

Betonbau

Einführung in die Norm SIA 262

Erdbebenbemessung

Dr. Marc Badoux, Transports Publics de la Région Lausannoise,
Lausanne

Dr Pierino Lestuzzi, Eidgenössische Technische Hochschule,
Lausanne

Dr Rudolf Vogt, ACS Partner AG, Zürich

Auszug der Dokumentation D 0182, Schweizerischer Ingenieur- und
Architektenverein, Zürich, 2003

7 Erdbebenbemessung

Marc Badoux, Lausanne, Rudolf Vogt, Zürich und Pierino Lestuzzi, Lausanne

7.1 EINLEITUNG

Dieser Aufsatz gibt einen Überblick über die Bemessungsregeln der neuen Norm *SIA 262* für die Bemessungssituation Erdbeben. Diese Vorschriften basieren auf den Grundsätzen der Kapazitätsbemessung und wurden in etwas vereinfachter Form vom *Eurocode 8* hergeleitet (EC 8) [7.1]. Sie sind in erster Linie für den Nachweis üblicher Bauwerke wie Hochbauten und einfache Brücken ausgelegt. Für komplexere Strukturen wie beispielsweise Gebäude mit ausgeprägten Unregelmässigkeiten, aussergewöhnliche Brücken oder Silos kann der Eurocode 8 beigezogen werden.

Das Erdbeben ist eine aussergewöhnliche Einwirkung, die in der Norm *SIA 261* definiert wird. Es ist zu beachten, dass für ein gutes Erdbebenverhalten nicht nur die Bemessung, sondern auch ein erdbebengerechtes Tragwerkskonzept von Bedeutung ist [7.2]. So sind zum Beispiel Unstetigkeiten in der Steifigkeit und im Widerstand zu vermeiden. Idealerweise verlaufen sowohl die Steifigkeit wie der Tragwiderstand stetig über die Bauwerkshöhe. In jedem Falle sind weiche Stockwerke in einem ansonsten steiferen Gebäude zu vermeiden (soft-story).

7.2 DIE WICHTIGSTEN NEUERUNGEN

Die Norm *SIA 162/1989* enthielt keine spezifischen Vorschriften für die Erdbebenbemessung. Der Verformungsbeiwert K für Rahmen und Tragwände aus Stahlbeton wurde in der Norm *SIA 160/1989* vorgegeben. Gegenüber der Norm *SIA 162/1989* sind dies die wichtigsten Änderungen:

- Spezifische Regeln für die Bemessung von Betonbauwerken hinsichtlich der Bemessungssituation Erdbeben
- Unterscheidung zwischen duktilem und nicht-duktilen Verhalten
- Unterschiedliche Verhaltensbeiwerte q in Abhängigkeit der Duktilitätsklasse des Bewehrungsstahls
- Besondere Regeln für die konstruktive Durchbildung von Rahmen und Tragwänden

In der Norm *SIA 262* sind die erdbebenspezifischen Vorschriften betreffend der Bemessung im Ziffer 4.3.9 des Kapitels 4 "Tragwerksanalyse und Bemessung" enthalten. Abschnitt 5.7 im Kapitel 5 "konstruktive Durchbildung" enthält Einzelheiten zur erdbebengerechten Konstruktion der massgebenden Bauteile.

Für die Bemessung wählt der Ingenieur zwischen einem duktilen und einem nicht-duktilen Verhalten des Tragwerks. Während einem Erdbeben ist ein duktilen Verhalten günstig, denn es ermöglicht die Absorption der ins Bauwerk eingeleiteten Energie durch plastische Verformungen. Bei gleicher seismischer Einwirkung kann ein duktilen Tragwerk auf einen geringeren Widerstand bemessen werden als ein nicht-duktilen. Aus diesem Grund kann es vorteilhaft sein, ein duktilen Verhalten zu wählen. In diesem Fall müssen jedoch zusätzliche Bestimmungen eingehalten werden, um eine ausreichende Verformbarkeit der Bauteile sicherzustellen. Im Gegensatz dazu müssen beim nicht-duktilen Verhalten keine erdbebenspezifischen Konstruktionsvorschriften beachtet werden, d.h. dass das Tragwerk nach den "normalen" Forderungen der Norm *SIA 262* konstruiert wird. Die Konsequenzen der Wahl des Tragwerkverhaltens sind im Bild 7.1 schematisch dargestellt.

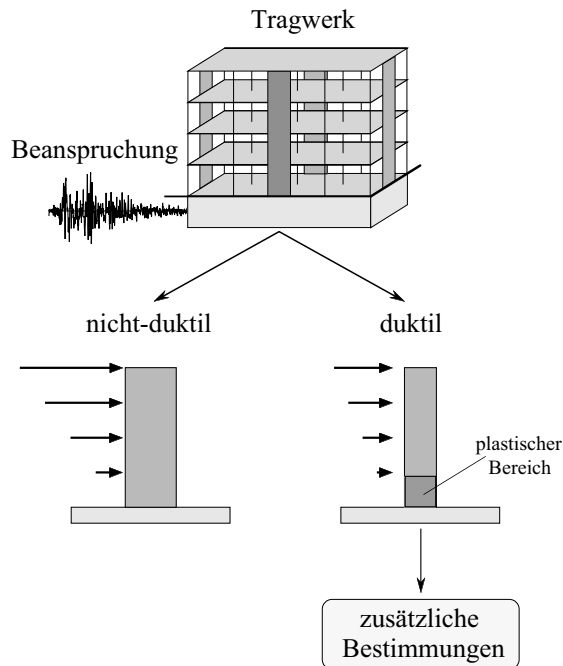


Bild 7.1 : Schematische Darstellung des Unterschiedes zwischen duktilem und nicht-duktilen Verhalten in der Erdbebenbemessung.

Die konstruktiven Bestimmungen für Tragwände und Rahmen sind ähnlich, werden aber getrennt behandelt, um das spezifische seismische Verhalten dieser zwei Tragwerksarten zu berücksichtigen. Obwohl sich diese Vorschriften in erster Linie auf Hochbauten beziehen, sind die Grundsätze auch für Brücken gültig. In dieser Hinsicht beinhalten Rahmenbrücken im allgemeinen beide Fälle, da sie sich in Längsrichtung wie Rahmen verhalten, während die Pfeiler in Querrichtung wie Tragwände wirken.

7.3 KONZEPT DER ERDBEBENBEMESSUNG

Das Konzept der Erdbebenbemessung ist grundsätzlich für alle Baumaterialien gleich. Für die konkrete Umsetzung sind jedoch material- bzw. bauweisenspezifische Parameter und Konstruktionsregeln zu beachten. Im Folgenden werden die Grundsätze der Erdbebenbemessung unter Berücksichtigung der stahlbetonspezifischen Regeln erläutern.

Die Erdbebeneinwirkung zwingt einem Tragwerk dreidimensionale dynamische Verformun-

gen auf, wobei in der Regel nur die horizontalen Anteile für Bauwerke gefährdend sind. Im Falle eines starken Erdbebens können Bauwerke über die Grenze des elastischen Tragwiderstandes beansprucht werden, es entstehen plastische Gelenke. Hier führt der zyklische Charakter der Beanspruchung zum Abplatzen des Überdeckungsbetons. Nichtlineare Effekte wie Rissbildung, Fließen der Bewehrung und Betonabplatzungen bewirken, dass die Steifigkeit des Tragwerkes reduziert wird. Eine geringere Steifigkeit wiederum bewirkt im allgemeinen eine Reduktion der vom Erdbeben erzeugten Beanspruchung im Tragwerk. Eine ausreichende Duktilität erlaubt es, dieses günstige Phänomen auszunützen.

7.3.1 Verhaltensbeiwert

Bei der Erdbebeneinwirkung handelt es sich nicht um eine statische Kraft wie beispielsweise die Eigenlast, sondern eher um von aussen ins Bauwerk eingebrachte Energie, welche sich in Form von Bauwerksschwingungen äussert. Damit ein Bauwerk diese Energie aufnehmen kann, muss es sich verformen können. Obwohl sich bei plastischen Verformungen der Widerstand nicht mehr (nennenswert) vergrössert, kann mit fortschreitender Verformung noch Energie aufgenommen werden. Dieses Energieaufnahmevermögen wird mit dem Verhaltensbeiwert q berücksichtigt. Ein Verhaltensbeiwert $q = 1$ entspricht einem rein elastischen Verhalten, d.h. es wird keine Energie durch plastische Verformung absorbiert. Je grösser das plastische Verformungsvermögen einer Struktur ist, desto grösser kann der q -Wert angesetzt werden. In der Bemessung wird der Verhaltensbeiwert benutzt, um die statische Ersatzlast im Vergleich zum elastischen Verhalten zu reduzieren.

Die Duktilität des Stahlbetons wird durch jene des Bewehrungsstahls und des Betons sowie durch die Qualität der konstruktiven Details bestimmt. Der Bewehrungsstahl muss sowohl eine ausreichende Dehnbarkeit (ϵ_{tk}) als auch eine genügende Verfestigung (f_t/f_s) aufweisen, um eine günstige Verteilung der Risse im plastischen Zustand zu gewährleisten. Aus diesem

Grund wird q in Funktion der Duktilitätsklasse des eingesetzten Bewehrungsstahls festgelegt. Die in der Norm SIA 262 angegebenen Werte für q gelten ausschliesslich für mit Bewehrungsstahl bewehrte Bauteile. Bei Verwendung anderer Bewehrungen wie beispielsweise Verbundwerkstoffen ist Vorsicht geboten. Hier sind besondere Untersuchungen erforderlich.

Was die konstruktiven Einzelheiten betrifft, muss der Abstand der Bügelbewehrung begrenzt werden, um das Ausknicken der Längsbewehrung bei plastischen Verformungen zu vermeiden. Zudem sind die Bügel so auszubilden, dass sie sich nach einem Abplatzen des Überdeckungsbetons nicht öffnen können, d.h. die Stabenden der Bügel sind im Kernbeton zu verankern. Um die Tragfähigkeit auch bei grossen plastischen Verformungen aufrecht zu halten, müssen spröde Versagensmechanismen wie beispielsweise ein vorzeitiges Schubversagen ausgeschlossen werden. Diese Massnahmen garantieren ein günstiges Erdbebenverhalten und erlauben die Ausnutzung von hohen Verhaltensbeiwerten.

7.3.2 Steifigkeit

Die horizontale Steifigkeit ist eine wesentliche Eigenschaft eines Tragwerks, denn sie bestimmt ihr dynamisches Verhalten (Eigenfrequenzen) und damit die seismischen Beanspruchungen. Es ist darauf zu achten, dass die Eigenfrequenzen an einem realitätsnahen statischen Modell berechnet werden. Die empirischen Näherungsformeln für die Abschätzung der Grundfrequenz ergeben in vielen Fällen zu hohe Werte, was zu einer Überschätzung der Erdbebeneinwirkung führen kann.

Im Fall des Stahlbetons muss der Einfluss der Rissbildung auf die Steifigkeit der Bauteile berücksichtigt werden. Die Reduktion der Steifigkeit durch die Rissbildung ist erheblich und hängt vom Bewehrungsgehalt und der Beanspruchung ab. Bei Gebäuden liegt die massgebende Steifigkeit im allgemeinen zwischen 30% und 50% jener im ungerissenen Zustand. Im allgemeinen müssen die Beanspruchungen und die Verformungen auf Grund eines Mittelwertes

der Steifigkeit bestimmt werden (SIA 262 Ziffer 4.3.9.1.1).

7.3.3 Widerstand und Überfestigkeit

Der Widerstand gegenüber horizontalen Lasten ist ein weiterer wichtiger Einflussfaktor, denn er bestimmt die plastischen Deformationen und damit das Mass der dem Tragwerk zugefügten Schäden.

Die Überfestigkeit berücksichtigt den effektiven Tragwiderstand der Bauteile und wird in Relation zum theoretisch erforderlichen Widerstand gemäss Bemessung definiert. Im Falle des Stahlbetons ist der effektive Widerstand (Überfestigkeit), aus zwei Gründen größer als der Bemessungswiderstand:

- Der effektiv eingesetzte Stahlquerschnitt ist in der Regel etwas höher als der theoretisch erforderliche.
- Der Stahl wird bis über die elastische Grenze beansprucht (Verfestigung).

Die Tatsache, dass bei grossen plastischen Verformungen der effektive Biege- und Schubwiderstand grösser ist als der Bemessungswiderstand (theoretisches Fliessmoment) bewirkt, dass auch die Querkräfte entsprechend über den Bemessungswert ansteigen. Um ein Schubversagen zu vermeiden, muss diese Erhöhung der Schubbeanspruchung berücksichtigt werden.

7.3.4 Lokale und globale Duktilität

Die Duktilität ist ein Schlüsselparameter des Erdbebenverhaltens eines Tragwerks. Nimmt man ein idealisiertes Verhalten gemäss Bild 7.2 an, so ist die Duktilität (u_{tot}/u_y) definiert als Verhältnis zwischen der Deformation beim Bruch (u_{tot}) und jener beim Beginn der Plastifizierung (u_y). Diese Definition ist für alle Arten der Verformung anwendbar: Verschiebung, Krümmung, Verdrehung, Dehnung usw.

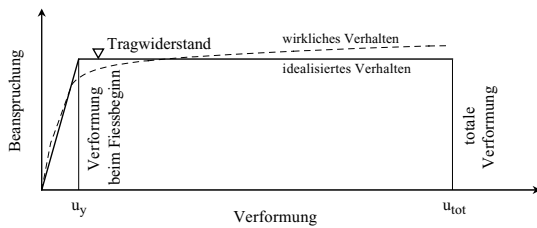
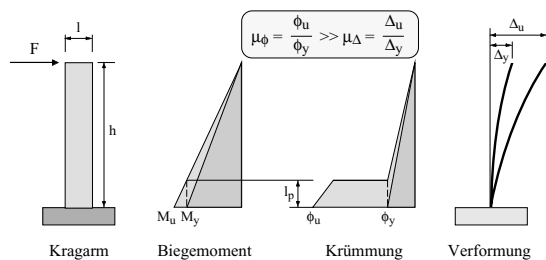


Bild 7.2 : Definition der Duktilität.

Besonders zu beachten ist der Unterschied zwischen der lokalen und der globalen Duktilität. Die globale Duktilität bezieht sich auf die Verformungen des ganzen Bauwerks. Sie ist die Basis für die Bestimmung des Verhaltensbeiwertes q .

Bild 7.3 : Beziehung zwischen lokaler (μ_{Δ}) und globaler (μ_{ϕ}) Duktilität am Beispiel eines Kragarms.

Die lokale Duktilität bezieht sich auf die Verformungen in den plastischen Bereichen (Gelenke). Sie entspricht den effektiven Beanspruchungen des Materials. Ihre Werte sind deutlich höher als jene der globalen Duktilität. Die Beziehung zwischen lokaler und globaler Duktilität für einen Kragarm ist in Bild 7.3 [7.3] dargestellt.

7.3.5 Bemessung

Wenn vorausgesetzt wird, dass Bauteile unter Erdbebeneinwirkung bis stark in den plastischen Bereich beansprucht werden können, müssen besondere Bemessungsregeln eingehalten werden. Dabei gilt die Kapazitätsbemessung (capacity Design) als allgemein anerkannte Methode [7.4]. Das Prinzip der Kapazitätsbemessung lässt sich wie folgt beschreiben: der Ingenieur wählt die Stellen, wo sich unter Erdbebeneinwirkung plastische Gelenke bilden

sollen. Er konstruiert diese Bereiche so, dass sie diese Verformungen ertragen können, ohne die Stabilität der Struktur unter den vertikalen Lasten zu gefährden. Der Rest der Struktur, insbesondere die an die plastischen Bereiche angrenzenden Zonen, wird verstärkt, um sicherzustellen, dass diese Bauteile im elastischen Bereich bleiben. Auf diese Art wird eine klare Hierarchie der Widerstände aufgestellt. Diese Hierarchie verhindert das unkontrollierte Plastifizieren und gewährleistet ein günstiges Erdbebenverhalten des Tragwerks. Mit anderen Worten drängt der Ingenieur dem Bauwerk auf, wo es sich plastifizieren darf und wo nicht.

7.3.6 Plastische Mechanismen

Im Rahmen der Kapazitätsbemessung besteht der erste Schritt darin, einen zweckmässigen Mechanismus zu wählen. Dieser Mechanismus soll möglichst grosse plastische Verformungen des Tragwerks bei möglichst geringen Rotationen in den Gelenken erlauben. Bild 7.4 illustriert den Fall eines zweckmässigen und eines unzuweckmässigen plastischen Mechanismus für einen Rahmen.

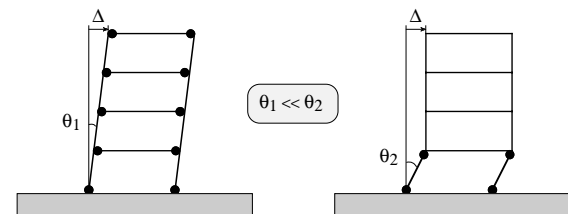


Bild 7.4 : Zweckmässiger (links) und unzuweckmässiger (rechts) plastischer Mechanismus.

Für die Tragwände, die im allgemeinen als Kragarme wirken, befindet sich das plastische Gelenk normalerweise im untersten Teil. Es muss nun dafür gesorgt werden, dass der plastische Mechanismus durch die Biegung und nicht durch den Schub bestimmt wird.

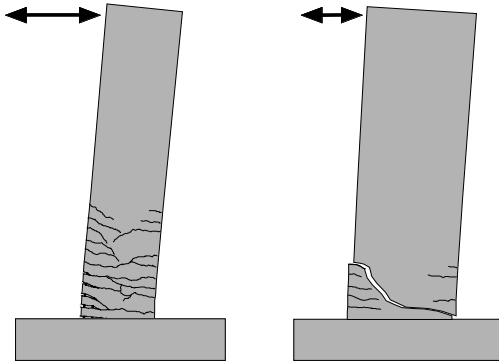


Bild 7.5 : Duktiles Verhalten mit Biegemechanismus (links) und sprödes Verhalten mit Schubmechanismus (rechts).

Bei der Bestimmung der maximalen Schubbeanspruchung, die am Fuss des Kragarms wirken kann, muss daher die Überfestigkeit sowie der Einfluss der höheren Eigenformen berücksichtigt werden.

7.4 NICHT-DUKTILES VERHALTEN

Der Ingenieur kann aber auch ein Bauwerk auf Erdbeben bemessen, indem er annimmt, dass das Tragwerksverhalten unter Erdbebeneinwirkung nicht-duktil sein wird. In diesem Fall ist die Bemessung für die Bemessungssituation Erdbeben konventionell, d.h. es sind die "normalen" konstruktiven Bestimmungen der Norm SIA 262 anzuwenden (SIA 262 Ziffer 4.3.9.2.1).

Die Beanspruchungen infolge Erdbeben werden mit dem Verhaltensbeiwert q gemäss Tabelle 7.1 (SIA 262 Tabelle 13, Ziffer 4.3.9.2.2) bestimmt. Diese Werte berücksichtigen die "natürliche Duktilität" des Stahlbetons.

Duktilitätsklasse des Stahls	Betonstahl			Spannstahl
	A	B	C	
Verhaltensbeiwert q	1,5	2,0	2,0	1,5

Tabelle 7.1: Verhaltensbeiwerte q für nicht-duktilen Tragwerksverhalten.

Bauteile aus vorgespanntem Beton weisen im allgemeinen eine begrenzte lokale Duktilität auf. Aus diesem Grund wird der entsprechende Verhaltensbeiwert auf $q = 1.5$ festgelegt.

7.5 DUKTILES VERHALTEN

Alternativ kann der Ingenieur ein Bauwerk dimensionieren, indem er annimmt, dass sein Verhalten bei Erdbeben duktil sein wird. In diesem Fall muss die Bemessung gemäss den Regeln der Kapazitätsbemessung (SIA 262 Ziffer 4.3.9.3.1) durchgeführt werden [7.3, 7.4].

Die Grundsätze finden auf Beton der Widerstandsklasse $\geq C 20/25$ und $\leq C 50/60$ Anwendung (SIA 262 Ziffer 4.3.9.3.2). Ein Beton höherer Widerstandsklasse hat im allgemeinen eine begrenzte Duktilität. Seine Anwendung erfordert daher den Nachweis einer ausreichenden lokalen Duktilität, um den zulässigen Wert des Verhaltensbeiwertes q zu rechtfertigen.

Die in den Abschnitten 7.3.5 und 7.3.6 dargestellten Grundsätze der Kapazitätsbemessung müssen eingehalten werden (SIA 262 Ziffer 4.3.9.3.3), d.h. es muss:

- zwischen elastischen und plastischen Bereichen im Tragwerk unterschieden werden,
- die Energiedissipation durch entsprechende Wahl der plastischen Bereiche optimiert werden,
- eine ausreichende Verformungsfähigkeit in den plastischen Gelenken sichergestellt werden, indem die konstruktiven Details sorgfältig konstruiert werden (entsprechend SIA 262 Ziffer 5.7),
- die Überfestigkeit für die Bestimmung der Bemessungsschnittkräfte berücksichtigt werden. Der Biege- und Schubwiderstand muss mit den effektiven Querschnittsabmessungen und dem mittleren Wert der Fließgrenze der Bewehrung bestimmt werden, welcher höher ist als der charakteristische Wert. Ohne genauere Untersuchungen kann ein Wert von $1.1 f_{sk}$ resp. $1.1 f_{p0,1k}$ angenommen werden (SIA 262 Ziffer 4.3.9.4.2).

Ein duktiles Verhalten für vorgespannte Bauteile darf nur angenommen werden, wenn eine ausreichende lokale Duktilität nachgewiesen wird. (SIA 262 Ziffer 4.3.9.3.4). Ohne entsprechenden Nachweis ist von einem nicht-

duktilen Verhalten auszugehen. Diese Vorsicht ist nötig, da das Verformungsvermögen vorgespannter Bauteile je nach den Verhältnissen gering sein kann. Es soll aber erwähnt sein, dass bei vielen vorgespannten Bauwerken die plastischen Zonen in nicht vorgespannten Bauteilen angeordnet werden können (z.B. in den Pfeilern einer Rahmenbrücke). Es ist klar, dass solche Bauwerke, bei welchen alle plastischen Gelenke in nicht vorgespannten Bauteilen liegen, bezüglich der Bestimmung des Verhaltensbeiwertes q wie nicht vorgespannte Bauwerke betrachtet werden dürfen.

Für ein Tragwerk mit Flachdecken darf ein duktiler Verhalten nur dann angenommen werden, wenn der Anteil der Stützen am horizontalen Widerstand vernachlässigt wird (SIA 262 Ziffer 4.3.9.3.6). Die Stützen müssen jedoch die auftretenden Verformungen aufnehmen und dabei auch die vertikalen Lasten während und nach dem Erdbeben abtragen können. Das Rotationsvermögen in Übergang Stütze-Platte kann durch die Anordnung einer Durchstanzbewehrung erheblich verbessert werden.

7.5.1 Verhaltensbeiwert

Für die Bemessung eines Tragwerks mit duktilem Verhalten ist der von der Duktilitätsklasse der Bewehrung abhängige Verhaltensbeiwert q gemäss Tabelle 7.2 (SIA 262 Tabelle 14, Ziffer 4.3.9.3.5) zu berücksichtigen. Im Gegensatz zum Eurocode EC 8 werden die q -Werte in SIA 262 für unterschiedliche Bauwerkstypen nicht differenziert.

Duktilitätsklasse des Stahls	Betonstahl		
	A	B	C
Verhaltensbeiwert q	nicht zulässig	3,0	4,0

Tabelle 7.2: Verhaltensbeiwerte q für duktiler Tragwerksverhalten.

Mit einer Bewehrung der Duktilitätsklasse A kann kein duktiler Tragwerksverhalten erreicht werden, da sie eine ungenügende Duktilität aufweist. Mit der zunehmenden Duktilität der Bewehrungen der Klassen B und C steigt der zulässige Verhaltensbeiwert q an.

7.5.2 Vorschriften für Tragwände

Die Vorschriften für Tragwände gelten für unten eingespannte Wandscheiben und Kerne, die als vertikale Kragarme wirken und deren Verhalten primär durch Biegung bestimmt wird, d.h. ihre Schlankheit h_w/l_w muss grösser als 2 sein (SIA 262 Ziffer 4.3.9.4.1).

Entsprechend den Grundsätzen der Kapazitätsbemessung müssen die Beanspruchungen unter Berücksichtigung der Überfestigkeit (SIA 262 Ziffer 4.3.9.4.2) sowie der Einflüsse der höheren Eigenformen (SIA 262 Ziffer 4.3.9.4.2) bestimmt werden. Bei Gebäuden, welche hauptsächlich durch Wände stabilisiert werden und die mit der vereinfachten Methode des Ersatzlastverfahrens bemessen werden, werden diese zwei Einflüsse berücksichtigt durch:

- eine lineare Verteilung der Bemessungsmomente über die ganze Wandhöhe (siehe Bild 7.6, SIA 262 Ziffer 4.3.9.4.3).
- eine Erhöhung der Bemessungsquerkraft um die Faktoren ε (Überfestigkeit des Biegemomentes, SIA 262 Ziffer 4.3.9.4.4) und κ (höhere Eigenformen in Funktion der Anzahl Geschosse, SIA 262 Ziffer 4.3.9.4.4).

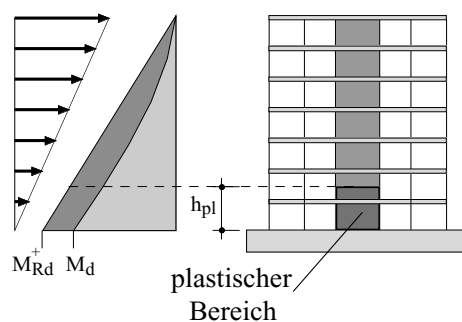


Bild 7.6 : Verlauf des Bemessungsmomentes für ein durch Tragwände stabilisiertes Gebäude.

An dieser Stelle muss darauf hingewiesen werden, dass das Ersatzlastverfahren nur bei regelmässigen Bauwerken anwendbar ist. In anderen, komplexeren Fällen müssen genauere Berechnungsmethoden wie beispielsweise die Antwortspektrenmethode eingesetzt werden.

7.5.3 Vorschriften für Rahmen

Bei Gebäuden, welche durch Rahmen stabilisiert werden, sollen sich die plastischen Gelenke in den Riegeln bilden und nicht in den Stützen. Entsprechend den Grundsätzen der Kapazitätsbemessung werden jedoch plastische Gelenke an den Stützenfüssen im untersten Geschoss und an den Stützenköpfen im obersten Geschoss zugelassen (siehe *Bild 7.7*, *SIA 262 Ziffer 4.3.9.5.1*).

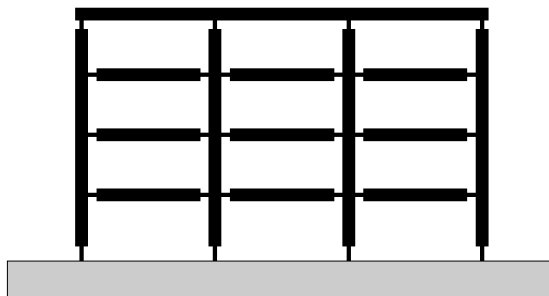


Bild 7.7 : Die plastischen Gelenke sollen hauptsächlich in den Riegeln entstehen.

Entsprechend den Regeln der Kapazitätsbemessung werden die Bemessungsquerkräfte der Stützen unter Berücksichtigung der Überfestigkeit im Biege widerstand der Stützenenden bestimmt. So kann ein sprödes Schubversagen in den Stützen vermieden werden. (*SIA 262 Ziffer 4.3.9.5.2*).

7.6 KONSTRUKTIVE DURCHBILDUNG: BESONDERHEITEN BEI ERDBEBENBEMESSUNG

7.6.1 Tragwände

Wie in *Bild 7.8* dargestellt wird die Höhe der plastischen Zone h_{pl} am Fuss der Tragwand in Funktion der Wandlänge l_w und der Wandhöhe h_w bestimmt:

- $h_{pl} > l_w$
- $h_{pl} > h_w/6$

Bei Gebäuden führen diese Vorschriften meist dazu, dass die plastische Zone bis in das folgende Geschoss zu verlängern ist. Um über-grosse plastische Bereiche zu vermeiden, darf ihre Höhe auf die Höhe eines Geschosses h_s begrenzt werden, wenn:

- $h_s \geq 2l_w/3$
- $h_s \geq h_w/9$

In diesem Fall darf mit $h_{pl} = h_s$ gerechnet werden.

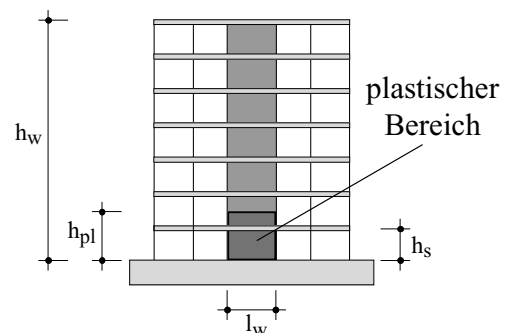


Bild 7.8 : Plastischer Bereich am Fuss einer Tragwand, die für duktiles Verhalten bemessen wird.

Die lokale Duktilität der plastischen Bereiche am Fuss von Tragwänden wird in erster Linie durch ihre Randelemente bestimmt. Diese Elemente sind vergleichbar mit hochbeanspruchten Stützen und müssen entsprechend den nachfolgenden Regeln ausgebildet werden (siehe *Bilder 7.9* und *7.10*, *SIA 262 Ziffer 5.7.1.2*):

- die Vorschriften für Druckglieder betreffend den Abmessungen und der minimalen Längsbewehrung (*SIA 262 Ziffer 5.5.4*).
- um die Duktilität sicherzustellen ist eine Umschnürungsbewehrung erforderlich.
- eine minimale Dicke für eine einwandfreie Betonqualität ($b_w \geq 200 \text{ mm}$) und eine ausreichende Stabilität während den Zyklen mit grossen plastischen Verformungen ($b_w \geq h_s/15$).
- eine minimale Länge l_c um die Druckzone abzudecken ($l_c \geq 300 \text{ mm}$ und $l_c \geq l_w/10$). Diese Länge entspricht der Zone mit grossen Betonstauchungen, wo wegen dem Abplat-

zen des Überdeckungsbetons eine spezielle Ausbildung der Bewehrung notwendig ist.

- Die Anordnung der Längsbewehrung und der Bügel muss den Vorschriften für die plastischen Bereiche in Stützen entsprechen (siehe *Bild 7.10*, *SIA 262 Ziffer 5.7.2*).
- Randelemente können durch ausreichend bewehrte Querflansche ersetzt werden, falls deren Abmessungen ausreichend gross sind (*Dicke* $> h_s/15$ und *Länge* $> h_s/5$).

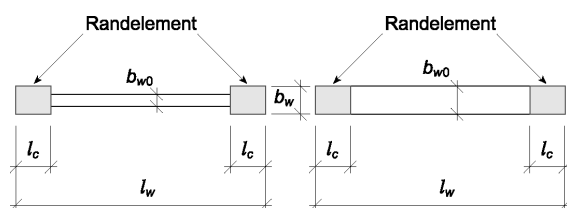


Bild 7.9 : Randelemente für Tragwände mit freien Rändern.

Für die Durchbildung der plastischen Bereiche zwischen den Randelementen sind die folgenden Regeln einzuhalten (*SIA 262 Ziffer 5.7.1.3*):

- eine minimale Dicke für eine einwandfreie Betonqualität ($b_{w0} \geq 150 \text{ mm}$) und eine ausreichende Stabilität während den Zyklen mit grossen plastischen Verformungen ($b_w \geq l_w/25$ bzw. $h_s/20$).
- ein minimaler Bewehrungsgehalt von 0.2% sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung zur Gewährleistung einer ausreichenden Duktilität.
- ein maximaler Stababstand der Bewehrung von 250 mm bzw. $25 \cdot \varnothing$ um die Rissöffnung zu begrenzen.

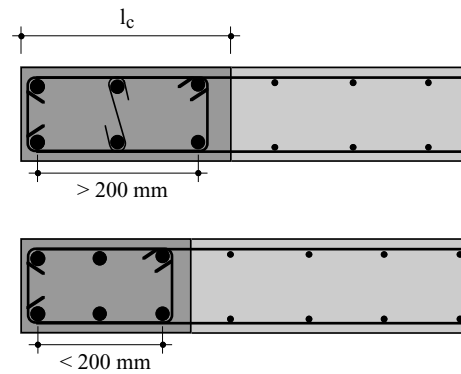


Bild 7.10 : Halterung der Längsbewehrung in den plastischen Zonen

7.6.2 Rahmentragwerke

Aufgrund der unterschiedlichen Beanspruchung wird bei den Regeln für die konstruktive Durchbildung zwischen den Riegeln (*SIA 262 Ziffer 5.7.2.1*) und den Stützen (*SIA 262 Ziffer 5.7.2.2*) unterschieden (siehe *Bild 7.11*).

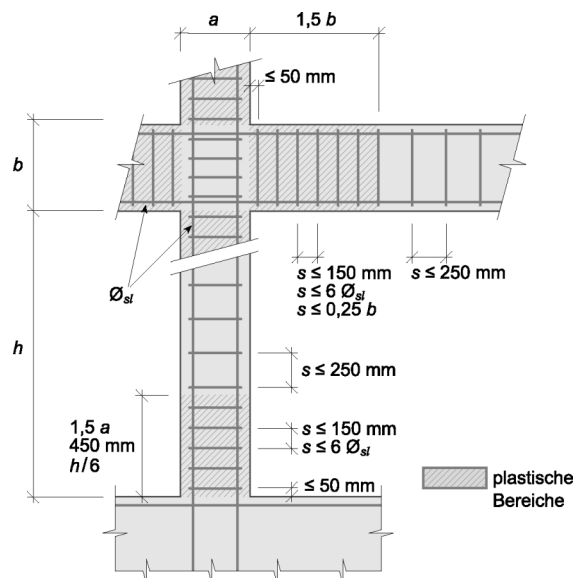


Bild 7.11 : Konstruktive Durchbildung von Riegeln und Stützen

Vorschriften für die Rahmenriegel

Um eine ausreichende lokale Duktilität in den plastischen Bereichen sicherzustellen sowie einen Spröbruch im übrigen Bauteil zu verhindern, müssen die folgenden Vorschriften eingehalten werden (*SIA 262 Ziffer 5.7.2.1*):

- minimale Länge des plastischen Bereichs von 1.5 mal die Höhe des Riegels.
- in der Druckzone des plastischen Bereichs ist eine Bewehrung einzulegen, die mindestens der Hälfte der vorhandenen Zugbewehrung entspricht.
- in den plastischen Bereichen sind Umschnürungsbügel anzuordnen, deren Abstand kleiner ist als 150 mm und kleiner als $b/4$. Der Abstand des ersten Umschnürungsbügels vom Endquerschnitt darf maximal 50 mm betragen. Damit wird die Duktilität des Betons erhöht und das Ausknicken der Bewehrung verhindert.
- der Abstand der Bügel ausserhalb der plastischen Bereiche wird auf 250 mm bzw. $b/2$ begrenzt, um ein sprödes Schubversagen zu verhindern.

Vorschriften für die Rahmenstützen

Um eine ausreichende lokale Duktilität in den plastischen Bereichen sicherzustellen sowie einen Sprödbbruch im übrigen Bauteil zu verhindern, müssen die folgenden Vorschriften eingehalten werden (*SIA 262 Ziffer 5.7.2.2*):

- Minimale Stützenabmessung a von 200 mm.
- Minimale Länge des plastischen Bereichs von 1.5 mal die Stützenbreite, im Minimum jedoch $1/6$ der Stützenlänge oder 450 mm.
- In den plastischen Zonen ist eine Umschnürungsbewehrung einzulegen, um das Ausbrechen des Betons und das Ausknicken der Längsbewehrung zu verhindern. Der Bügelabstand darf höchstens 150 mm bzw. 6 mal den Durchmesser der Längsbewehrung betragen. Für eine Längsbewehrung $\varnothing 26$ beispielsweise beträgt der minimale Bügelabstand 150 mm. Der Abstand des ersten Bügels vom Riegel darf nicht mehr als 50 mm betragen. Für eine genügende Knicksicherung der Längsbewehrung muss der Bügeldurchmesser min. 0.35 mal dem Durchmesser der grössten vorhandenen Längsbewehrung entsprechen. So ist beispielsweise bei einer

Längsbewehrung $\varnothing 26$ ein minimaler Bügeldurchmesser von 10 mm erforderlich.

- In den plastischen Bereichen muss eine minimale Umschnürungsbewehrung gemäss *Gl. (262.94)* eingelegt werden. Diese Bedingung ist bei mässig beanspruchten Stützen im Hochbau mit üblichen Abmessungen im allgemeinen bereits mit der minimalen Bügelbewehrung erfüllt. Bei grossen Stützen mit hoher Normalkraft wie beispielsweise Brückenpfeiler führt dies zu einer beachtlichen Bewehrung.
- In den plastischen Bereichen muss jeder zweite Längsstab durch Abbiegungen der Umschnürungsbügel oder durch Querhaken gehalten werden. Der Abstand zwischen gehaltenen Längsstäben darf 200 mm nicht überschreiten. (siehe *Bild 7.10*).
- Der Abstand der Bügel ausserhalb der plastischen Bereiche wird auf 250 mm bzw. $a/2$ begrenzt, um ein sprödes Schubversagen zu verhindern.



Bild 7.12 : Verschiebung der plastischen Bereiche durch Ausfachung der Rahmenfelder mit Mauerwerk.

Eine Ausfachung der Rahmenfelder mit Mauerwerk kann den Ort der plastischen Bereiche verändern (siehe *Bild 7.12*). In diesen Fällen ist die ganze Stützenlänge als plastischer Bereich zu betrachten und entsprechend zu bewehren (SIA 262 Ziffer 5.7.2.3).

Die horizontale Umschnürungsbewehrung im Riegel-Stützen-Knoten muss mindestens jener in den plastischen Bereichen der Stütze entsprechen (SIA 262 Ziffer 5.7.2.4).

7.6.3 Verankerung und Stösse

Die Verankerung der Umschnürungsbewehrung sowie die Stösse der Längsbewehrung sind wichtige Details für ein duktiler Bauteilverhalten. Deshalb ist diesen Aspekten bei der konstruktiven Durchbildung besondere Beachtung zu schenken. Die Missachtung der diesbezüglichen Regeln kann die Duktilität erheblich reduzieren und zu einem vorzeitigen Versagen der betroffenen Bauteile führen.

Wie im *Bild 7.13* dargestellt müssen die Bügel mit Endhaken von 135° mit einer Mindestlänge von $10\cdot\varnothing$ im Kernbeton verankert werden. Haken von 90° sind nicht ausreichend, da der Überdeckungsбетон bei zyklischen plastischen Verformungen abplatzen kann (*Bild 7.14*). In diesem Fall ist die Verankerung nicht mehr gewährleistet und die Bügel öffnen sich unter dem Druck der ausknickenden Längsbewehrung.

Bild 7.15 stellt ein schlechtes Beispiel dar. Stösse in den plastischen Zonen sind zu vermeiden. Bei einer optimalen Konstruktion, wie im *Bild 7.16* links dargestellt, liegen alle Bewehrungsstösse ausserhalb des plastischen Bereichs. Oft ist dies nicht möglich. Dann sollen die Stösse in den oberen bzw. äusseren Drittel des plastischen Bereichs gelegt werden, wie im *Bild 7.16* rechts dargestellt.

Eine akzeptable Alternative können mechanische Stabverbindungen sein. Es ist jedoch nachzuweisen, dass diese eine ausreichende Duktilität aufweisen.

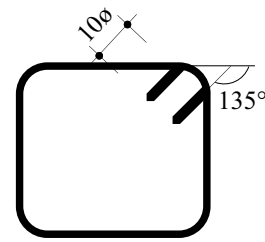


Bild 7.13 : Ausbildung der Bügel.



Bild 7.14 : Um 90° abgelenkte Bügelenden gewährleisten keine ausreichende Verankerung.

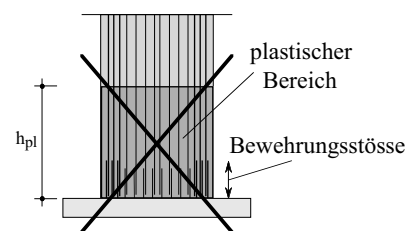


Bild 7.15 : Unzulässige Lösung mit Bewehrungsstössen im plastischen Bereich.

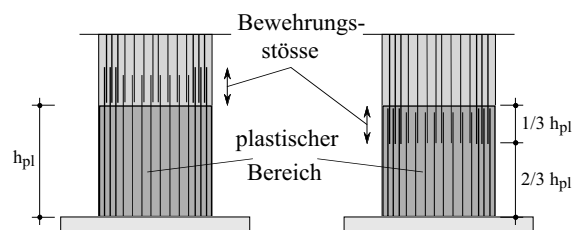


Bild 7.16 : Bewehrungsstösse ausserhalb des plastischen Bereichs (links) oder notfalls im oberen Drittel (rechts).

7.7 SCHLUSSBEMERKUNGEN

Die Erdbebensicherheit eines Bauwerkes ist in erster Linie abhängig vom Widerstand gegen horizontale Lasten und von der globalen Duktilität [7.3]. Die erdbebenspezifischen Bestimmungen der Norm *SIA 262* zielen darauf ab, bei Tragwerken mit duktilem Verhalten eine ausreichende lokale Duktilität in den plastischen Bereichen zu gewährleisten, um die Verwendung der höheren Verhaltensbeiwerte q zu rechtfertigen. Diese Bestimmungen beinhalten Vorschriften zur Bemessung und zur konstruktiven Ausbildung (z.B. Begrenzung der Bügelabstände). Diese teilweise sehr einschneidenden Bestimmungen müssen nicht angewendet werden, wenn ein nicht-duktiler Verhalten angenommen wird. Obwohl in diesem Fall die Erdbebenbeanspruchungen gegenüber der elastischen Einwirkung nicht bzw. nur wenig reduziert werden dürfen, wird dieser etwas einfachere Bemessungsansatz für viele Bauwerke, insbesondere jene in der Zone 1, vernünftig sein.

7.8 LITERATUR

- [7.1] Eurocode 8 (2002), Design of Structures for Earthquake Resistance, Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings, prEN 1998-1, Draft 1, May 2000; Europäisches Komitee für Normung (CEN), Brüssel, 197 pp.
- [7.2] Bachmann H.: Erdbebugerechter Entwurf von Hochbauten – Grundsätze für Ingenieure, Architekten, Bauherren und Behörden. Richtlinie des BWG. Bern, 2002.
- [7.3] Bachmann H.: Erdbebensicherung von Bauwerken. ISBN 3-7643-5190-X. Birkhäuser Verlag, Basel, 1995.
- [7.4] Paulay T., Priestley M.J.N.: Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings. ISBN 0-471-54915-0. John Wiley & Sons, New York, 1992.

