebenbestimmungen der Norm SIA 263

**Report****Author(s):**

Lestuzzi, Pierino; Wenk, Thomas 

**Publication date:**

2003

**Permanent link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-006578740>

**Rights / license:**

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

## Die Erdbebenbestimmungen der Norm SIA 263

Pierino Lestuzzi, Lausanne  
Thomas Wenk, Zürich

### 1 EINLEITUNG

In den europäischen Tragwerksnormen ist dem Erdbeben eine besondere Norm, der Eurocode 8 [5.1], gewidmet, die auch umfangreiche konstruktive Bestimmungen für den Stahlbau enthält. Anstelle einer eigenständigen Norm SIA 268 Erdbeben wurden die Bestimmungen aus dem Eurocode 8 für die in der Schweiz vorherrschende niedrige bis mittlere Seismizität vereinfacht und in die Tragwerksnormen SIA 260 bis 267 integriert. Mit dieser Integrationslösung konnte die übergeordnete Zielsetzung des Projektes Swisscodes, praxistaugliche und anwenderfreundliche Tragwerksnormen bereitzustellen, erfüllt werden. Die neue Stahlbaunorm SIA 263 weist ein eigenes Kapitel über das Erdbeben auf (Kap. 4.9), das zusammen mit den entsprechenden Bestimmungen in SIA 260 und 261 für die Bemessungssituation Erdbeben anzuwenden ist [5.2]. Das Kapitel 4.9 enthält primär konstruktive Bestimmungen, um ein ausreichend duktilen Tragwerksverhalten unter Erdbebeneinwirkung sicherzustellen. Früher herrschte die Meinung vor, dass Stahlbauten a priori duktil sind und sich duktilitätsfördernde Massnahmen für das Erdbebenverhalten erübrigen. Die negativen Erfahrungen bei starken Erdbeben in den letzten Jahren insbesondere in Northridge, Kalifornien 1994 und in Kobe, Japan 1995 führten zu neuen Erkenntnissen der erdbebengerechten Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, die in der neuen Stahlbaunorm SIA 263 abgestimmt auf den Eurocode 8 umgesetzt werden [5.3].

### 2 DIE WICHTIGSTEN NEUERUNGEN

Die wichtigsten Neuerungen bei der Erdbebenbemessung gegenüber der bisherigen Norm SIA 161 (1990) lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- besondere Bestimmungen für die Bemessungssituation Erdbeben von Stahlbauten
- Zwei unterschiedliche Bemessungskonzepte: duktilen und nicht-duktilen Tragwerksverhalten
- Verhaltensbeiwerte  $q$  für duktilen Tragwerksverhalten in Funktion der Tragwerksart und der Querschnittsklasse
- spezielle konstruktive Regeln für die bauliche Durchbildung von duktilen Stahltragwerken.

Die neuen Bestimmungen für die Bemessungssituation Erdbeben befinden sich in der Ziffer 4.9 *Erdbeben* des Kapitels 4 *Tragwerksanalyse und Bemessung* der Norm SIA 263.

Neu kann der Ingenieur bei der Erdbebenbemessung zwischen dem Konzept des duktilen und des nicht-duktilen Tragwerksverhaltens auswählen. Ein duktilen Tragwerk zeichnet sich durch ein grosses Energiedissipationsvermögen dank plastischer Verformungen aus. Es verhält sich bei Erdbebeneinwirkung wesentlich günstiger als ein nicht-duktilen Tragwerk. Für ein gegebenes Bemessungserdbeben darf das duktile Tragwerk auf einen kleineren Tragwiderstand ausgelegt werden als das nicht duktile Tragwerk. Im Allgemeinen ist es deshalb von Vorteil, ein duktilen Tragwerksverhalten zu wählen. Andererseits müssen bei duktilen Tragwerken die neuen konzeptionellen und konstruktiven Bestimmungen beachtet

werden, was zumindest in der Anfangsphase mit einem kleinen Mehraufwand verbunden ist. Erfolgt die Erdbebenbemessung wie früher konventionell ohne Berücksichtigung der neuen zusätzlichen Bestimmungen, dann ist nicht-duktiler Tragwerksverhaltens anzunehmen und es resultiert ein vergleichsweise hoher Tragwiderstand. Bild 5.1 zeigt schematisch die Konsequenzen auf die Erdbebenbemessung aus der Wahl des Tragwerksverhaltens.

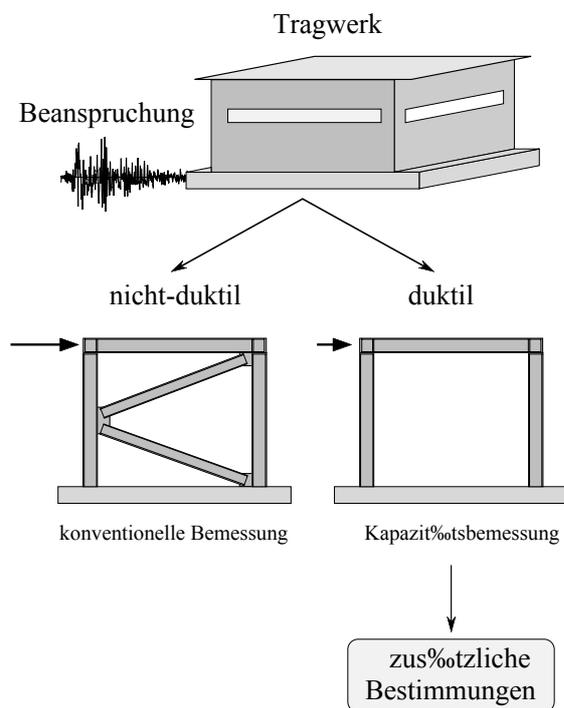


Bild 5.1: Für das Erdbeben stehen neu zwei Bemessungskonzepte zur Verfügung: Das duktile und das nicht-duktiler Tragwerksverhalten.

Der Verhaltensbeiwert  $q$  berücksichtigt neben dem Energiedissipationsvermögen auch die Überfestigkeit des Tragwerks unter zyklisch-plastischen Verformungen. Der Verhaltensbeiwert wird bei duktilem Tragwerksverhalten in Funktion der Tragwerksart und der Querschnittsklasse festgelegt (siehe Tabelle 5.1). Bei nicht-duktiler Tragwerksverhalten ist der Verhaltensbeiwert in allen Fällen  $q = 1,5$ . Eine ausführliche Beschreibung des Verhaltensfaktors erfolgt in Kapitel 3.1.

Ferner ist zu beachten, dass die elastischen Erdbebenkräfte gegenüber früher je nach Baugrundklasse und Frequenzbereich stark zugenommen haben [5.2]. Dank den höheren Verhaltensbeiwerten für duktile Stahltragwerke kann diese Zunahme wieder kompensiert werden.

### 3 GRUNDLAGEN DER ERDBEBEN-BEMESSUNG

Im modernen Erdbebeningenieurwesen haben sich einige Fachbegriffe entwickelt, die hier vorerst unabhängig von der Bauweise vorgestellt und anschliessend für die Anwendung im Stahlbau erläutert werden. Unter Erdbebeneinwirkung erfährt das Tragwerk zyklische dynamische Verformungen, primär in horizontaler Richtung. Der dynamische Charakter der Erdbebeneinwirkung hat zur Folge, dass die Grösse der Beanspruchungen von der Steifigkeit des Tragwerks beeinflusst wird. Die Duktilität wirkt sich generell günstig aus und erlaubt es, für einen kleineren Tragwiderstand zu bemessen.

#### 3.1 Verhaltensbeiwert

Die Wirkung eines Erdbebens kann als dynamischer Energieeintrag in das Tragwerk betrachtet werden. Die eingetragene Energie muss anschliessend durch plastische Verformungen oder durch Dämpfung dissipiert werden. Bei der üblichen Bemessungsmethode, dem Ersatzkraftverfahren, wird die Erdbebeneinwirkung vereinfachend durch Ersatzkräfte dargestellt. Dabei wird das Energiedissipationsvermögen sowie die Überfestigkeit mit einem globalen Widerstandsreduktionsfaktor, dem sogenannten Verhaltensbeiwert  $q$ , berücksichtigt.

Ein Verhaltensbeiwert von  $q = 1,0$  entspricht rein elastischem Verhalten ohne Überschreitung des Bemessungswertes  $R_d$  des Tragwiderstandes. Dabei wird nur eine geringe Energiedissipation entsprechen einer viskosen Dämpfung von 5% in Rechnung gestellt. Ein Verhaltensbeiwert von  $q = 1,5$  entspricht elastischem

Verhalten bei voller Ausnützung der Überfestigkeit über  $R_d$  hinaus. Höhere  $q$ -Werte bis zu  $q = 5,0$  sind möglich, wenn das Tragwerk fähig ist, ohne nennenswerte Reduktion des Tragwiderstandes mit stabilen zyklisch-plastischen Verformungen Energie zu dissipieren (siehe Tabelle 5.1). Bei der Erdbebenbemessung wird der Verhaltensbeiwert über das Bemessungsspektrum berücksichtigt (Ziffer 16.2.4). Dabei wird das elastische Antwortspektrum durch den Verhaltensbeiwert dividiert, d.h. je grösser der Verhaltensbeiwert desto kleiner werden die anzusetzenden Erdbebenkräfte [5.2]. Bild 5.2 zeigt als Beispiel einen Vergleich der Antwortspektren für duktileres Verhalten mit  $q = 5,0$ , für nicht-duktileres Verhalten mit  $q = 1,5$  und für elastisches Verhalten mit  $q = 1,0$  (elastisches Antwortspektrum).

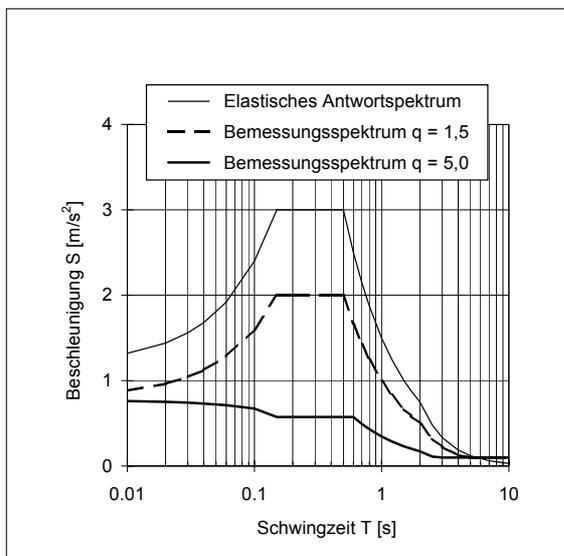


Bild 5.2 Vergleich der Bemessungsspektren für  $q = 1,5$  und  $q = 5,0$  mit dem elastischen Antwortspektrum für Bauwerksklasse I bei Baugrundklasse B in Erdbebenzone Z2

### 3.2 Steifigkeit

Die Steifigkeit des Tragwerkes für horizontale Einwirkung bestimmt massgeblich das dynamische Verhalten und damit die Grösse der Erdbebenbeanspruchung. Bei der Bemessung wird der Einfluss der Steifigkeit über die Eigenfrequenzen (primär über die Grund-

schwingzeit) erfasst. Bei Gebäuden darf die Grundschwingzeit mit den empirischen Formeln gemäss Ziffer 16.5.2.3 der Norm SIA 261 berechnet werden. Diese aus dem Eurocode 8 übernommenen Formeln überschätzen meistens die Steifigkeit und führen deshalb im Allgemeinen auf zu hohe Erdbebenkräfte. Wenn die Erdbebenkräfte für die Dimensionierung massgebend werden, empfiehlt es sich die Grundschwingzeit anhand eines Tragwerksmodells mit realistischen Steifigkeitsannahmen gemäss Ziffern 16.5.2.2 und 16.5.5.2 der Norm SIA 261 zu bestimmen, z.B. mit der Rayleigh-Methode [5.5].

Mit einer grösseren Steifigkeit des Tragwerkes können die Verformungen unter Erdbebeneinwirkung und damit die Schäden an nicht tragenden Bauteilen reduziert werden. Um ein günstiges Erdbebenverhalten zu erzielen, sollten Steifigkeitssprünge über die Gebäudehöhe vermieden werden. Idealerweise sollte die Steifigkeit gleichmässig von oben bis unten verlaufen. Auf jeden Fall sind horizontal weiche Geschosse insbesondere im Erdgeschoss zu vermeiden [5.4].

### 3.3 Tragwiderstand und Überfestigkeit

Sobald der Tragwiderstand unter Erdbebeneinwirkung erreicht wird, beginnen sich plastische Verformungen im Tragwerk auszubilden, bis es bei Erschöpfung der vorhandenen Duktilität zum Einsturz kommt. Der Tragwiderstand bestimmt folglich die Höhe der Schadengrenze im Tragwerk. Für ein günstiges Erdbebenverhalten sind grössere Sprünge im Verlauf des Tragwiderstands über die Gebäudehöhe analog zum Steifigkeitsverlauf zu vermeiden.

Mit Überfestigkeit wird der im Tragwerk effektiv vorhandene Widerstand bezeichnet. Gegenüber dem nach der Bemessungsgleichung theoretisch erforderlichen  $E_d$  (Bemessungswert der Auswirkung der Bemessungssituation Erdbeben) ergibt sich bei der praktischen Bemessung eines Stahlprofils ein höherer Widerstand. Als hauptsächliche Gründe für diese Überfestigkeit können vier Phänomene genannt werden [5.5]:

- Wahl eines Stahlprofils aus einer begrenzten Auswahl
- Beanspruchung bei grösseren plastischen Verformungen über die Streckgrenze des Stahls hinaus
- Widerstandsbeiwert  $\gamma_M$
- Umverteilung der Schnittkräfte bei statisch unbestimmten Systemen.

Bei der Überfestigkeit sind zwei unterschiedliche Einflüsse auf das Tragwerksverhalten zu unterscheiden: Einerseits wirkt sich die Zunahme des Tragwiderstandes generell günstig aus und wird über den Minimalwert des Verhaltensbeiwerts von  $q = 1,5$  berücksichtigt. Andererseits führt die Zunahme des Widerstandes in den plastischen Gelenken dank Überfestigkeit zu einer höheren Beanspruchung in den übrigen Bereichen, die in der Folge vorzeitig spröde versagen können. Deshalb werden nach der Kapazitätsbemessung die Bereiche ausserhalb der vorgesehenen plastischen Gelenke auf einen grösseren Tragwiderstand ausgelegt.

### 3.4 Globale und lokale Duktilität

Das wichtigste Mass für die inelastischen Phänomene beim Erdbebenverhalten ist die Duktilität. Die Grundlage für die Definition der Duktilität ist ein linear-elastisches, ideal-plastisches Kraft-Verformungsdiagramm gemäss Bild 5.3 [5.5]. Die Duktilität ist definiert als das Verhältnis der totalen Verformung  $u_{tot}$  zur elastischen Verformung bei Fliessbeginn  $u_y$ . Als Verformung kann ganz allgemein eine Verschiebung, Rotation, Krümmung oder Dehnung betrachtet werden. Ein wichtiger Unterschied besteht jedoch zwischen globaler und lokaler Duktilität. Als globale Duktilität wird die Verschiebeduktilität zuoberst im Tragwerk bezeichnet. Sie entspricht dem Verhältnis der horizontalen Verschiebungen auf Höhe des obersten Massenniveaus im Tragwerksmodell. Die Verschiebeduktilität dient der Bestimmung des Duktilitätsanteils im Verhaltensbeiwert  $q$ . Nach einer einfachen empirischen Regel (gleichen

Verschiebungen des elastischen und inelastischen Einmassenschwingers) ist dieser Anteil gerade gleich der Verschiebeduktilität.

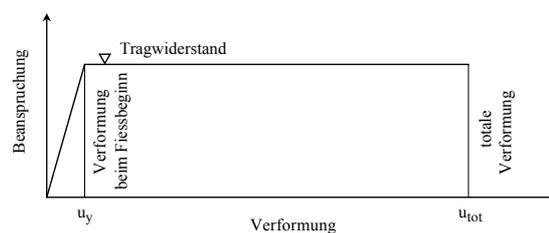


Bild 5.3: Grundlage für die Definition der Duktilität ist ein linear-elastisches, ideal-plastisches Kraft-Verformungsdiagramm.

### 3.5 Bemessung

Da bei der Erdbebenbemessung das zyklisch-plastische Verformungsvermögen massgeblich miteinbezogen wird, ist auch eine darauf abgestimmte Bemessungsmethode erforderlich. Die für die klassischen Einwirkungen wie z.B. Schwerelasten und Wind üblicherweise verwendeten konventionellen Methoden sind für das Erdbeben ungenügend. Die Methode der Kapazitätsbemessung hat sich in modernen Normen international mehr und mehr durchgesetzt. Die Prinzipien der Kapazitätsbemessung können wie folgt zusammengefasst werden [5.5]:

- Das Tragwerk wird so ausgelegt, dass sich unter Erdbebeneinwirkung ein geeigneter plastischer Mechanismus einstellt.
- Die plastischen Gelenke werden konstruktiv so gestaltet, dass sie genügend duktil sind.
- Die übrigen Bereiche werden mit einem zusätzlichen Tragwiderstand versehen, damit sie elastisch bleiben, wenn die plastischen Bereiche ihre Überfestigkeit (Kapazität) entwickeln.

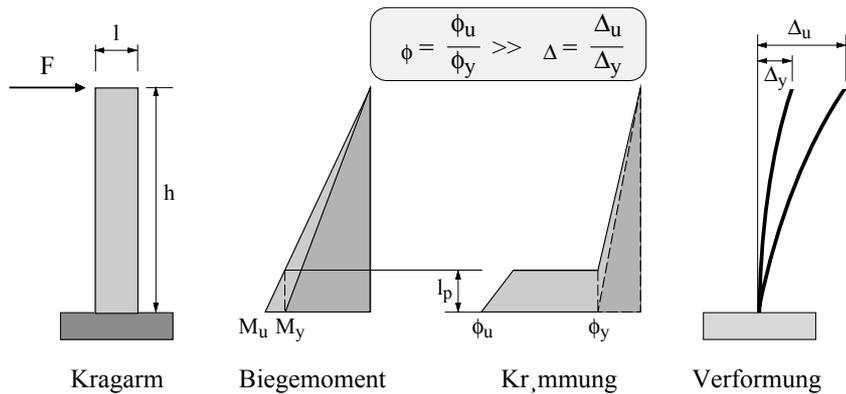


Bild 5.4 : Verhältnis zwischen globaler Duktilität ( $\Delta$ ) und lokaler Duktilität ( $\phi$ ) für einen Kragarm

Mit diesem Vorgehen wird eine Hierarchie der Tragwiderstände festgelegt, die verhindern soll, dass sich frühzeitige Plastifizierungen in den weniger duktilen, übrigen Bereichen bilden, bevor das wesentlich grössere Energiedissipationsvermögen der planmässigen plastischen Gelenke ausgeschöpft ist. Mehr oder weniger zufällige Plastifizierungen in den übrigen Bereichen können zu einem vorzeitigen spröden Versagen führen. Mit der Kapazitätsbemessung ist sichergestellt, dass sich das Tragwerk unter grossen zyklischen plastischen Verformungen so wie vorgesehen verhält, insbesondere dass sich der gewählte geeignete plastische Mechanismus auch tatsächlich einstellt.

### 3.6 Plastische Mechanismus

Der erste Schritt der Kapazitätsbemessung ist die Wahl eines geeigneten plastischen Mechanismus. Geeignet bedeutet in diesem Zusammenhang, dass für eine vorgegebene globale Verschiebeduktilität der lokale Duktilitätsbedarf der plastischen Gelenke eines Tragwerkes möglichst klein bleiben soll. Als weitere Bedingungen sind bei einem geeigneten Mechanismus die plastischen Gelenke in diejenigen Bauteile zu verlegen, die leicht duktil gestaltet werden können, z.B. in die Riegel anstelle der Stützen. Bild 5.4 zeigt einen geeigneten und ungeeigneten Mechanismus im Falle eines aussteifenden mehrgeschossigen Rahmens.

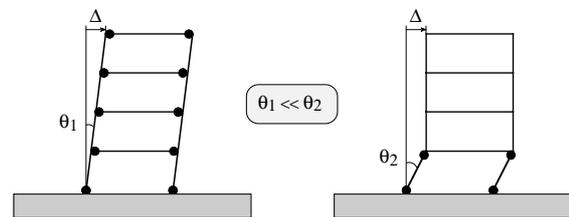


Bild 5.5 Geeigneter (links) und ungeeigneter plastischer Mechanismus (rechts) für einen mehrgeschossigen Rahmen

## 4 NICHT-DUKTILES TRAGWERKS-VERHALTEN

Das Konzept des nicht-duktilen Tragwerksverhaltens entspricht weitgehend der bisherigen Vorgehensweise nach den Normen SIA 160 und SIA 161. Die Erdbebenbemessung erfolgt konventionell wie für Schwerlasten oder Wind. Gegenüber früher werden jedoch im Allgemeinen die Ersatzkräfte wesentlich grösser. Deshalb empfiehlt sich das nicht-duktiler Tragwerksverhalten nur bei kleinen Erdbebenkräften, d.h. nur in den niedrigen Erdbebenzonen und bei günstigen Baugrundverhältnissen oder bei leichten Bauwerken wie z.B. Hallen.

### 4.1 Verhaltensbeiwert

Der Verhaltensbeiwert  $q$  für nicht-duktiler Tragwerksverhalten beträgt  $q = 1,5$  für alle Tragwerksarten und Querschnittsklassen. Er berücksichtigt im Wesentlichen nur die Überfestigkeit.

## 4.2 Anforderungen an die bauliche Durchbildung

Erfolgt die Erdbebenbemessung nach dem Konzept des nicht-duktilen Tragwerksverhaltens, so sind keine besonderen Bestimmungen zur baulichen Durchbildung einzuhalten. Da praktisch keine Duktilität für die Abminderung der elastischen Erdbebenkräfte in Rechnung gestellt werden darf ( $q = 1,5$ ), sind auch keine besonderen duktilitätsfördernde Massnahmen für das Erdbebenverhalten erforderlich..

## 5 DUKTILES TRAGWERKSVERHALTEN

Beim Konzept des duktilen Tragwerksverhaltens erfolgt die Erdbebenbemessung nach der Methode der Kapazitätsbemessung wie in Kapitel 3.5 kurz beschrieben. Die entsprechenden Regeln befinden sich im Abschnitt 4.9 Erdbeben der Norm SIA 263. Diese wurden aus dem Eurocode 8 übernommen und für niedrige bis mittlere Seismizität vereinfacht.

### 5.1 Verhaltensbeiwert

Für duktilen Tragwerksverhalten kann ein wesentlich grösserer Verhaltensbeiwert  $q$  zur Reduktion der elastischen Erdbebeneinwirkung in Rechnung gestellt werden. Je nach Tragwerksart und Querschnittsklasse für die Abtragung horizontaler Einwirkungen variiert  $q$  im Bereich von 2,0 bis 5,0 (Tabelle 11 der Norm SIA 263). Für Querschnittsklasse 4 werden in Tabelle 11 keine  $q$ -Werte angegeben, da Tragwerke mit Profilen der Querschnittsklasse 4 in jedem Fall nach dem Konzept des nicht-duktilen Tragwerksverhaltens mit  $q = 1,5$  bemessen werden müssen. Für vertikale Erdbebenanregung beträgt der Verhaltensbeiwert  $q = 1,5$ , d.h. es ist immer nicht-duktilen Tragwerksverhalten anzunehmen. Ein Nachweis für die Vertikalkomponente ist gemäss SIA 261 nur in besonderen Fällen erforderlich, z.B. bei horizontalen Kragarmen oder bei Trägern, die Stützen tragen.

Tragwerksart	Querschnittsklasse		
	1	2	3
Rahmen	$q = 5$	$q = 4$	$q = 2$
Diagonalverbände	$q = 4$	$q = 4$	$q = 2$
V-Verbände	$q = 2$	$q = 2$	$q = 2$

Tabelle 5.1 : Verhaltensbeiwerte  $q$  bei duktilem Tragwerksverhalten

### 5.2 Anforderungen an die bauliche Durchbildung

Der grössere Verhaltensbeiwert  $q$  bei duktilem Tragwerksverhalten bedingt, dass mit konzeptionellen und konstruktiven Massnahmen ein ausreichendes Energiedissipationsvermögen unter zyklisch-plastischer Beanspruchung sichergestellt wird. Dazu ist eine Reihe von Bedingungen einzuhalten.

Für alle Tragwerksarten gilt:

- Der Werkstoff muss die Duktilitätsanforderungen für die plastische Querschnittsbemessung erfüllen, d.h. die Bruchdehnung muss grösser als 15%, das Verhältnis von Bruchdehnung zur elastischen Dehnung grösser als 20 und das Verhältnis von Zugfestigkeit zur Streckgrenze grösser als 1,1 sein (Ziffern 3.2.2.3 und 4.9.1.4).
- Schrauben mit Zugbeanspruchung sind in der Festigkeitsklasse 8.8 oder 10.9 zu wählen und vorzuspannen (Ziffer 4.9.1.4). Die vorgeschriebene Vorspannung soll Schläge zwischen Schrauben und angeschlossenen Bauteilen verhindern, die zum vorzeitigen spröden Bruch führen können.
- Verbindungen sind auf einen um 20% erhöhten Wert der Tragfähigkeit der anzuschliessenden Teile zu bemessen. (Ziffer 4.9.1.5). Dabei handelt es sich um eine typische Regel der Kapazitätsbemessung, die sicherstellen soll, dass sich das plastische Gelenk im duktileren Bauteil vor der weniger duktilen Verbindung bildet (Bild 5.6). Bei Querschnittsstössen mit durchgeschweissten Nähten der Bewertungsgruppe B (Schweissnaht ist dem Grundwerkstoff gleichwertig, kerbfrei beschliffen auch für hohe Ermüdungsbeanspruchung geeignet) darf ohne besonderen Nachweis ange-

nommen werden, dass die Verbindung eine ausreichende Überfestigkeit aufweist.



Bild 5.6 : Riegelanschluss in einem duktilen Stahlrahmen eines Hochhaus in Taipeh. Dank der Flanschverbreiterung stellt sich das plastische Gelenk im wesentlich duktileren Riegelprofil vor der spröderen Schweissnaht ein.

## 6 DUKTILE RAHMEN

Damit ein aussteifendes Rahmensystem nach dem Konzept des duktilen Tragwerksverhaltens für horizontale Erdbebeneinwirkung bemessen werden darf, sind die in Ziffer 4.9.3 zusammengefassten Regeln der Kapazitätsbemessung zu beachten. Dabei ist als erster Schritt ein geeigneter plastischer Mechanismus zu wählen. Für ein Rahmensystem bedeutet dies, dass sich die plastischen Gelenke in den Riegeln und nicht in den Stützen ausbilden. Da in Riegelgelenken die Normalkraft meist klein ist, kann dort eine wesentlich grössere Duktilität unter zyklischer Biegebeanspruchung erzielt werden als in Stützengelenken mit vergleichsweise hoher Normalkraft. Als Ausnahme zu dieser Regel sind in mehrgeschossigen Rahmen plastische Gelenke an den Stützenfü-

sen und im obersten Geschoss zulässig (Ziffer 4.9.2.2).

Als weitere Bedingung ist der plastische Mechanismus so zu wählen, dass die Energiedissipation kontinuierlich über die ganze Höhe erfolgt (links in Bild 5.4) und somit der lokale Duktilitätsbedarf in den plastischen Gelenken minimal bleibt. Zu vermeiden ist ein Stockwerkmechanismus (Soft-Storey) wie rechts in Bild 5.4 gezeichnet. Der Stockwerkmechanismus führt zu einem viel grösseren lokalen Duktilitätsbedarf für eine vorgegebene globale Verschiebung.

Um ein stabiles, möglichst grosses Verformungsvermögen der plastischen Gelenke unter Biegebeanspruchung sicherzustellen, sind Druck- und Querkräfte zu begrenzen (Ziffer 4.9.2.3). Wenn die Grenzwerte in Ziffer 4.9.2.3 nicht eingehalten werden können, darf nur ein Verhaltensfaktor  $q = 1,5$  für nicht-duktilen Tragwerksverhalten berücksichtigt werden.

Nach der Methode der Kapazitätsbemessung sind die elastisch bleibenden Bereiche des gewählten globalen Mechanismus vor Plastifizierungen zu schützen, wenn die plastischen Gelenke Ihre Überfestigkeit (Kapazität) entwickeln. In diesem Sinne sind die Bestimmungen der Ziffern 4.9.2.4 und 4.9.2.5 zu verstehen. Die Verankerung der Stützen ist für eine um 20% erhöhte Biegebeanspruchung infolge Erdbeben zu bemessen, damit sich das plastische Gelenk am Stützenfuss mit Überfestigkeit ausbilden kann, ohne dass die Verankerung vorzeitig spröde bricht. Ebenfalls ist die Stützenquerkraft zu begrenzen.

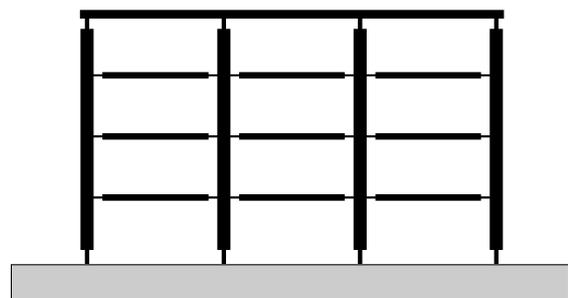


Bild 5.7: In mehrgeschossigen Rahmen sind die plastischen Gelenke primär in die Riegel zu legen.

## 7 AUSSTEIFENDE VERBÄNDE

Auch aussteifende Verbände können duktil gestaltet werden, wenn ein paar grundlegende Prinzipien der Kapazitätsbemessung beachtet werden. Im Allgemeinen lohnt sich dies nur bei Diagonalverbänden mit relativ hohen Verhaltensbeiwerten bis zu  $q = 4,0$ . Für V-Verbände ist auch bei duktilem Tragwerksverhalten nur ein Verhaltensbeiwert von  $q = 2,0$  zugelassen, d.h. nur geringfügig mehr als für nicht-duktilen Verhalten mit  $q = 1,5$ .

Bezüglich Erdbebenbemessung werden die Verbände in drei Kategorien (Diagonal-, V- und K-Verbände) eingeteilt, die im Folgenden einzeln beschrieben werden.

### 7.1 Diagonalverbände

Bei der Erdbebenbemessung von aussteifenden Diagonalverbänden (Bild 5.8) werden die Horizontalkräfte nur über die Zug-Diagonalen abgetragen und die Druck-Diagonalen vernachlässigt. Die plastischen Bereiche bilden sich in den Diagonalen primär auf Zug.

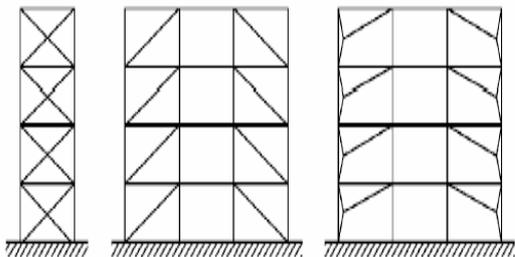


Bild 5.8: Aussteifende Diagonalverbände [5.1].

### 7.2 V-Verbände

Bei V-Verbänden (Bild 5.9) liegt der Schnittpunkt der Diagonalen auf einem durchlaufenden horizontalen Stab (Riegel). Die Horizontalkräfte werden über die Zug- und die Druck-Diagonalen abgetragen und die plastischen Bereiche bilden sich in diesen auf Zug und Druck.

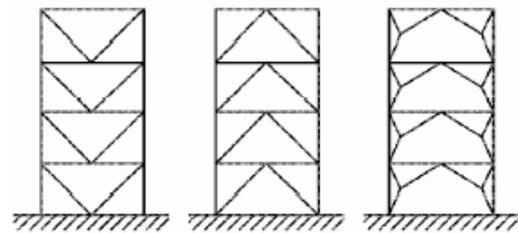


Bild 5.9: Aussteifende V-Verbände [6.1].

### 7.3 K-Verbände

Bei K-Verbänden (Bild 5.10) liegt ein Schnittpunkt der Diagonalen auf einem durchlaufenden vertikalen Stab (Stütze). Nach dem Knicken der Druckdiagonale unter den horizontalen Erdbebenkräften ist mit einem weiteren Ansteigen der Kraft in der Zugdiagonalen zu rechnen. Damit ergibt sich eine ungünstige zusätzliche Querkraftbeanspruchung in der Stütze (Gleichgewicht im Knoten ohne Riegel), die zu ungünstigen Plastifizierungen in der Stütze führen kann. K-Verbände sind deshalb in jedem Fall nach dem nicht-duktilen Tragwerkskonzept zu bemessen (Ziffer 4.9.1.3).

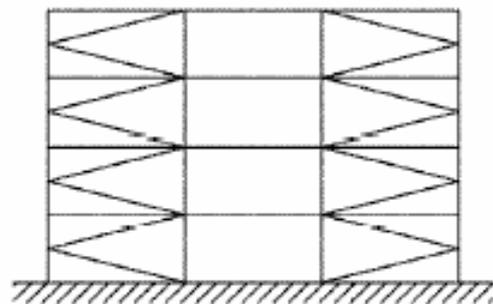


Bild 5.10: Aussteifende K-Verbände [6.1].

### 7.4 Anforderungen an die bauliche Durchbildung

Die besonderen Bedingungen zur baulichen Durchbildung von duktilen Verbänden sind in Ziffer 4.9.3 aufgeführt. Der globale Mechanismus besteht aus plastischen Normalkraft-Gelenken in möglichst allen Diagonalen des

Verbandes. Die Anforderungen der Ziffer 4.9.3.3 dienen zur Vermeidung von ungünstigen Stockwerkmechanismen (Soft-Storey). Ähnliche Kraft-Verformungs-Charakteristiken in allen Stockwerken sind eine Voraussetzung dafür, dass sich Plastifizierungen in den Diagonalen über die ganze Bauwerkshöhe einstellen und nicht nur lokal in einem oder wenigen Stockwerken. Rein elastisches Knicken der Diagonalen wirkt sich ungünstig auf die Form der Hystereseschlaufen (Energiedissipation) unter zyklischer Beanspruchung aus. Deshalb wird die bezogene Knickschlankheit der Diagonalen auf  $\lambda_k \leq 2,0$  begrenzt werden. Die elastisch bleibenden Bereiche (Riegel und Stützen der Verbände) sind wiederum auf die Schnittkräfte auszulegen, die sich einstellen, wenn die plastischen Gelenke (Diagonalen) ihre Überfestigkeit entwickeln. Dazu genügt eine Erhöhung der Bemessungs-Druckkräfte in Riegeln und Stützen infolge Erdbeben um 20% (Ziffer 4.9.3.4) sowie eine Bemessung der Verbindungen der Diagonalen auf einen um 20% erhöhten Wert ihrer Tragfähigkeit (Ziffer 4.9.1.5).

### 7.5 Exzentrische Verbände

Noch höhere Verhaltensbeiwerte können mit exzentrischen Verbänden erzielt werden. Dabei handelt es sich nicht einfach um "falsch" angeschlossene Diagonalstreben, sondern um ein besonders für sehr hohe Erdbebeneinwirkung entwickeltes System von plastischen Biegeschubgelenken im Bereich der Riegelexzentrizität verbunden durch elastisch bleibende Verbände (Bild 5.11). Die entsprechenden Bemessungsregeln befinden sich im Eurocode 8, Teil 1 [5.1]. Für die in der Schweiz anzusetzenden Erdbebenkräfte genügen meist Verbände mit Verhaltensbeiwerten bis zu  $q = 4$ , deshalb wurden Spezialsysteme mit höheren Verhaltensbeiwerten wie exzentrische Verbände nicht in die Norm SIA 263 aufgenommen.



Bild 5.11: Hochhaus mit einem exzentrischen Fachwerk zur Abtragung der horizontalen Erdbebenkräfte

## 8 LITERATUR

- [5.1] Eurocode 8 (2003). *Design of Structures for Earthquake Resistance, Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings*. prEN 1998-1. Draft 6, January 2003. Document CEN/TC250/SC8/N335. Comité Européen de Normalisation (CEN), Bruxelles; 197 pp.
- [5.2] Wenk T., Lestuzzi P. (2003). *Erdbeben*. Dokumentation D 0181. Grundlagen der Projektierung von Tragwerken, Einwirkungen auf Tragwerke, Einführung in die Normen SIA 260 und 261. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich 2003; 109 pp.
- [5.3] Bruneau M., Chia-Ming U., Whittaker A. (1998). *Ductile Design of Steel Structures*. ISBN 0-07-008580-3. McGraw-Hill; 485 pp.
- [5.4] Bachmann, H. (2002). *Erdbebemgerechter Entwurf von Hochbauten – Grundsätze für Ingenieure, Architekten, Bauherren und Behörden*. Richtlinie des BWG. Bern, 81 pp.  
<http://www.bwg.admin.ch/themen/natur/d/pdf/erenho.pdf>
- [5.5] Bachmann, H. (2002). *Erdbebensicherung von Bauwerken*. ISBN 3-7643-6941-8. Birkhäuser-Verlag; 292 pp.