



# Erdbebengerechter Entwurf von Hochbauten – Grundsätze für Ingenieure, Architekten, Bauherren und Behörden

Hugo Bachmann

Richtlinien des BWG – Directives de l'OFEG – Direttive dell'UFAEG  
Bern, 2002



Bundesamt für Wasser und Geologie **BWG**  
Office fédéral des eaux et de la géologie **OFEG**  
Ufficio federale delle acque e della geologia **UFAEG**  
Uffizi federal per aua e geologia **UFAEG**  
Federal Office for Water and Geology **FOWG**

## Impressum

Herausgeber: Bundesamt für Wasser und Geologie

Zitiervorschlag: Hugo Bachmann: Erdbebengerechter Entwurf von Hochbauten – Grundsätze für Ingenieure, Architekten, Bauherren und Behörden, Richtlinien des BWG (Biel 2002, 81S.)

Original in deutsch. Diese Publikation ist auch auf französisch erhältlich.

Die Publikation ist im PDF-Format auf der BWG-Internetsite verfügbar: [www.bwg.admin.ch](http://www.bwg.admin.ch)

Auflage: 3'500d/1'500f

Bestellnummer: 804.802 d

Bezugsadresse: BBL, Vertrieb Publikationen, CH-3003 Bern,  
Internet: [www.bbl.admin.ch/bundespublikationen](http://www.bbl.admin.ch/bundespublikationen)

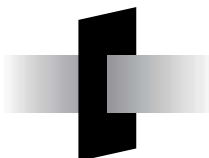
Copyright: © BWG, Biel, September 2002

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr,  
Energie und Kommunikation  
Département fédéral de l'environnement, des transports,  
de l'énergie et de la communication  
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti,  
dell'energia e delle comunicazioni

# Erdbebengerechter Entwurf von Hochbauten – Grundsätze für Ingenieure, Architekten, Bauherren und Behörden

Hugo Bachmann

Richtlinien des BWG – Directives de l'OFEG – Direttive dell'UFAEG  
Bern, 2002



Bundesamt für Wasser und Geologie **BWG**  
Office fédéral des eaux et de la géologie **OFEG**  
Ufficio federale delle acque e della geologia **UFAEG**  
Uffizi federal per aua e geologia **UFAEG**  
Federal Office for Water and Geology **FOWG**

## Vorwort des Verfassers

Lange Zeit wurde das Erdbebenrisiko sozusagen als naturgegeben erachtet. Man ging davon aus, dass die Folgen der Bodenbewegungen für die Bauwerke einfach hingenommen werden müssen. Dementsprechend wurden Massnahmen zur Erdbebenvorsorge vorwiegend auf Vorbereitungen für die Katastrophenbewältigung beschränkt. Doch bereits am Anfang des 20. Jahrhunderts wurden auch bauliche Massnahmen vorgeschlagen. Und in den letzten Jahrzehnten lernte man dank intensiver Forschung immer besser, wie die Verletzbarkeit der Bauwerke durch Erdbeben stark reduziert werden kann.

Die vorliegende Publikation will moderne Erkenntnisse zum baulichen Erdbebenschutz auf einfache und leicht fassliche Weise darstellen. Dies geschieht anhand von Grundsätzen mit zugehörigen Bildern und Beispielen

sowie erläuternden Texten. Die Grundsätze und die selbst angefertigten oder aus anderen Quellen herangezogenen Bilder wie auch die Texte sind das Ergebnis einer jahrelangen intensiven wissenschaftlichen und praktischen Auseinandersetzung mit der anspruchsvollen und in starker Entwicklung befindlichen Materie der Erdbebensicherung von Bauwerken.

Der Verfasser dankt vor allem den zahlreichen am Schluss der Publikation aufgeführten Bildautoren für die Grosszügigkeit, Ergebnisse eines stets aufwendigen und oft auch gefährvollen Bemühens zur Verfügung zu stellen. Und dem Bundesamt für Wasser und Geologie gebührt Dank für die Herausgabe und den sorgfältigen Druck der Broschüre.

Zürich, August 2002

Prof. Hugo Bachmann

## Begleitwort des Herausgebers

Im Jahre 1998 erarbeitete die Schweizer Gesellschaft für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik SGEB eine Dokumentation betreffend den Handlungsbedarf von Behörden, Hochschulen, Industrie und Privaten zur Erdbebensicherung der Bauwerke in der Schweiz. Darin wurde vor allem bezüglich des Verhaltens der Bauten und Anlagen, dem Kernbereich der Erdbebenvorsorge, ein enormer Nachholbedarf und ein dringlicher Handlungsbedarf festgestellt. Diese Publikation und andere Interventionen haben dazu geführt, dass das Bundesamt für Wasser und Geologie vom Bundesrat beauftragt wurde, ab dem 1. Januar 2000 im Rahmen der Aufgaben des Bundes den Schutz vor Erdbeben zu bearbeiten. Das Bundesamt hat eine Koordinationsstelle Erdbebenvorsorge geschaffen, die beratende und unterstützende Funktionen für die ganze Bundesverwaltung wahrnimmt. Am 11. Dezember 2000 genehmigte der Bundesrat ein Programm von sieben Massnahmen zur Erdbebenvorsorge im Zuständigkeitsbereich des Bundes für den Zeitraum 2001 bis 2004.

Die Erdbebensicherung neu zu errichtender Bauwerke steht an der Spitze des Massnahmenprogramms des Bundes. Professor Hugo Bachmann war lange Jahre in der wissenschaftlichen Forschung zur Erdbebengefährdung und zum Erdbebenverhalten von Bauwerken tätig. Auf Wunsch des Bundesamtes hat er sich bereit erklärt, wissenschaftliche Erkenntnisse zur Erdbebensicherung von Bauwerken für die Praxis verfügbar zu machen. Das Bundesamt ist ihm dafür zu Dank verpflichtet. Die vorliegende Anleitung soll dazu beitragen, dass Forschungsergebnisse inskünftig von Baufachleuten konsequent in die Praxis umgesetzt, d.h. bei der Planung und Projektierung von Bauwerken berücksichtigt werden. Bei der in unserem Lande vorhandenen vergleichsweise mässigen Seismizität kann so bei neuen Bauwerken mit keinem oder vernachlässigbar kleinem Mehraufwand eine angemessene Erdbebensicherung erreicht werden.

Biel, August 2002

Dr. Christian Furrer  
Direktor des Bundesamtes  
für Wasser und Geologie

# Inhaltsverzeichnis

Zur Zielsetzung	6
Was geschieht bei einem Erdbeben?	7
Die bedeutendste Naturgefahr	8
Das Erdbebenrisiko wird laufend vergrössert	9
Fehlende Massnahmen	9
Dringlicher Handlungsbedarf	9
<b>GS 1</b> Enge Zusammenarbeit von Architekt und Bauingenieur beim Entwurf!	10
<b>GS 2</b> Die Erdbebenbestimmungen der Normen einhalten!	11
<b>GS 3</b> Keine wesentlichen Mehrkosten dank moderner Verfahren!	13
<b>GS 4</b> Weiche Erdgeschosse vermeiden!	15
<b>GS 5</b> Weiche Obergeschosse vermeiden!	19
<b>GS 6</b> Unsymmetrische Aussteifungen vermeiden!	21
<b>GS 7</b> Versetzungen von Aussteifungen vermeiden!	24
<b>GS 8</b> Sprünge bei Steifigkeiten und Widerständen sind problematisch!	25
<b>GS 9</b> Zwei schlanke Stahlbetontragwände pro Hauptrichtung!	26
<b>GS 10</b> Mischsysteme mit Stützen und tragenden Mauerwerkswänden vermeiden!	28
<b>GS 11</b> «Ausfachen» von Rahmen durch Mauerwerk vermeiden!	29
<b>GS 12</b> Mauerwerksbauten durch Stahlbetontragwände aussteifen!	32
<b>GS 13</b> Horizontal tragende Mauerwerkswände bewehren!	34
<b>GS 14</b> Tragwerk und nichttragende Bauteile aufeinander abstimmen!	38
<b>GS 15</b> Nichttragende Mauerwerkswände in Skelettbauten durch Fugen abtrennen!	40
<b>GS 16</b> Kurze Stützen vermeiden!	42

<b>GS 17</b>	Brüstungen in Rahmen vermeiden!	44
<b>GS 18</b>	Fachwerke sorgfältig wählen und bemessen!	46
<b>GS 19</b>	Stahltragwerke duktil gestalten!	48
<b>GS 20</b>	Fugen zwischen benachbarten Gebäuden fachgerecht ausbilden!	50
<b>GS 21</b>	Kompakte Grundrisse anstreben!	52
<b>GS 22</b>	Durch die Deckenscheiben den Zusammenhalt sichern und die Kräfte verteilen!	53
<b>GS 23</b>	Duktileres Tragwerk dank Kapazitätsbemessung!	55
<b>GS 24</b>	Duktilen Bewehrungsstahl mit $R_m/R_e \geq 1.15$ und $A_{gt} \geq 6\%$ verwenden!	56
<b>GS 25</b>	Querbewehrung in Tragwänden und Stützen mit 135°-Haken und Abständen $s \leq 5d$ !	58
<b>GS 26</b>	Keine Aussparungen und Öffnungen in plastischen Bereichen!	60
<b>GS 27</b>	Bei vorgefertigten Bauteilen die Verbindungen sichern!	62
<b>GS 28</b>	Foundation durch Kapazitätsbemessung schützen!	64
<b>GS 29</b>	Standortspezifisches Antwortspektrum entwickeln!	65
<b>GS 30</b>	Mögliche Bodenverflüssigung untersuchen!	66
<b>GS 31</b>	«Verweichen» kann besser sein als Verstärken!	68
<b>GS 32</b>	Fassadenbauteile auch für horizontale Kräfte verankern!	70
<b>GS 33</b>	Brüstungen und frei stehende Mauern verankern!	72
<b>GS 34</b>	Unterdecken und Beleuchtungskörper gut befestigen!	74
<b>GS 35</b>	Installationen und Einrichtungen sichern!	75
	Bildnachweis	78
	Literatur	79
	Kontakte	80
	Anhang: Gefährdungskarte	81

# Zur Zielsetzung

Die vorliegende Publikation hat zum Ziel, die Erdbebensicherung von Hochbauten auf elementarer Ebene jedoch in grosser Breite zu behandeln. Dazu werden Grundsätze für den erdbebengerechten Entwurf und die erdbebengerechte Gestaltung der Hochbauten präsentiert. Die Grundsätze betreffen vor allem den

- **konzeptionellen Entwurf** und die
- **konstruktive Durchbildung**

von

- **Tragwerk** und
- **nichttragenden Bauteilen.**

Beim konzeptionellen Entwurf und bei der konstruktiven Durchbildung von Tragwerk (Wände, Stützen, Decken) und nichttragenden Bauteilen (Zwischenwände, Fassadenbauteile) werden entscheidende Weichen gestellt für die Erdbebensicherheit (Versagensverhalten) und die Erdbebenverletzbarkeit (Schadensanfälligkeit) eines Hochbaus. Denn «erdbebenmässige» Fehler und Mängel des Entwurfs können durch eine auch noch so ausgeklügelte Berechnung und Bemessung durch den Bauingenieur nicht kompensiert werden. Ein erdbebengerechter Entwurf ist zudem erforderlich, um ohne oder ohne wesentliche Mehrkosten ein gutes Erdbebenverhalten der Hochbauten zu erreichen.

Die vorliegenden Grundsätze sind somit primär auf die Planung von Neubauten ausgerichtet. Es versteht sich jedoch von selbst, dass sie auch bei einer Überprüfung und allfälligen Ertüchtigung bestehender Bauten herangezogen werden können. Zu einigen Grundsätzen werden deshalb auch Anwendungen bei bestehenden Bauten gezeigt.

Die Grundsätze sind bewusst sehr einfach gehalten. Aspekte der Berechnung und Bemessung werden mehr nur am Rande erwähnt. Vertiefere Betrachtungen sind in der fachwissenschaftlichen Literatur zu finden (z.B. [Ba 02]).

Idee und Konzept der Grundsätze entstanden im Rahmen zahlreicher in den Jahren 1997 bis 2000 gehaltenen Vorträge, deren Inhalte laufend weiterentwickelt und ergänzt wurden. Pro Grundsatz wird zuerst ein leicht erklärbares, schematisch gehaltenes Bild (Grundsatzbild) und ein zugehöriger allgemeiner Text präsentiert. Zur weiteren Veranschaulichung des Grundsatzes folgen anschliessend meist Fotobilder von

Schäden – positiven oder negativen Beispielen – (Illustrationsbilder) mit zugehörigen Texten.

Die Grundsätze (GS) sind nach folgenden Themen gruppiert:

- Zusammenarbeit, Normen und Kosten (GS 1 bis GS 3)
- Aussteifungen und Verformungen (GS 4 bis GS 20)
- Gestaltung im Grundriss (GS 21 und GS 22)
- Konstruktive Durchbildung des Tragwerks (GS 23 bis GS 27)
- Foundation und Boden (GS 28 bis GS 31)
- Nichttragende Bauteile und Einrichtungen (GS 32 bis GS 35)

Es versteht sich von selbst, dass allgemein und bei einem bestimmten Objekt nicht sämtliche Grundsätze von gleicher Bedeutung sind. Je nach Gefährdung (Erdbebenzone und lokale Bodenverhältnisse) und Merkmalen des Objekts mögen aufgrund einer ingenieurmässigen Beurteilung Kompromisse zulässig sein. Im Vordergrund muss stets das strikte Einhalten der für die Sicherheit von Personen relevanten Grundsätze stehen, insbesondere derjenigen betreffend die Aussteifungen. Hingegen können bei Grundsätzen, die primär der Schadensverminderung dienen, Konzessionen eher in Frage kommen.

Die vorliegende Publikation richtet sich vor allem an Baufachleute wie Bauingenieure und Architekten, aber auch an Bauherren und Behörden. Sie eignet sich sowohl zum Selbststudium als auch als Grundlage für entsprechende Vorträge an Tagungen und Weiterbildungskursen sowie für den Unterricht an Schulen. Zu diesem Zweck können Bilder in elektronischer Form beim Herausgeber der Publikation bezogen werden. Alle übrigen Rechte wie die der Reproduktion der Bilder und Texte usw. sind vorbehalten.

# Was geschieht bei einem Erdbeben?

Bei einem Erdbeben werden bei ruckartigen Verschiebungen in einer Bruchzone der Erdkruste (aktive Verwerfung) seismische Wellen abgestrahlt. Die Wellen verschiedener Arten und mit unterschiedlichen Wellenwegen und -Geschwindigkeiten erreichen den Standort eines Bauwerks und erzeugen dort vielfältige Bodenbewegungen.

## Was geschieht bei einem Erdbeben?

### • Rasche Bodenbewegungen:

Wie lange?  
Wie viel?

### • Antwort der Bauwerke:

- Starke Schwingungen
- Grosse Beanspruchungen
- Lokales Versagen
- Kollaps = Einsturz

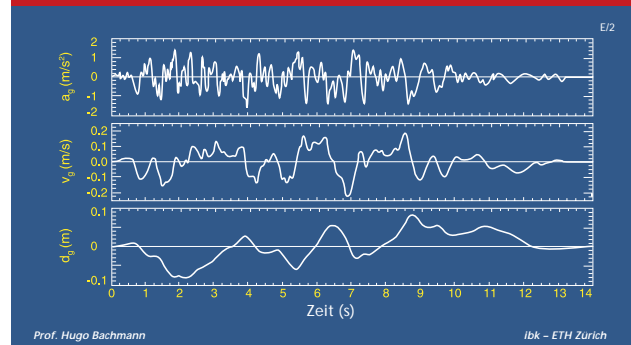
Prof. Hugo Bachmann

ibk - ETH Zürich

Der Boden bewegt sich rasch horizontal in allen Richtungen hin und her und auch vertikal auf und ab; vertikal meist etwas weniger als horizontal. Wie lange dauert die Bodenbewegung? Zum Beispiel ein mittelstarkes Erdbeben dauert etwa 10 bis 20 Sekunden, also nur eine verhältnismässig kurze Zeit. Wie gross sind die maximalen Ausschläge der Bodenbewegung? Zum Beispiel bei einem typischen «Walliser Beben» mit etwa Magnitude 6 – ähnlich wie das Schadenbeben von Visp 1855 – liegen die horizontalen Amplituden in der Grössenordnung von etwa 8, 10 oder 12 cm. Oder bei einem Erdbeben mit etwa Magnitude 6.5 oder etwas stärker, ähnlich wie ein «Basler Beben» wie es sich 1356 ereignete als Basel und seine Umgebung weitgehend zerstört wurden: Da liegen die maximalen Bodenverschiebungen in der Grössenordnung von etwa 15 oder 20 cm, vielleicht auch etwas mehr.

Und was geschieht mit den Bauwerken? Wenn sich der Boden rasch hin und her bewegt, dann werden die Fundamente der Bauwerke gezwungen, diese Bewegungen mitzumachen. Der obere Teil der Bauwerke aber, der möchte – wegen seiner Massenträgheit – sozusagen am liebsten dort bleiben, wo er immer gewesen ist. Das bewirkt starke Schwingungen mit resonanzähnlichen Phänomenen zwischen Bauwerk und Boden und somit grosse innere Beanspruchungen. Diese führen oft zu plastischen Verformungen des

## Zeitverläufe der Bodenbewegungsgrössen «Walliser Erdbeben»



Prof. Hugo Bachmann

ibk - ETH Zürich

Tragwerks und zu erheblichen Schäden mit lokalem Versagen und im Extremfall zum Kollaps d.h. zum Einsturz des Tragwerks.

Wesentlich für die Wirkungen eines Erdbebens auf ein Bauwerk sind die Zeitverläufe der drei Bodenbewegungsgrössen Bodenbeschleunigung ( $a_g$ ), Bodengeschwindigkeit ( $v_g$ ) und Bodenverschiebung ( $d_g$ ) mit ihrem spezifischen Frequenzgehalt. Am Beispiel der eindimensionalen horizontalen Bodenbewegungsgrössen eines künstlich generierten «Walliser Erdbebens» lässt sich erkennen, dass die wesentlichen Frequenzen der Bodenbeschleunigung erheblich höher liegen als jene der Bodengeschwindigkeit und sehr viel höher als jene der Bodenverschiebung.

Die Erdbebengefährdung ist je nach Region unterschiedlich (siehe Karte im Anhang und [GM 98]). Aber noch wichtiger als die Region kann der konkrete Standort eines Gebäudes sein. Denn die Bodenbewegungsgrössen und andere Kennwerte an einem Standort infolge eines Erdbebens bestimmter Stärke (Magnitude) können sehr verschieden sein und stark streuen. Sie hängen von zahlreichen Parametern ab wie Distanz, Richtung, Tiefe und Mechanismus der Bruchzone (Herd) in der Erdkruste sowie insbesondere von den lokalen Bodenverhältnissen (Schichtstärken, Scherwellengeschwindigkeiten) am Standort. Vor allem bei weicheren Böden können im Vergleich zu Felsstandorten erhebliche lokale Aufschaukelungen erfolgen. Und die Antwort der Bauwerke auf die Bodenbewegungen wird ihrerseits von wichtigen Eigenschaften des Bauwerks (Eigenfrequenzen, Tragwerkart, Duktilitäten, usw.) beeinflusst.

Die Bauwerke müssen daher so gestaltet werden, dass beträchtliche Streuungen und Unsicherheiten abgedeckt sind.



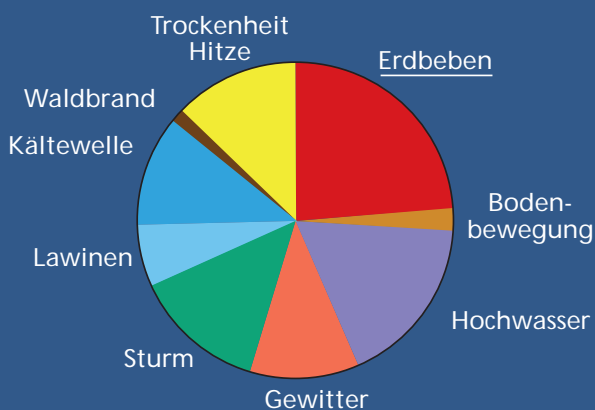
## Die bedeutendste Naturgefahr

In der Schweiz – wie anderswo auch – wurde lange Zeit das Erdbebenrisiko kaum beachtet und erheblich unterschätzt. Heute ist man sich vermehrt bewusst, dass auch in diesem Land Erdbebenkatastrophen enormen Ausmasses möglich sind.

Starke Erdbeben, vergleichbar mit den grossen Schadenbeben von Izmit Türkei 1999, Kobe Japan 1995 und Northridge Kalifornien 1994, veranschaulichen für schweizerische Verhältnisse etwa ein «Maximalbeben». Sie weisen zwar eine relativ geringe jährliche Wahrscheinlichkeit auf, sind aber nicht unmöglich. Das Erdbeben von Basel 1356 gehört in diese Stärkeklasse.

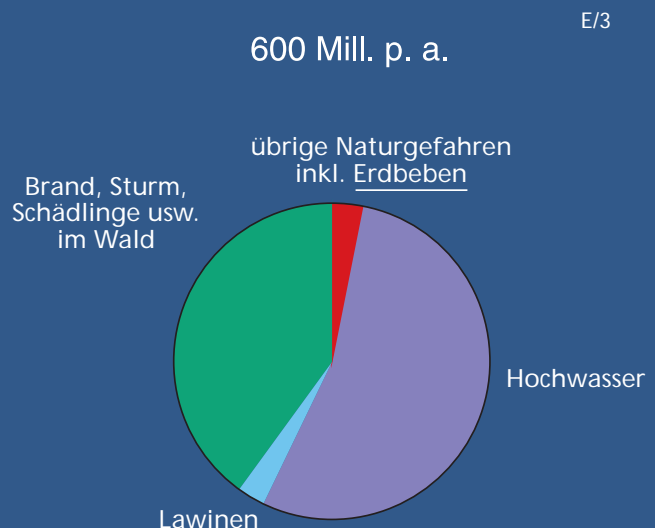
Die Frage nach dem Ausmass von möglichen Erdbebenkatastrophen in der Schweiz wurde in den letzten Jahren aus der Sicht der Versicherer und der Katastrophenvorsorge intensiv untersucht [D0150]. Die Versicherer schätzten in «Was-wäre-wenn-Studien» die Folgen ab, wenn ausgewählte historische Erdbeben in der Schweiz heute wieder auftreten würden, was jederzeit möglich und zu erwarten ist. So werden für das Visper Beben von 1855 heute Gebäudeschäden in der Grössenordnung von bis zu rund 10 Milliarden Schweizer Franken erwartet. Das Basler Beben von 1356 entspricht einer mittleren statistischen Wiederkehrperiode von etwa 500 bis 1000 Jahren und dürfte heute Gebäudeschäden in der Grössenordnung von bis zu 50 Milliarden Schweizer Franken verursachen. Dabei wurden die Verluste an

### Risiken aus den verschiedenen Naturgefahren



Prof. Hugo Bachmann

### Aufwendungen der öffentlichen Hand für Schutzmassnahmen



ibk – ETH Zürich

Menschenleben nicht explizit abgeschätzt. Es müsste aber mit bis zu einigen Hundert oder gar Tausend Toten und bis zu zehn mal mehr Verletzten gerechnet werden. Um die Schäden am Inhalt der Gebäude an Infrastrukturbauten für Verkehr, Kommunikation, Versorgung und Entsorgung, Kosten von Produktionsausfällen, Folgekosten von Toten und Verletzten und Umweltschäden zu berücksichtigen, müssen die Gebäudeschäden erfahrungsgemäss mit einem Faktor von 2 bis 3 multipliziert werden. Damit ergäben sich für das Basler Beben Gesamtschäden, die ein Mehrfaches der jährlichen Staatsrechnung der Schweizerischen Eidgenossenschaft (2001 ca. 50 Milliarden Schweizer Franken) betragen.

Ähnlich schwerwiegende Folgerungen resultieren aus einer Studie des Bundesamtes für Zivilschutz, das sich mit der Katastrophenvorsorge befasst (Katanos-Studie 1995). Das Kuchendiagramm links im Bild zeigt die Anteile der einzelnen Naturgefahren am gesamten gewichteten Risiko aus Naturgefahren in der Schweiz (ohne das Risiko aus der sogenannten Ausmassklasse 5, gemäss [D0150]). Es gibt die Risiken aus Hochwasser, Gewitter, Sturm, Lawinen usw., und das Risiko aus Erdbeben. Man erkennt, dass das Erdbebenrisiko von ähnlicher Grössenordnung oder sogar noch bedeutender ist als die Risiken aus den anderen Naturgefahren.

## **Das Erdbebenrisiko wird laufend vergrössert**

Das Erdbebenrisiko ist das Produkt aus der Gefährdung (Bebenstärke/Auftretenswahrscheinlichkeit und lokale Bodenverhältnisse) und dem exponierten Wert und der Verletzbarkeit der Bausubstanz. Zu den vorhandenen Bauwerken kommen ständig neue Bauwerke hinzu, und bei manchen von ihnen ist die Verletzbarkeit durch Erdbeben beträchtlich und damit wesentlich zu gross. Ein Grund hierfür ist vor allem die Tatsache, dass bei neuen Bauwerken wichtige Grundsätze des erdbebengerechten Entwurfs und oft auch die Erdbebenbestimmungen der Normen nicht eingehalten werden, sei es aus Unkenntnis, aus Bequemlichkeit oder aus bewusster Ignoranz. Dadurch wird das Erdbebenrisiko auf unnötige Weise laufend vergrössert.

## **Fehlende Massnahmen**

Wie steht es mit den Massnahmen gegen Naturgefahren? Die öffentliche Hand wendet pro Jahr rund 600 Millionen Schweizer Franken auf für Schutzmassnahmen gegen Naturgefahren. Das Kuchendiagramm rechts im Bild zeigt die Verteilung auf die verschiedenen Naturgefahren. Für Schutzmassnahmen gegen Erdbeben werden vergleichsweise nur verschwindend kleine Mittel eingesetzt. Im Vergleich zum Erdbebenrisiko zeigt sich ein krasses Missverhältnis. Die Defizite bei der Erdbebenvorsorge hängen wohl mit dem allgemeinen Bewusstsein zusammen. Es gibt alle paar Jahre ein Hochwasser mit Überschwemmungen, oder einen Lawinenwinter, oder einen grossen Sturm. Deshalb ist man sich dieser Naturgefahren sehr bewusst, und darum werden auch schon lange Schutzmassnahmen ergriffen. Aber nicht jede Generation erlebt ein starkes Erdbeben, und darum sind mögliche Schadenbeben in der Schweiz noch kaum im allgemeinen Bewusstsein. Wenn jedoch ein solches auftritt, ist die Wirkung enorm, und die Personen- und die Sachschäden können um Grössenordnungen gewaltiger sein als bei Überschwemmungen, Lawinen, usw.

## **Dringlicher Handlungsbedarf**

Die vorstehenden Ausführungen zeigen klar: In der Schweiz gibt es bei der Erdbebenvorsorge durch bauliche Massnahmen grosse Defizite. Es besteht ein enormer Nachholbedarf und ein entsprechend dringlicher Handlungsbedarf [D0150]. Neue Bauwerke müssen auf angemessene Weise erdbebensicher gestaltet werden, damit zu den vielen bestehenden bei Erdbeben gefährlichen Bauwerken nicht laufend noch weitere gefährliche Bauwerke hinzukommen. Die vorliegende Publikation soll dazu beitragen, das entsprechende Basiswissen zu verbreiten.

# GS 1 Enge Zusammenarbeit von Architekt und Bauingenieur beim Entwurf!

Grundsätze für den erdbebengerechten Entwurf von Hochbauten

1

Enge Zusammenarbeit von Architekt und Bauingenieur beim Entwurf!

Prof. Hugo Bachmann ibk – ETH Zürich

Bei manchen Bauherren und Architekten besteht immer noch die irrende Meinung, dass es bei der Planung eines Hochbaus genüge, den Bauingenieur erst gegen Ende des Entwurfsprozesses beizuziehen mit dem Auftrag, das Tragwerk «zu rechnen». Ein solches Vorgehen muss als falsch bezeichnet werden; es kann gravierende Folgen haben und zudem wesentliche Mehrkosten bewirken. Denn «erdbebenmässige» Fehler und Mängel beim konzeptionellen Entwurf des Tragwerks und bei der Wahl der nichttragenden Bauteile – vor allem der Zwischenwände und Fassadenbauteile – können durch eine auch noch so ausgeklügelte Berechnung und Bemessung nicht kompensiert werden.

Grundsätze für den erdbebengerechten Entwurf von Hochbauten

1/1

«Erdbebenmässige» Fehler und Mängel beim konzeptionellen Entwurf des Tragwerks und der nichttragenden Bauteile können durch eine auch noch so ausgeklügelte Berechnung und Bemessung nicht kompensiert werden!

→ Enge Zusammenarbeit von Architekt und Ingenieur bereits im frühesten Entwurfsstadium

Prof. Hugo Bachmann ibk – ETH Zürich

Für das Ergebnis des Entwurfsprozesses, für die Sicherheit und die Schadensanfälligkeit und auch für die relevanten Kosten eines Hochbaus ist es von grosser Bedeutung, dass vom frühesten Entwurfsstadium an eine enge Zusammenarbeit zwischen Architekt und Ingenieur erfolgt. Dabei vereinigen beide Partner unterschiedliche jedoch unabdingbare Fachkompetenzen. Beim Architekten betrifft dies vor allem den ästhetischen und funktionalen Entwurf,

Grundsätze für den erdbebengerechten Entwurf von Hochbauten

1/2

Falsch:  
«Nacheinander – Entwurf»

1. Architekt: Konzept für Tragwerk und nichttragende Bauteile
2. Ingenieur: Berechnung...
1. Tragwerk für Schwerelasten
2. Nichttragende Bauteile
3. Tragwerk für Erdbeben

Viel besser und kostengünstiger:  
«Miteinander – Entwurf»

- Architekt und Ingenieur entwerfen gemeinsam
- «Mehrzweck» – Tragwerk und nichttragende Bauteile

Prof. Hugo Bachmann ibk – ETH Zürich

beim Ingenieur den Entwurf und die Gestaltung eines sicheren, effizienten und kostengünstigen Tragwerks. Die Zusammenarbeit von Architekt und Ingenieur muss deshalb bei den ersten Skizzen des Entwurfs beginnen!

Falsch und auch ineffizient ist insbesondere ein «Nacheinander-Entwurf». Das heisst, es ist ausgesprochen unzweckmässig, wenn zuerst der Architekt ein Konzept für das Tragwerk entwirft und Art und Material für die nichttragenden Zwischenwände und Fassadenbauteile wählt, und erst dann der Ingenieur beigezogen wird, um eine Berechnung und Bemessung des Tragwerks durchzuführen. Falsch ist aber auch, wenn zuerst ein Tragwerk für die Schwerelasten entworfen und die nichttragenden Zwischenwände und Fassadenbauteile gewählt werden, und erst nachher im Hinblick auf die Erdbebeneinwirkung das Tragwerk sozusagen noch ergänzt wird. Denn auch dies führt oft nur zu einem teuren und trotzdem nicht befriedigenden Flickwerk.

Viel besser und insgesamt oft wesentlich kostengünstiger ist ein «Miteinander-Entwurf»: Architekt und Ingenieur entwerfen gemeinsam und unter Einbezug der relevanten Aspekte des ästhetischen und funktionalen Entwurfs ein sicheres, effizientes und kostengünstiges «Mehrzwecktragwerk» für die Schwerelasten und die Erdbebeneinwirkung, und sie wählen gemeinsam die zu diesem Tragwerk verformungsmässig passenden nichttragenden Zwischenwände und Fassadenbauteile. Mit diesem Vorgehen kann das bestmögliche Ergebnis erzielt werden. Und deshalb muss auch der Bauherr ein grosses Interesse daran haben, dass eine enge und vertrauensvolle Zusammenarbeit von Architekt und Ingenieur stattfindet, und zwar nicht erst für das «Rechnen» und bei der Detailplanung sondern bereits dann, wenn die entscheidenden Weichen bezüglich Erdbbensicherheit und Schadensanfälligkeit gestellt werden, d.h. im frühesten Entwurfsstadium.

# GS 2 Die Erdbebenbestimmungen der Normen einhalten!

Grundsätze für den erdbebengerechten Entwurf von Hochbauten

2

Bisher: SIA 160 (1989)

Neu: Swisscodes

SIA 260 Grundlagen	SIA 264 Verbundbau
SIA 261 Einwirkungen	SIA 265 Holzbau
SIA 262 Betonbau	SIA 266 Mauerwerk
SIA 263 Stahlbau	SIA 267 Geotechnik

Die Erdbebenbestimmungen der Normen einhalten!

Prof. Hugo Bachmann ibk – ETH Zürich

In der Schweiz wurden 1970 in der Norm SIA 160 erstmals Erdbebenbestimmungen erlassen, die jedoch aus heutiger Sicht völlig ungenügend waren. Angemessenere Bestimmungen für Grundlagen und Massnahmen zur Erdbebensicherung der Bauwerke erschienen dann 1989 im Artikel 4.19 der Neufassung dieser Norm [SIA 160]. Die Bestimmungen verlangen konzeptionelle und konstruktive Massnahmen sowie einfache rechnerische Nachweise (vor allem Ersatzkraftverfahren) für sämtliche Neubauten in der Schweiz, abgestuft nach der Gefährdung (Erdbebenzone und Baugrund) und der Bedeutung des Bauwerks (Bauwerksklasse). Diese und andere Tragwerksnormen werden demnächst abgelöst durch die Swisscodes, die eine Weiterentwicklung der bisherigen SIA-Normen darstellen und die Prinzipien der europäischen Normen (Eurocodes) realisieren. In den Swisscodes sind die Erdbebenbestimmungen – mit Ausnahme der Beschreibung der Einwirkungen – in die Vorschriften für die einzelnen Bauweisen integriert, d.h. sie sind dort aufgeführt, wo man sie unmittelbar benötigt. Die neuen Bestimmungen werden eine weitere Verschärfung der Anforderungen an die Erdbebensicherung der Bauwerke bringen, insbesondere für nicht duktile Tragwerke.

Leider wurden und werden auch heute noch die Erdbebenbestimmungen der Baunormen oft nicht eingehalten, sei es aus Unkenntnis, Gleichgültigkeit, Bequemlichkeit oder aufgrund schlichter Ignoranz. Zudem fehlen entsprechende behördliche und baupolizeiliche Auflagen und Kontrollen. Immer noch werden Bauwerke gebaut, die eine grosse Verletzbarkeit und somit schon bei einem relativ schwachen Erdbeben ein beträchtliches Risiko aufweisen. Untersuchungen von bestehenden Bauwerken (z.B. [La 02]) haben jedoch

gezeigt, dass das Einhalten der Normenbestimmungen die Verletzbarkeit der Bauwerke durch Erdbeben ohne oder ohne wesentliche Mehrkosten entscheidend reduziert und insbesondere eine erheblich verbesserte Einsturzsicherheit bewirkt.

Durch die Ignoranz der Erdbebenbestimmungen der Baunormen oder auch bei deren teilweiser Nichteinhaltung kann ein (auch rechtlich) minderwertiges Bauwerk resultieren [Sc 00]. Der Minderwert kann u.a. in den Kosten für eine Nachrüstung bestehen, abzüglich der Ohnehin-Kosten, die bei einem erdbebengerechten Neu- oder Umbau entstanden wären. Für die Kosten der Nachrüstung können die verantwortlichen Planer haften, nebst der Haftpflicht der Planer und der Eigentümer für getötete und verletzte Mitmenschen sowie für Sachschäden im Erdbebenfall. Eine Nachrüstung verursacht im Allgemeinen ein Vielfaches der Kosten einer fachgerechten Erdbebensicherung des Neubaus und kann zudem mit grossen Umtrieben bis hin zur temporären Räumung und Unbenutzbarkeit des betreffenden Bauwerks verbunden sein. Zur Festlegung der Haftungsanteile von Architekt und Ingenieur können zudem langwierige und aufwendige Gerichtsverfahren erforderlich sein. Es liegt daher im erklärten Interesse von Bauherr, Architekt, Ingenieur und Behörden, dass bei sämtlichen Neubauten die Erdbebenbestimmungen der Normen strikte eingehalten und die entsprechenden Nachweise und die Protokolle von Kontrollen bei den Bauakten aufbewahrt werden.



2/1 Immer noch werden Bauwerke gebaut, bei denen ein Nachweis einer genügenden Erdbebensicherheit gemäss den gültigen Normen weder durchgeführt wurde noch möglich ist. Bei diesem Gebäude aus Mauerwerk scheinen keine entsprechenden Massnahmen (z.B. aussteifende Stahlbetonwände) ergriffen worden zu sein. Eine ungenügende Erdbebensicherheit kann einen erheblichen Minderwert des Bauwerks zur Folge haben und entsprechende Haftpflichtprozesse auslösen (Schweiz 2001).



2/2 Auch Bauten mit fehlenden oder stark exzentrisch angeordneten Aussteifungen gegen horizontale Kräfte und Verschiebungen entsprechen im Allgemeinen nicht den Bestimmungen der bestehenden Normen und können deshalb bereits bei einem relativ schwachen Erdbeben Schaden nehmen oder einstürzen (Schweiz 2000).

# GS 3 Keine wesentlichen Mehrkosten dank moderner Verfahren!

Grundsätze für den erdbebengerechten Entwurf von Hochbauten

3

Kosten für die Erdbebensicherung abhängig vom

- Vorgehen bei der Planung
- Angewandten Verfahren

Keine wesentlichen Mehrkosten dank moderner Verfahren!

Prof. Hugo Bachmann ibk – ETH Zürich

Immer noch ist unter Baufachleuten die Meinung verbreitet, die Erdbebensicherung neuer Bauwerke in der Schweiz verursache wesentliche Mehrkosten; in einer Umfrage wurden zwischen 3 % und 17 % der Neubaukosten genannt. Diese Meinung trifft nicht zu. Bei der vorhandenen mässigen Seismizität kann die Erdbebensicherung neuer Gebäude oft ohne oder ohne wesentliche Mehrkosten (im Promillebereich) erreicht werden.

Der Aufwand für die Erdbebensicherung kann allerdings vom gewählten Vorgehen bei der Planung und dem angewendeten Verfahren erheblich beeinflusst werden:

- Beim Vorgehen bei der Planung ist die frühe Zusammenarbeit zwischen Architekt und Bauingenieur entscheidend (siehe Grundsatz 1). Die Erdbebensicherung muss ganz von Anfang an in den architektonischen Entwurf des Gebäudes und in den Entwurf des Tragwerks miteinbezogen werden. Wesentliche Mehrkosten können vor allem entstehen, wenn erst in einem fortgeschrittenen Planungsstadium Veränderungen und Ergänzungen des Tragwerks vorgenommen werden müssen, was oft auch Umplanungen des architektonischen Entwurfs erfordert. Das kann sehr aufwendig sein.
- Bezüglich des anzuwendenden Verfahrens ist festzustellen, dass in der letzten Zeit grosse Fortschritte erzielt worden sind. Durch eine intensive Forschung wurde das Erdbebenverhalten der Bau- und Tragwerke immer besser verstanden, und es wurden effiziente moderne Verfahren entwickelt. Im Vergleich zu älteren Verfahren kann der bauliche Aufwand für die Erdbebensicherung reduziert und/oder das Erdbebenverhalten der Bauwerke

erheblich verbessert und somit auch die Schadenanfälligkeit verringert werden. Von besonderer Bedeutung sind die duktile Bauweise und die entsprechende Methode der Kapazitätsbemessung. Damit können Elemente wie Stahlbetonwände, die zur Windsicherung oder aus funktionalen Gründen ohnehin vorgesehen sind, ohne wesentliche Mehrkosten für die Erdbebensicherung «hergerichtet» werden (z.B. modifizierte Bewehrung); zusätzliche Elemente sind dann nicht oder nur in geringerem Umfang als bei älteren Verfahren erforderlich.

Hinweise zur Anwendung moderner Verfahren und deren Vorteile können der Publikation [D0171] entnommen werden. Darin wird die Erdbebensicherung eines 7-geschossigen Geschäfts- und Wohnhauses dargestellt, und es können die resultierenden Bauwerke bei Anwendung der verformungsorientierten Kapazitätsbemessung und der konventionellen Bemessung (älteres Verfahren) miteinander verglichen werden. Die Vorteile des modernen Verfahrens bei diesem Beispiel lassen sich wie folgt zusammenfassen (siehe auch Seite 12):

- Drastische Verringerung der für den erforderlichen Tragwiderstand massgebenden Erdbebenkräfte
- Höhere Sicherheit gegen Einsturz
- Gute Beherrschung der Verformungen
- Weitgehende Verhinderung von Schäden bis zu einer wählbaren Erdbebenstärke (Schadengrenzebeben)
- Grössere Flexibilität bei Nutzungsänderungen
- Praktisch gleiche Kosten

Für den Bauherrn sind vor allem die drei letztgenannten Vorteile bedeutend. Die grössere Flexibilität bei Nutzungsänderungen resultiert vor allem daraus, dass die allermeisten Wände problemlos verändert oder ganz entfernt werden können.

Seite 14  
3/1 Ergebnisse der Erdbebenenbemessung eines 7-geschossigen Wohn- und Geschäftshauses nach verschiedenen Verfahren [D0171].

## Konventionelle Bemessung

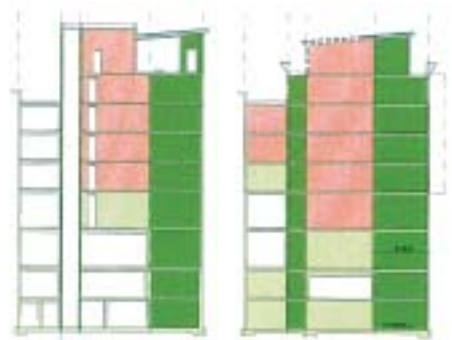
Fassade West



Schnitt C

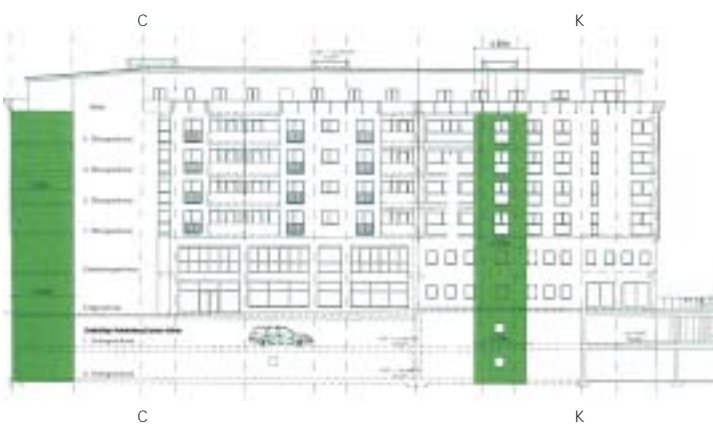
Schnitt H

- 4. Obergeschoss
- 3. Obergeschoss
- 2. Obergeschoss
- 1. Obergeschoss
- Zwischengeschoss
- Erdgeschoss
- 1. Untergeschoss
- 2. Untergeschoss



## Erdbebengerechter Entwurf und Kapazitätsbemessung

Fassade West



Schnitt C

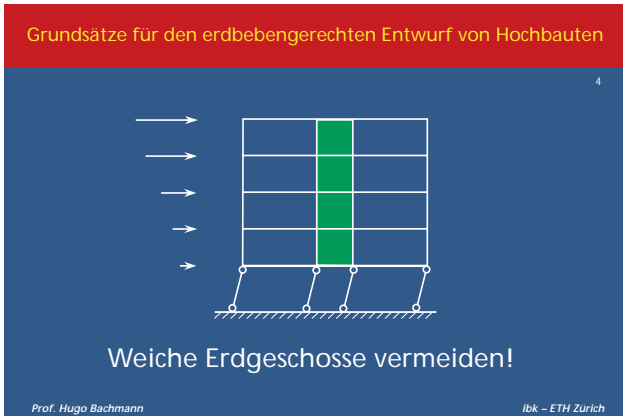
Schnitt K

- 4. Obergeschoss
- 3. Obergeschoss
- 2. Obergeschoss
- 1. Obergeschoss
- Zwischengeschoss
- Erdgeschoss
- 1. Untergeschoss
- 2. Untergeschoss



- Wände, Decken, Unterzüge und Stützen aus Stahlbeton für Schwerelasten
- Stahlbetontragwände und Stahlbetonrahmen für Erdbeben
- Tragendes Mauerwerk

# GS 4 Weiche Erdgeschosse vermeiden!



Viele Einstürze von Gebäuden unter Erdbeben sind darauf zurückzuführen, dass Aussteifungselemente, z.B. Wände, die in den Obergeschossen vorhanden sind, im Erdgeschoss weggelassen und dafür nur Stützen angeordnet werden. Dadurch entsteht ein in horizontaler Richtung weiches Erdgeschoss («Soft storey»). Die Stützen sind dann oft nicht in der Lage, die Relativverschiebungen zwischen dem sich hin und her bewegendem Boden und dem oberen Teil des Gebäudes schadlos mitzumachen. Die plastischen Verformungen («plastische Gelenke») am oberen und unteren Ende der Stützen führen zum gefürchteten sogenannten Stützenmechanismus (Stockwerksmechanismus) mit grosser Konzentration der plastischen Verformungen an den Stützenenden. Ein Einsturz ist oft unvermeidlich.



4/1 Dieser Stützenmechanismus im Erdgeschoss eines im Bau befindlichen Gebäudes führte nur ganz knapp nicht zum Einsturz (Friaul Italien 1976).



4/2 Ein Stützenmechanismus ist bei weichen Erdgeschossen oft unvermeidlich (Izmit Türkei 1999).



4/3 Hier stehen die vorderen Stützen – in ihrer schwächeren Richtung – schief, die hinteren haben ganz versagt (Izmit Türkei 1999).

Seite 16

4/4 Dieses Wohngebäude ist infolge Stützenversagen umgekippt (Taiwan 1999).







4/5 Dieses oben gut ausgesteifte Gebäude ist um das Erdgeschoss abgesackt ...



4/7 Dieses vielstöckige Gebäude ist haarscharf am Einsturz vorbeigegangen ...



4/6 ... und das sind die Überreste der Erdgeschossstütze an der linken vorderen Ecke des Gebäudes (Kobe Japan 1995).



4/8 ... dank massiven Stützen mit konstruktiv gut durchgebildeter Stabilisierungs- und Umschnürungsbewehrung (Taiwan 1999).

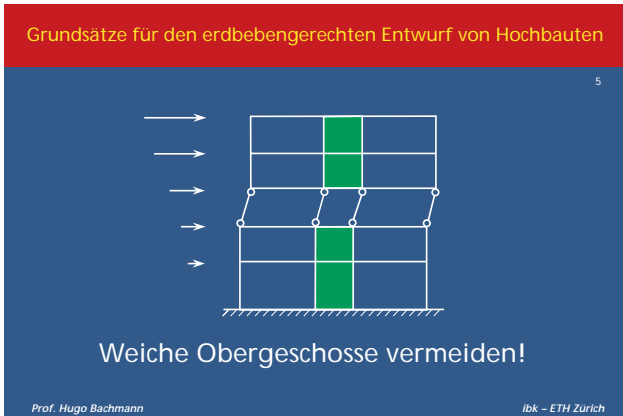


4/9 Bei solchen bestehenden Gebäuden ist zu vermuten, dass sie schon bei einem relativ schwachen Erdbeben einstürzen (Schweiz 2000).



4/10 Und auch bei diesem bestehenden Gebäude sind die innerhalb der Verkleidung sehr dünnen Stützen vermutlich zu schwach. Wenige horizontal kurze Stahlbetontraggwände könnten entscheidend helfen (Schweiz 1998).

## GS 5 Weiche Obergeschosse vermeiden!



Auch ein Obergeschoss kann im Verhältnis zu den übrigen Geschossen weich sein, sofern dort Aussteifungen gegen horizontale Kräfte und Relativverschiebungen geschwächt sind oder ganz weggelassen werden. Oder der horizontale Tragwiderstand ist ab einer bestimmten Höhe im ganzen darüber liegenden Teil eines Gebäudes stark reduziert. Die Folge kann wiederum ein gefährlicher Stützenmechanismus (Stockwerksmechanismus) sein.



5/1 In diesem Geschäftshaus ist das dritte Obergeschoss verschwunden. Der darüber liegende Teil ist um ein Stockwerk abgesackt (Kobe Japan 1995).



5/2 Auch in diesem Bürogebäude hat ein Obergeschoss versagt. Der darüber liegende Teil des Gebäudes ist abgesackt, und er hat sich dabei etwas verdreht und nach vorne geneigt.

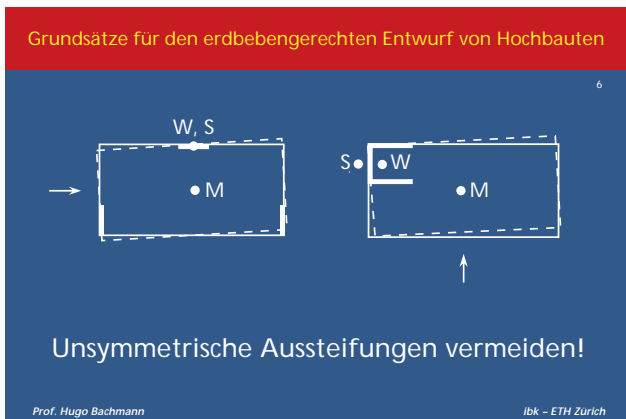


5/3 Diese Nahaufnahme zeigt das zerquetschte Obergeschoss des Bürogebäudes (Kobe Japan 1995).



5/4 Hier waren sämtliche Obergeschosse zu weich...  
(Izmit Türkei 1999).

# GS 6 Unsymmetrische Aussteifungen vermeiden!



Unsymmetrische Aussteifung ist eine häufige Ursache von Einstürzen von Gebäuden bei Erdbeben. In den beiden schematisierten Grundrissen sind nur Aussteifungselemente wie Wände oder Fachwerke gegen horizontale Kräfte und entsprechende Verschiebungen dargestellt. Nicht gezeichnet sind die meist in einem Raster angeordneten Stützen, die mit ihrer Rahmenwirkung nicht wesentlich zum Widerstand gegen horizontale Kräfte und Verschiebungen beitragen. Die Stützen müssen «nur» die Schwerelasten abtragen, sollen aber in der Lage sein, die horizontalen Verschiebungen des Gesamtsystems mitzumachen ohne ihren Tragwiderstand einzubüssen.

Jedes Gebäude hat im Grundriss ein Massenzentrum M («Schwerpunkt» aller Massen), in dem die wirkenden Trägheitskräfte angenommen werden, ein Widerstandszentrum W für horizontale Kräfte («Schwerpunkt» der Biege- bzw. Rahmenwiderstände aller vertikalen Tragelemente in Richtung der beiden Hauptachsen) und ein entsprechendes Steifigkeitszentrum S (Schubmittelpunkt). Wenn das Widerstandszentrum nicht im Massenzentrum und somit exzentrisch liegt, entsteht Torsion, und das Gebäude verdreht sich im Grundriss um das Steifigkeitszentrum. Die Verdrehung bewirkt vor allem bei den am weitesten vom Steifigkeitszentrum entfernten Stützen grosse Relativverschiebungen zwischen deren Fuss und Kopf, die oft bald zum Versagen führen. Daher muss das Widerstandszentrum im oder nahe beim Massenzentrum liegen, und es muss ein genügender Torsionswiderstand vorhanden sein. Beides wird erreicht durch eine weitgehend symmetrische Anordnung der Aussteifungen möglichst entlang der Gebäuderänder (oder jedenfalls mit beträchtlichen Abständen zum Massenzentrum).

6/1 Dieser neue Skelettbau mit Flachdecken und dünnen Schwerlaststützen weist als einzige Aussteifung gegen horizontale Kräfte und Verschiebungen einen in der Gebäudeecke platzierten und somit stark unsymmetrisch gelegenen Lift- und Treppenhauskern aus Stahlbeton auf. Es besteht eine grosse Exzentrizität zwischen Massenzentrum und Widerstands- bzw. Steifigkeitszentrum. Verdrehungen im Grundriss führen zu grossen Relativverschiebungen der vom Kern entferntesten Stützen und zu entsprechender Durchstanzgefahr. Eine entscheidende Verbesserung brächte z.B. die Anordnung von je einer horizontal kurzen und über die ganze Gebäudehöhe laufenden Stahlbetonwand in den vom Kern entferntesten Fassaden. Vom Kern müssten dann z.B. nur zwei Wände betoniert werden, und die anderen Wände könnten in Mauerwerk ausgeführt werden (Schweiz 1994).

Seite 22

6/2 Dieses Bürogebäude hatte auf der rechten hinteren Seite eine durchgehende Brandmauer und im hinteren Bereich weitere exzentrische Aussteifungen. Das Gebäude hat sich stark verdreht, dadurch haben die vorderen Stützen versagt (Kobe Japan 1995).





6/3 6/4 Dieses Wohnhaus war hinten an ein ähnliches angebaut mit gemeinsamer relativ fester und steifer Brandmauer. Die Fassade vorne ist wesentlich weicher, sodass Widerstands- und Steifigkeitszentrum im hinteren Bereich lagen. Das Haus hat sich im Grundriss erheblich verdreht, ist jedoch knapp nicht eingestürzt (Umbrien Italien 1997).



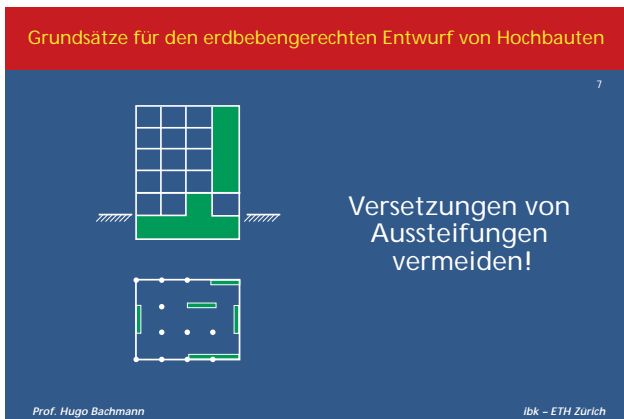
6/5 Bei diesem bestehenden Hörsaalgebäude der ETH Zürich im Campus Höggerberg befand sich im ursprünglichen Zustand aus den 70er Jahren die einzige Aussteifung gegen horizontale Kräfte und Verschiebungen in Form von torsionsweichen Stahlbetonwänden am hinteren Gebäudeende. Wegen der beträchtlichen Exzentrizität zum Zentrum der grossen Gebäudemasse hätte sich auch für das relativ schwache Bemessungsbeben (Zone 1 nach SIA 160) das Gebäude im Grundriss verdreht. Die wenigen und hoch belasteten Stahlbetonstützen im Erdgeschoss hätten vor allem im vorderen Gebäudebereich erhebliche Verschiebungen erfahren. Für die erforderliche Duktilität der Stützen war jedoch deren konstruktive Durchbildung nicht genügend. Daher wurden auf drei Seiten des Gebäudes aussen liegende Stahlstützen in Form eines Fachwerks angeordnet, dessen horizontale Scheibenkräfte infolge Erdbeben die bestehende Foundation problemlos übernehmen kann. Mit dieser Ertüchtigungsmassnahme konnte gleichzeitig auch die erforderliche Sanierung der Auskragungen für Schwerelasten vollzogen werden.



6/6 Die neuen Fachwerkstützen aus Stahlrohren fügen sich ästhetisch befriedigend in das bestehende Gebäude ein.



## GS 7 Versetzungen von Aussteifungen vermeiden!

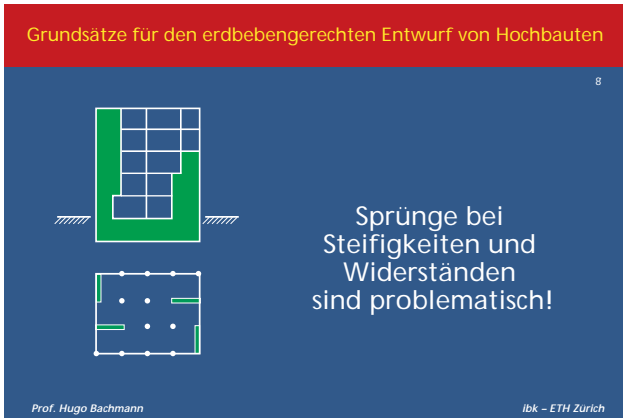


Horizontale Versetzungen von Aussteifungen in ihrer Ebene (vorne im Grundriss) oder gar aus ihrer Ebene heraus (hinten im Grundriss) entstehen durch eine unterschiedliche Lage der Aussteifungen im Aufriss und/oder Grundriss über die Höhe des Gebäudes. Bei den Versetzungen können vor allem die Biegemomente und die Querkräfte der Aussteifungen meist nicht einwandfrei übertragen werden, dies trotz wesentlichem Mehraufwand. Die Versetzungen stören den direkten Kraftfluss, schwächen den Tragwiderstand und verringern die Duktilität (plastisches Verformungsvermögen) der Aussteifungen. Darüber hinaus bewirken sie grosse zusätzliche Beanspruchungen und Verformungen auch in anderen Tragelementen (z.B. Decken, Stützen). Im Vergleich zu kontinuierlich über die ganze Gebäudehöhe laufenden und fachgerecht ausgebildeten Aussteifungen führen Versetzungen zu einer grösseren Verletzbarkeit (Schadenanfälligkeit) und meist auch zu einer wesentlichen Reduktion der Erdbebensicherheit. Versetzungen von Aussteifungen sind deshalb unbedingt zu vermeiden.



7/1 Die horizontalen Versetzungen der aussteifenden Stahlbetonwand in der Fassadenebene bewirken bei Erdbeben grosse Zusatzbeanspruchungen und entsprechende Verformungen im Tragwerk. Es sind dies z.B. hohe lokale vertikale Kräfte (aus Kippmoment), grosse zusätzliche Schubkräfte in den Decken auf der Höhe der Versetzungen, Umlagerungen der Fundationskräfte, usw. (Schweiz 2001).

# GS 8 Sprünge bei Steifigkeiten und Widerständen sind problematisch!



Veränderungen des Querschnitts von Aussteifungen über die Höhe eines Gebäudes bewirken Diskontinuitäten und führen zu Sprüngen im Verlauf der Steifigkeiten und Widerstände. Dadurch können Unregelmässigkeiten beim dynamischen Verhalten und entsprechende Zusatzbeanspruchungen sowie Probleme bei lokalen Kraftübertragungen entstehen. Eine Vergrösserung von Steifigkeiten und Widerständen von unten nach oben (links im Aufriss) ist im Allgemeinen ungünstiger als umgekehrt (rechts im Aufriss). Auf jeden Fall muss die Berechnung der Schnittkräfte und die Bemessung des Gesamtsystems wie auch die konstruktive Durchbildung der Übergänge mit grosser Sorgfalt durchgeführt werden.

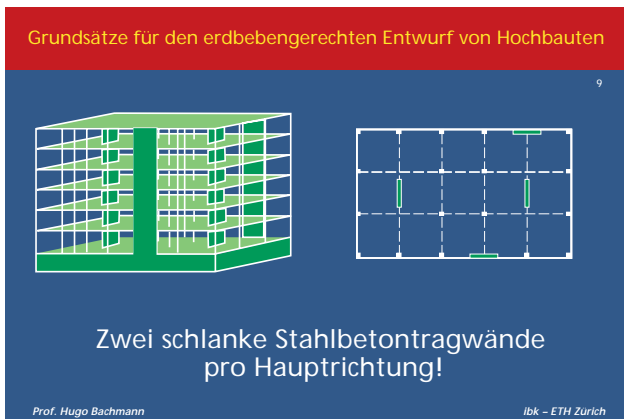


8/2 Bei Erdbebeneinwirkung bewirkt die (auskragende!) Stahlbetonwand (hinter dem Vorhang) hohe Zusatzbeanspruchungen in der ohnehin stark belasteten Stütze des Erdgeschosses (Schweiz 2001).



8/1 Der Übergang der Stahlbetontragwand in den Rahmen entspricht grossen Sprüngen bei Steifigkeiten und Widerständen (Schweiz 2001).

## GS 9 Zwei schlanke Stahlbetontragwände pro Hauptrichtung!



Zur fachgerechten Aussteifung von Skelettbauten für Erdbebeneinwirkung sind Stahlbetontragwände mit Rechteckquerschnitt bestens geeignet. Die Wände können in horizontaler Richtung relativ kurz sein – z.B. 3 bis 6 m bzw. etwa 1/3 bis 1/5 der Gebäudehöhe –, sie müssen aber über die ganze Gebäudehöhe laufen. Im Falle mässiger Seismizität mit entsprechend moderaten Bemessungsbeben wie in der Schweiz genügen pro Hauptrichtung meist zwei schlanke und durch Kapazitätsbemessung duktil gestaltete Wände. Bei der Wahl der Abmessungen (Steifigkeit) kann auch die Art der nichttragenden Elemente (Zwischenwände und Fassadenbauteile) eine Rolle spielen (vergleiche Grundsatz 14). Um Torsionseffekten zu begegnen sollten im Gebäudegrundriss die Wände mit ihrer Längsrichtung symmetrisch zum Massenzentrum und möglichst gegen die Gebäuderänder hin angeordnet werden (vergleiche Grundsatz 6). Im Hinblick auf die Abtragung der Erdbebenkräfte in den Baugrund (Foundation) sind Wände an einer Gebäudeecke eher zu vermeiden. Bei Wänden mit L-Querschnitt (Winkelwände) und solchen mit U-Querschnitt können wegen der fehlenden Symmetrie Schwierigkeiten bei der duktilen Gestaltung entstehen. Hingegen lassen sich Stahlbetonwände mit Rechteckquerschnitt (Standardbreite 30 cm) mit geringem Aufwand duktil gestalten, wodurch eine hohe Erdbebensicherheit erreicht wird [D0171].



9/1 Solche Stahlbetontragwände nehmen nur geringe Teile des Grundrisses und der Fassade in Anspruch (Schweiz 1994).



9/2 Die Bewehrung von Stahlbetontragwänden ist verhältnismässig einfach, muss aber sehr sorgfältig gestaltet und verlegt werden. Das Bild zeigt eine kapazitätsbemessene duktile Tragwand mit Rechteckquerschnitt, die in ein bestehendes Gebäude eingefügt wurde (Schweiz 1999).

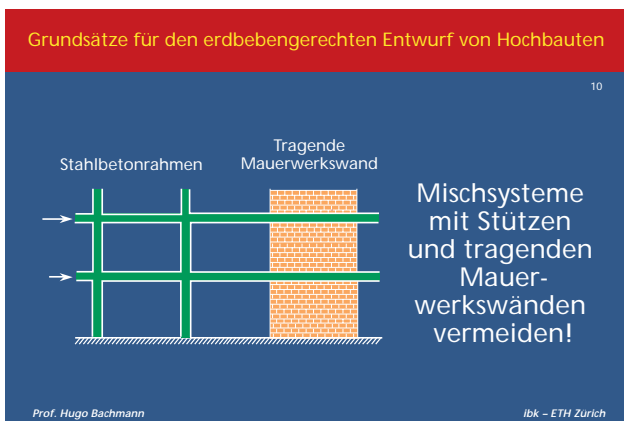


9/3 Dieser Skelettbau mit Flachdecken hat an zwei Gebäudeecken Stahlbetontragwände in Querrichtung.



9/4 Die Tragwände wurden als markantes Element in die architektonische Gestaltung miteinbezogen (Schweiz 1994).

# GS 10 Mischsysteme mit Stützen und tragenden Mauerwerkswänden vermeiden!



Gemischte Tragsysteme mit Stützen und tragenden Mauerwerkswänden verhalten sich bei Erdbeben sehr ungünstig. Die Stützen bilden zusammen mit den Decken und evtl. Unterzügen Rahmen, die für horizontale Kräfte und Verschiebungen eine wesentlich geringere Steifigkeit als die Mauerwerkswände haben. Daher werden die Erdbebenkräfte weitgehend durch die Mauerwerkswände aufgenommen. Auf die Wände wirken dann ausser den Massenträgheitskräften der eigenen Einzugsgebiete für die Schwerelasten auch die Massenträgheitskräfte der Gebäudebereiche mit den Rahmen (links im Bild); die Verhältnisse sind somit noch wesentlich ungünstiger als bei «reinen» Mauerwerksbauten. Wenn die Mauerwerkswände infolge der Erdbebenkräfte bzw. -Verschiebungen versagen, können sie auch die Schwerelasten nicht mehr abtragen, was meist zu einem Totaleinsturz des Gebäudes führt. Mischsysteme mit Stützen und tragenden Mauerwerkswänden müssen deshalb unbedingt vermieden werden.

Solche Mischsysteme erweisen sich aber auch als ungünstig weil unflexibel bei Nutzungsänderungen mit neuen Raumaufteilungen, die während der Lebensdauer eines Bauwerks immer häufiger vorkommen. Die Mauerwerkswände müssen dann durch aufwendige Abfangkonstruktionen ersetzt werden, was zu massiven betrieblichen Beeinträchtigungen und zu Kosten von mehreren Prozenten der Bausumme führen kann [D 0171]. Eine konsequente Ausbildung des

Tragwerks als Skelettbau, d.h. nur mit Stützen und ohne tragende Mauerwerkswände jedoch mit einigen wenigen horizontal kurzen und über die ganze Gebäudehöhe laufenden Stahlbetontragwänden, liegt somit auch im längerfristigen Interesse des Bauherrn. Sämtliche Wände können dann als nichttragend und deshalb mit guter Flexibilität bei Nutzungsänderungen ausgebildet werden. Umständliche Änderungen am Tragwerk sind dann nicht erforderlich.



10/1 Diese tragende Treppenhauswand wird bereits bei einem relativ schwachen Erdbeben zerstört werden. Ein Totaleinsturz des Gebäudes dürfte die Folge sein (Schweiz 2001).

# GS 11 «Ausfachen» von Rahmen durch Mauerwerk vermeiden!



Die Meinung ist immer noch weit verbreitet, dass Rahmen (aus Stützen und Decken, evtl. Unterzügen) durch das Einmauern von Mauerwerkswänden für horizontale Einwirkungen und daher auch für Erdbebenkräfte in der Rahmenebene «ausgefacht» und somit ausgesteift werden können. Dies ist aber nur für kleine Kräfte möglich, bei denen das Mauerwerk noch nicht wesentlich reißt. Für Erdbebeneinwirkung handelt es sich um eine ungünstige Kombination von zwei sehr verschiedenen Bauweisen, die schlecht zusammenpassen: Rahmen sind relativ weich jedoch mehr oder weniger duktil, Mauerwerk hingegen ist sehr steif aber zugleich spröde, es «explodiert» manchmal bereits bei kleinen Verformungen. Am Anfang eines Erdbebens nimmt das Mauerwerk fast die ganzen Erdbebenkräfte auf, aber dann versagt es auf schiefen Druck oder durch Gleiten, da die Reibung infolge meist mangelnder Auflast (Riegel) gering ist. Typisch ist auch das Auftreten von Kreuzrissen.

Grundsätzlich können zwei Fälle unterschieden werden: Entweder sind die Rahmenstützen stärker als das Mauerwerk, oder umgekehrt. Bei stärkeren Stützen wird das Mauerwerk gänzlich zerstört und fällt heraus. Bei schwächeren Stützen hingegen kann das Mauerwerk die Stützen beschädigen und vor allem abscheren, was oft zum Einsturz führt (vergleiche auch Grundsätze 16 und 17).



11/1 Hier waren die Stützen eindeutig stärker: Das Mauerwerk ist weitgehend herausgefallen, der Rahmen ist jedoch stehen geblieben (Erzincan Türkei 1992).

Seite 30

11/2 In diesem Fall war das Mauerwerk stärker: Die Stützen wurden erheblich beschädigt und teilweise ganz abgeschert; trotzdem ist der Rahmen knapp stehen geblieben (Mexico 1985).





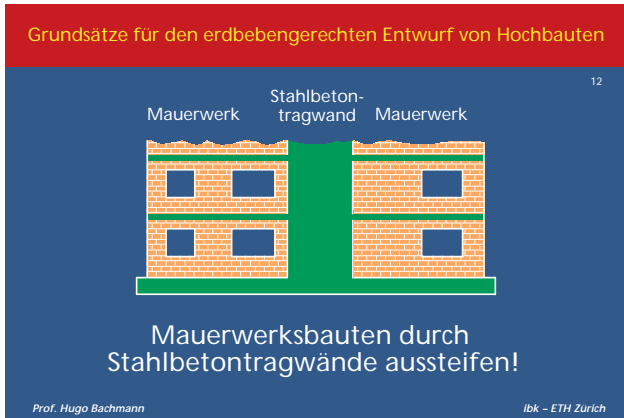
11/3 Auch hier war das Mauerwerk stärker; es hat die relativ massiven Stützen abgeschert (Adana-Ceyhan Türkei 1998).



11/4 Das sind typische Kreuzrisse in Mauerwerkswänden, die in massive Stahlbetonrahmen eingefügt wurden (Izmit Türkei 1999).



# GS 12 Mauerwerksbauten durch Stahlbetontragwände aussteifen!



Traditionsgemäss werden in der Schweiz vor allem Wohnhäuser und auch kleinere Gewerbebauten oft mit unbewehrten tragenden Mauerwerkswänden aus Backsteinen, Kalksandsteinen oder Zementsteinen ausgeführt. Es gibt solche Bauten mit bis zu 16 Stockwerken (!). Mauerwerk ist ein in bauphysikalischer Hinsicht (Wärmedämmung und -speicherung, Behaglichkeit) und zur Aufnahme von Schwerelasten gut geeigneter Baustoff. Für Erdbebeneinwirkung hingegen sind Mauerwerksbauten wenig geeignet. Einerseits sind sie relativ steif, sie haben meist eine hohe Eigenfrequenz – im Plateaubereich des Bemessungsantwortspektrums der Beschleunigung – und erfahren entsprechend grosse Erdbebenkräfte. Andererseits sind unbewehrte Mauerwerkswände ziemlich spröde und zeigen eine verhältnismässig geringe Energiedissipation. Da bei solchen Mauerwerksbauten auch für moderate Erdbebeneinwirkung (z.B. Zone 1 nach SIA 160) im Allgemeinen kein normgemässer Nachweis einer genügenden Erdbebensicherheit möglich ist, sind zusätzliche Massnahmen erforderlich.

Eine Möglichkeit besteht darin, unbewehrte Mauerwerksbauten durch kragarmförmige Stahlbetontragwände auszusteifen. Hiermit können vor allem die horizontalen Verformungen des Mauerwerks begrenzt und dadurch der Tragwiderstand für vertikale Lasten erhalten werden. Die Stahlbetontragwände müssen genügend steif gestaltet werden; massgebend sind die (horizontale) Wandlänge und der Vertikalbewehrungsgehalt. Die Wände müssen ihren Anteil an der Erdbebeneinwirkung im Allgemeinen «elastisch», d.h. ohne wesentliches Fliessen der Bewehrung, aufnehmen und in die Fundation ableiten können. Die horizontalen Verschiebungen der Stahlbetontragwände unter dem Bemessungsbeben dürfen die Bruchverschiebungen der steifsten, d.h. längsten Mauerwerkswände nicht überschreiten.



12/1 Solche – und auch niedrigere! – neue Mauerwerksbauten sind ohne aussteifende Stahlbetontragwände durch Erdbeben extrem verletzbar (Schweiz 2001).



12/2 Dieses neue 3-stöckige Einfamilienhaus mit tragenden unbewehrten Mauerwerkswänden wird in Längsrichtung durch je eine Stahlbetontragwand in den Fassaden und in Querrichtung durch eine Stahlbetontragwand im Gebäudeinnern ausgesteift (Schweiz 2001).



12/3 Dieser schliesslich 4-stöckige neue Mauerwerksbau wird in beiden Hauptrichtungen durch je eine Stahlbetontragwand ausgesteift. Zudem wird je eine lange Mauerwerkswand mit Lagerfugenbewehrung versehen und diese in den Stahlbetontragwänden verankert (Schweiz 2001).

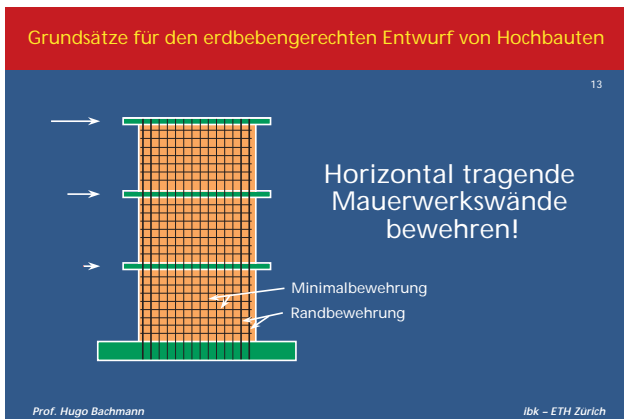


12/4 Tragende Mauerwerkswände, Stahlbetontragwände und Decken müssen druck- und schubfest sowie möglichst auch zugfest zusammenwirken (Schweiz 2001).



12/5 Deshalb sollen tragende Mauerwerkswände und Stahlbetontragwände mit sattgefüllten Mörtelfugen gestossen werden (Schweiz 2001).

# GS 13 Horizontal tragende Mauerwerkswände bewehren!



Eine zu Grundsatz 12 alternative Möglichkeit, Mauerwerksbauten für Erdbebeneinwirkung wesentlich geeigneter zu machen, ist das Bewehren von einigen in Längsrichtung steifen d.h. (horizontal) langen Mauerwerkswänden. In diesen müssen beispielsweise eine vertikale und horizontale Minimalbewehrung und eine verstärkte vertikale Randbewehrung angeordnet werden [Ba 02]. Dadurch kann Gleiten in den Lagerfugen verhindert und eine gewisse Verschiebeduktilität bis  $\mu_{\Delta} \approx 2$  erreicht werden. Die bewehrten Wände können deshalb als «Horizontal tragende Mauerwerkswände» bezeichnet werden. Die horizontalen Verschiebungen der bewehrten Mauerwerkswände in ihrer Ebene unter dem Bemessungsbeben dürfen die Bruchverschiebungen der steifsten d.h. längsten unbewehrten Mauerwerkswände nicht überschreiten, sodass deren Tragwiderstand für vertikale Lasten erhalten bleibt.



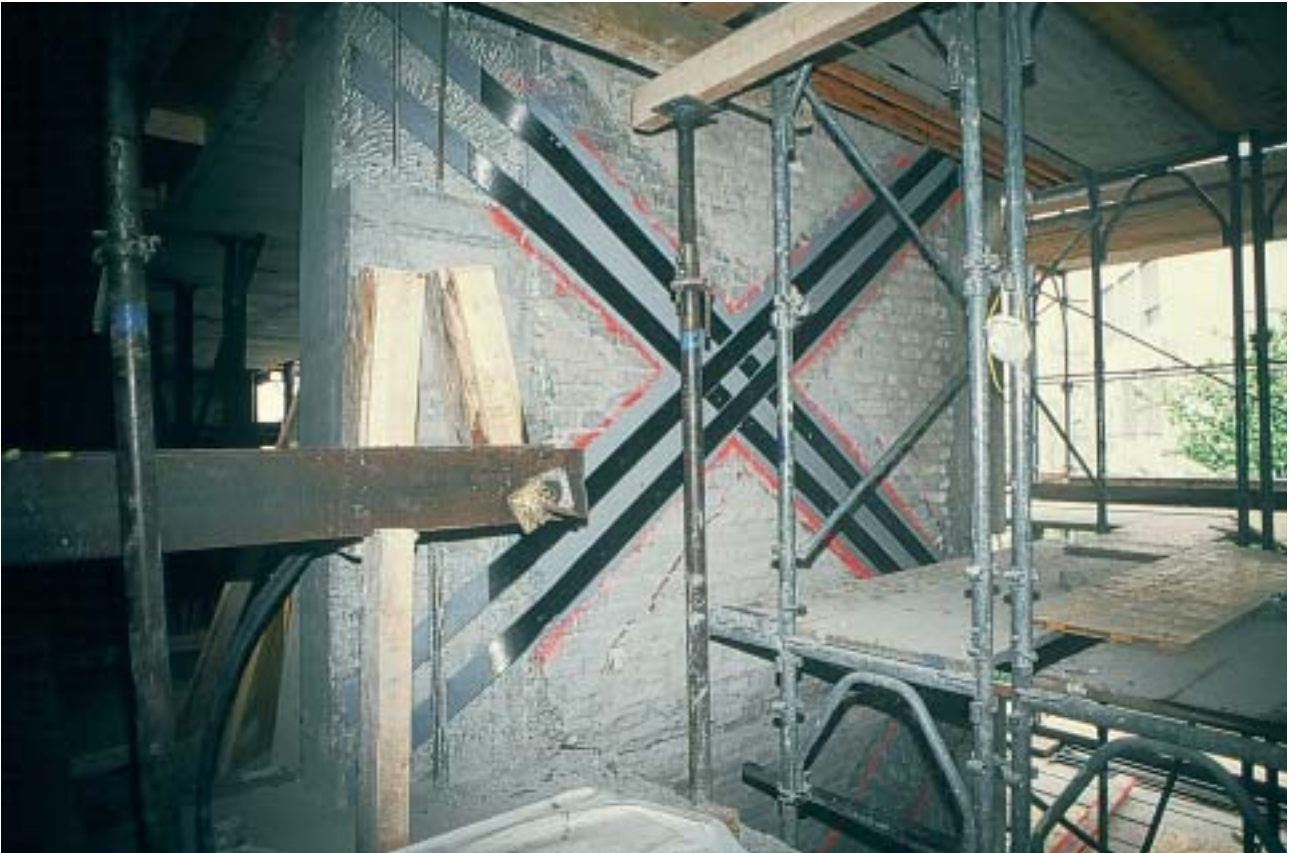
13/1 13/2 Bewehrtes Mauerwerk erfordert besondere Mauersteine vor allem für das Einbringen und Vermörteln der vertikalen Bewehrungsstäbe. Weltweit sind Entwicklungen für Bewehrungssysteme und entsprechende Mauersteine im Gange. Die beiden Bilder zeigen Neuentwicklungen der Ziegelindustrie (Schweiz 1998).



13/3 Bei dieser Bewehrungsart reichen die vertikalen Schlaufen oben und unten in zwei Steinschichten hinein. Wichtig sind immer auch die Anschlusseisen zur Einspannung der Wände in den Decken bzw. in den unteren Wänden (Schweiz 1998).



13/4 13/5 Auch eine vertikale Vorspannung kann durch die eingebrachte Normalkraft das Erdbebenverhalten von Mauerwerkswänden wesentlich verbessern (Schweiz 1996).



13/6 Festigkeit und Duktilität von Mauerwerkswänden bestehender Bauten können durch Lamellen aus Kohlefasern oder aus Stahl verbessert werden.



13/7 Die Lamellen müssen sorgfältig aufgeklebt und in den Geschossdecken verankert werden (Schweiz 1997).

Seite 37

13/8 Bei Giebelwänden (Kragarme) und bei anderen in horizontaler Richtung kaum gehaltenen Mauerwerkswänden sowie für stärkere Erdbeben eventuell auch bei Wänden mit aufliegenden Decken müssen die Beanspruchungen quer zur Wandebene ebenfalls betrachtet werden. Hier versagten die Wände im oberen Stockwerk mit geringer Normalkraft durch die «Aus-der-Ebene»-Beanspruchung (Loma Prieta 1989). Eine Bewehrung, eine vertikale Vorspannung oder aufgeklebte Lamellen können auch solches verhindern.



# GS 14 Tragwerk und nichttragende Bauteile aufeinander abstimmen!



Werden verformungsempfindliche nichttragende Zwischenwände und Fassadenbauteile (z.B. aus Mauerwerk) in ein horizontal weiches Tragwerk (z.B. Rahmen) fugenlos eingebaut, so können bereits bei relativ schwachen Erdbeben erhebliche Schäden entstehen. Erfahrungen haben gezeigt, dass in solchen Fällen ein Gebäude unter Umständen abgebrochen werden muss, obwohl das Tragwerk keine oder keine wesentlichen Schäden erlitten hat. Eine moderne Erdbebensicherung wird deshalb die Steifigkeit des Tragwerks und die Verformungsempfindlichkeit der nichttragenden Zwischenwände und Fassadenbauteile aufeinander abstimmen. Entscheidend sind die Stockwerksschiefe des Tragwerks, d.h. das Verhältnis der Stockwerksverschiebung  $d$  zur Stockwerkshöhe  $h$ , und die Schadenanfälligkeit der nichttragenden Bauteile in Abhängigkeit von der Stockwerksschiefe. Bei geschickter Wahl bzw. Kombination von Tragwerk und nichttragenden Bauteilen können Schäden bis zu relativ starken Erdbeben verhindert werden.



14/1 Hier wurden die nichttragenden Zwischenwände zerstört, obschon sich das Rahmentragwerk nur wenig verformt hat und kaum Schäden aufweist, und obwohl sogar die Fenster intakt geblieben sind (Armenien 1988).



14/2 Und hier wird eine zerstörte Zwischenwand einfach wieder aufgemauert – bis zum nächsten Erdbeben ... (Adana-Ceyhan Türkei 1998).

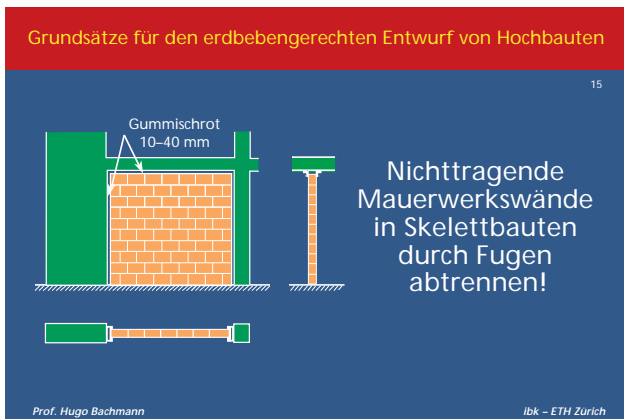
Seite 39

14/3 Die Glasfassade des neuen Hochhauses hat ein starkes Erdbeben nahezu schadlos überstanden, dank speziellen nachgiebigen Befestigungselementen für die Fassadenbauteile (Kobe Japan 1995).





# GS 15 Nichttragende Mauerwerkswände in Skelettbauten durch Fugen abtrennen!



In nicht sehr steifen Skelettbauten kann es zweckmässig sein, nichttragende Zwischenwände – insbesondere in ihrer Ebene steife und spröde Mauerwerkswände – durch weiche Fugen vom Tragwerk abzutrennen. Damit kann vermieden werden, dass schon bei relativ schwachen Erdbeben Schäden entstehen. Die Fugen sind entlang von Stützen, Tragwänden und Decken anzuordnen, und sie müssen durch einen sehr nachgiebigen, jedoch zugleich möglichst schallhemmenden Stoff gefüllt werden, z.B. durch Platten aus Gummischrot; Hartschaumstoffe, Kork, usw. sind im Allgemeinen zu steif. Die erforderliche Fugendicke von typischerweise 20 bis 40 mm hängt von der Steifigkeit des Tragwerks und der Verformungsempfindlichkeit der Zwischenwände sowie vom gewählten Schutzniveau (Schadengrenzebeben < Bemessungsbeben) ab [D0171]. Im Allgemeinen müssen die Zwischenwände auch gegen Querbeschleunigungen (Plattenwirkung) gesichert werden, z.B. durch Haltewinkel.



15/1 Hier wurde zwischen der Mauerwerkswand und der Stahlbetonstütze eine – wohl wesentlich zu dünne – vertikale Fuge angeordnet (Schweiz 1994).

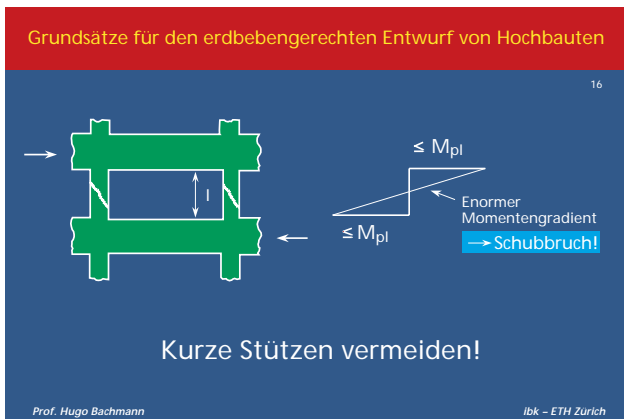


15/2 Die Dicke der Fugen – hier eine horizontale Fuge zwischen der Mauerwerkswand und der Decke – und die Dimensionen der Befestigungen von Haltewinkeln (Schrauben) müssen auf die Verformungen des Tragwerks und die Beanspruchungen beim gewählten Schutzniveau (Stärke des Schädengrenzebebens) abgestimmt werden (Schweiz 1994).



15/3 Diese Fuge zwischen der Mauerwerkswand und einer Stahlbetontragwand wurde durch Hartschaumplatten gefüllt. Hartschaumstoff ist für Erdbebenverschiebungen jedoch zu steif; ein besser geeignetes Material ist z.B. Gummischrot (Schweiz 1994).

## GS 16 Kurze Stützen vermeiden!



Das Schubversagen von sogenannten kurzen Stützen bildet eine häufige Einsturzursache von Gebäuden bei Erdbeben. Es handelt sich um gedrungene d.h. im Verhältnis zu ihrer Höhe dicke Stützen, die oft in starken Riegeln eingespannt sind oder durch die nachträgliche Anordnung von Brüstungen entstehen («unplanmässig verkürzte Stützen»).

Stützen in Rahmen können an den Enden maximal bis zu ihrem plastischen Moment (Fließ- bzw. Bruchmoment) beansprucht werden. Bei kurzen Stützen mit beträchtlicher Biegekapazität ergibt sich ein enormer Momentengradient und somit eine grosse Querkraft, die oft schon vor dem Erreichen des plastischen Moments zu einem Schubbruch führt. Kurze Stützen sollten deshalb vermieden werden. Eine Alternative dazu ist eine Gestaltung der Stützen gemäss den Regeln der Kapazitätsbemessung, wobei die Querkraft entsprechend der Überfestigkeit der Vertikalbewehrung vergrössert werden muss [Ba 02] [PP 92].



16/1 Die Kreuzrisse und Schubbrüche in den kurzen Stützen eines Parkhauses haben beinahe einen Einsturz bewirkt (Northridge Kalifornien 1994).



16/2 Hier wirkten die Mauerwerkspfeiler im Erdgeschoss eines Restaurants als kurze gedrungene Stützen. Sie wurden durch Schrägrisse stark beschädigt (Umbrien Italien 1997).



16/3 Auch dieser Schubbruch in der kurzen Eckstütze im Erdgeschoss eines Geschäftshauses hat nur knapp nicht zum Einsturz geführt (Erzican Türkei 1992).

# GS 17 Brüstungen in Rahmen vermeiden!



Das fugenlose Einfügen von Brüstungen in ein Rahmen-tragwerk kann das Phänomen der kurzen Stützen bewirken (siehe vorstehender Grundsatz). Es entsteht ein Schubbruch oder – bei genügender Schubfestigkeit – ein Stützenmechanismus mit unter Umständen beträchtlichen Effekten 2. Ordnung (N- $\Delta$ -Effekt).



17/2 Links neben der zerstörten Stütze befand sich eine analoge Fensteröffnung wie links aussen im Bild. Der – bereits abgebrochene – Mauerwerksteil unter den Fensteröffnungen wirkte wie eine eingefügte Brüstung. Diese bewegte sich nach rechts, stieß gegen die Stütze und scherte sie ab.



17/1 Hier führte das Einfügen von Brüstungen in einen Rahmen zum Phänomen der kurzen Stützen. Dank der guten Verbügelung entstand jedoch kein eigentlicher Schubbruch sondern ein ebenso gefährlicher Stützenmechanismus (Friauf Italien 1976).



17/3 Vermutlich hätte eine bessere Querbewehrung der Stütze (Bügel und Verbindungsstäbe in engen Abständen) den Schubbruch verhindert. Das «Grundübel» war jedoch das durch die Brüstung bewirkte Phänomen der kurzen Stützen (Izmit Türkei 1999).



17/4 Auch hier bewirkte das Einfügen von Mauerwerkswänden mit Fensterbändern hohe Zusatzbeanspruchungen und den Bruch von Rahmenstützen. Die massive Ausbildung und das relativ gute Verhalten der Stütze rechts im Bild hat dazu beigetragen, dass das Bauwerk knapp nicht eingestürzt ist.

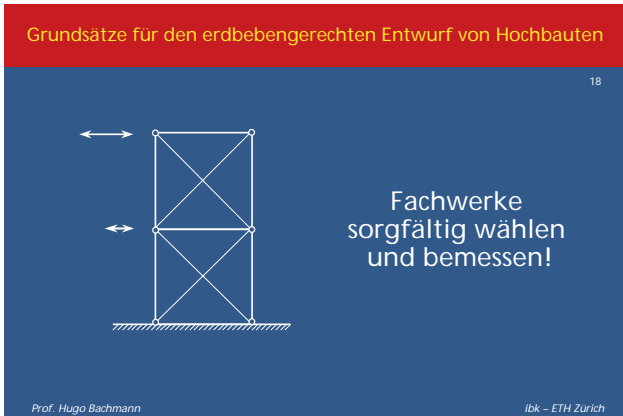


17/5 Die Stützen wiesen eine mangelhafte konstruktive Durchbildung auf (Bügel mit 90°- anstatt 135°-Haken und mit entsprechendem Verankerungsbruch, vergleiche Grundsatz 25). Ohne die ungünstige Wirkung der eingefügten Wände hätte sich diese Stütze aber viel besser verhalten (Izmit Türkei 1999).



17/6 Eine Möglichkeit, die ungünstige Wirkung von Brüstungen in Rahmen zu vermeiden oder stark zu reduzieren, ist die Anordnung von Fugen zwischen Brüstung und Stützen. Die Fuge hier ist grundsätzlich zweckmässig ausgebildet, da sie durch eine weiche und daher stark zusammendrückbare Steinwolleplatte gefüllt ist. Die Fugenbreite erlaubt jedoch nur eine zwangungsfreie Stützenschiefstellung von ~ 1 % (Schweiz 2001).

# GS 18 Fachwerke sorgfältig wählen und bemessen!



18/1 Diagonalstäbe mit Breitflanschquerschnitt sind um ihre schwache Achse geknickt ...

Zur Aussteifung von Hochbauten – vor allem Industriebauten – können auch Stahlfachwerke angeordnet werden. Solche müssen jedoch sehr sorgfältig gewählt und bemessen werden. Denn übliche Fachwerke mit zentrischen Anschlüssen in den Knoten und mit schlanken Diagonalstäben können bei zyklischer Beanspruchung ein sehr ungünstiges Verhalten zeigen: Die Diagonalstäbe fließen unter Zug und werden immer länger, und sie knicken unter Druck. Bei der Hin- und Herbewegung ist daher beim Nulldurchgang die Steifigkeit nur noch klein, und dynamische Effekte können zu einem baldigen Versagen beitragen. Solche Fachwerke sollen deshalb nur für elastisches Verhalten oder allenfalls sehr niedrige Duktilität bemessen werden. Zusätzlich ist die Kompatibilität der Verformungen der Fachwerke mit denjenigen anderer tragender und nichttragender Bauteile zu überprüfen, was zur Anordnung steiferer Fachwerke oder andersartiger Aussteifungen (Wände) führen kann. Wesentlich besser als Fachwerke mit zentrischen Anschlüssen und schlanken Stäben verhalten sich Fachwerke mit exzentrischen Anschlüssen und gedrunenen Stäben [Ba 02].



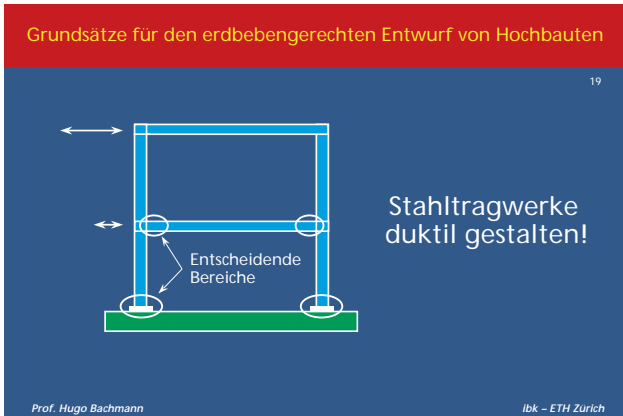
18/2 ... und gebrochen (Kobe Japan 1995).



18/3 Auch diese fachwerkartige Tragkonstruktion zeigte Stabilitätsversagen von Stäben und zahlreiche lokale Schäden (Kobe Japan 1995).



# GS 19 Stahltragwerke duktil gestalten!



Der Baustoff Stahl an und für sich weist im Allgemeinen ein gutes plastisches Verformungsvermögen (Dehnungsduktilität) auf. Trotzdem können Bauteile und ganze Tragwerke aus Stahl bei zyklischer Beanspruchung ein wenig duktiler oder sogar sprödes Verhalten zeigen, vor allem infolge von lokalen Instabilitäten und Brüchen. Beispielsweise können breite Flanschen von Stützen und Trägern in plastischen Bereichen beulen oder in und bei Schweissnähten versagen. Daher müssen beim konzeptionellen Entwurf, bei der Wahl der Stabquerschnitte («Querschnittsklassen») und bei massgebenden Details bestimmte Anforderungen erfüllt, Regeln eingehalten und eventuell weitere Massnahmen ergriffen werden [Ba 02] [EC 8].



19/1 Dieser Stahlrahmen erlitt grosse verbleibende Verformungen. Vermutlich waren keine weiteren Aussteifungen vorhanden, und die Ausbildung der Knoten für zyklische Beanspruchung war mangelhaft (Kobe Japan 1995).



19/2 Hier versagten die Schrauben in der Verbindung des Trägers zur Stütze (Kobe Japan 1995).



19/3 Dieses Bild zeigt einen Bruch in einem typischen Rahmenknoten; es versagte die geschweisste Verbindung zwischen der Stütze und dem Träger durch einen breiten Riss (Kobe Japan 1995).

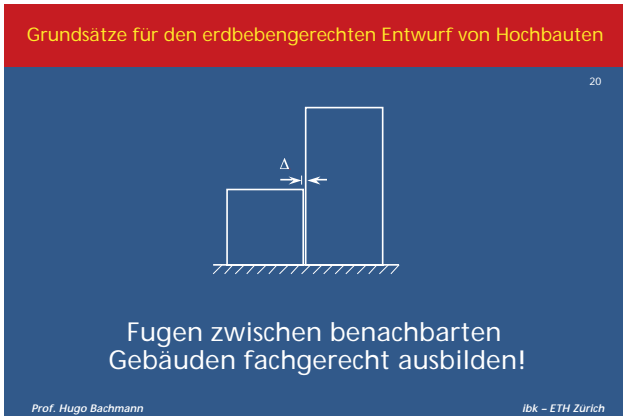


19/5 19/6 Am Fuss der Stütze eines Hauptrahmens in einem Hochhaus aus Stahl bildete sich ein breiter Riss (rechts im oberen Bild). Als Ursache wurden hohe zyklische Normalkräfte, Auswirkungen der Dehngeschwindigkeit, Materialfehler, Schweißfehler und Temperaturwirkungen in Betracht gezogen (Kobe Japan 1995).



19/4 Am Fuss der Stütze eines 3-stöckigen Rahmens erfolgte ein lokales Ausbeulen des Kastenquerschnitts; dabei wurde die weisse Farbe abgesprengt (Kobe Japan 1995).

# GS 20 Fugen zwischen benachbarten Gebäuden fachgerecht ausbilden!



Durch den Zusammenprall (pounding) und das Gegen-einanderhämmern (hammering) benachbarter Gebäude können erhebliche Schäden und oft auch Einstürze bewirkt werden. Einsturzgefahr besteht vor allem dann, wenn Geschossdecken der benachbarten Gebäude auf unterschiedlicher Höhe liegen und gegen Stützen prallen können. In solchen Fällen müssen die Fugen fachgerecht ausgebildet werden, das heisst:

- 1) Die Fugen müssen eine gewisse Mindestbreite haben (Angaben in Normen)
- 2) Die Fugen müssen leer sein und dürfen keine Kontaktbrücken aufweisen

Um das freie Schwingen benachbarter Gebäude zu ermöglichen und den Anprall zu vermeiden, ist oft eine erhebliche Fugenbreite erforderlich. Sofern die Tragelemente beim Anprall ihren Tragwiderstand nicht verlieren, sind auch andere Lösungen möglich [EC 8].



20/1 Bei dieser Fuge zwischen zwei ähnlichen Gebäuden mit Geschossdecken auf gleicher Höhe bewirkte der Zusammenprall Schäden in den Fassaden sowie Abplatzungen usw. am Tragwerk (Mexico 1985).



20/2 An diesen beiden sehr unterschiedlichen Gebäuden entstanden durch den Zusammenprall erhebliche Schäden (Mexico 1985).

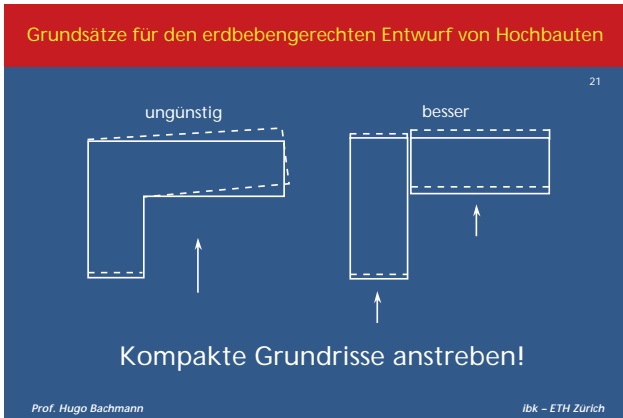


20/3 Das moderne Stahlbetongebäude links wurde durch den Zusammenprall mit dem älteren sehr steifen Gebäude rechts zum Einsturz gebracht (Mexico 1985).



20/4 Das eingestürzte Gebäude war eine Erweiterung des älteren Gebäudes links, aber ohne genügende Fugenbreite oder – alternativ – eine feste Verbindung zu diesem. Beim Erdbeben prallte das ältere Gebäude gegen das neue und brachte es zum Einsturz (Kobe Japan 1995).

# GS 21 Kompakte Grundrisse anstreben!



Bei der Gestaltung von Gebäudegrundrissen sollte man sich das dynamische Verhalten der Baukörper möglichst konkret vorstellen. Im L-förmigen und somit stark aufgelösten Grundriss des dargestellten Beispiels sind die Steifigkeiten des linken und des rechten Gebäudeflügels für eine horizontale Erdbebeneinwirkung in einer Hauptrichtung sehr verschieden. Die beiden Flügel möchten daher stark verschieden schwingen, doch behindern sie sich gegenseitig. Dies führt vor allem im Eckbereich in den Deckenscheiben und an den Flügelenden im ganzen Tragwerk zu grossen Zusatzbeanspruchungen und entsprechenden, oft sehr aufwendigen Massnahmen. Dies kann verhindert werden bei Auftrennung der beiden Gebäudeflügel durch eine fachgerecht ausgebildete Fuge. Es entstehen dann zwei rechteckige und somit je für sich sehr kompakte Grundrisse bzw. Baukörper, die beide ein ungehindertes «dynamisches Eigenleben» führen können.


21/1 Solche rechtwinklig zueinander stehende Gebäudeflügel sollten durch eine genügend breite und sehr weiche, flexible Fuge getrennt werden, damit sie unabhängig voneinander schwingen können (Schweiz 2001).

## GS 22 Durch die Deckenscheiben den Zusammenhalt sichern und die Kräfte verteilen!


Grundsätze für den erdbebengerechten Entwurf von Hochbauten

22

ungünstig



besser



Durch die Deckenscheiben den Zusammenhalt sichern und die Kräfte verteilen!

Prof. Hugo Bachmann

ibk – ETH Zürich

In mehrstöckigen Gebäuden müssen die Geschossdecken als praktisch starre Scheiben wirken können. Und sie müssen mit sämtlichen vertikalen Tragelementen schubfest verbunden sein, um den «Querschnitt des Kragarmstabes» zu erhalten (Diaphragmawirkung). Die Decken haben somit den Zusammenhalt in horizontaler Richtung zu sichern und die Erdbebenkräfte und -verschiebungen auf die vertikalen Tragelemente entsprechend deren Steifigkeiten zu verteilen. Ungenügend sind z.B. Decken aus vorfabrizierten Elementen ohne gut haftenden und bewehrten Überbeton. Viel besser sind monolithische Decken aus Stahlbeton, in denen wenn nötig verstärkte Randbewehrungen angeordnet sind.

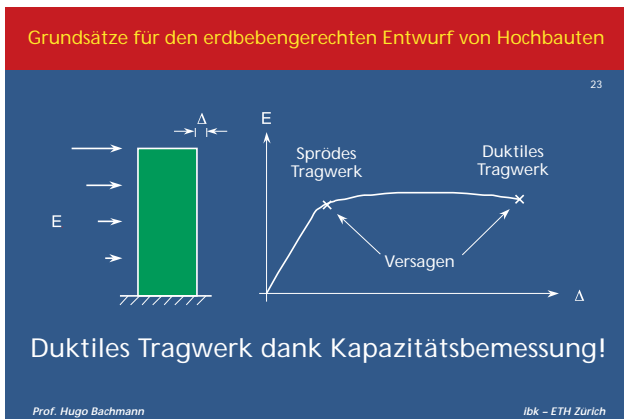


22/1 Bei diesem Gebäude ist ein Eckbereich eingestürzt. Die Decken bestanden nur aus vorfabrizierten Elementen ohne bewehrten Überbeton und ohne bewehrte Verbindungen zu den vertikalen Tragelementen (Armenien 1988).



22/2 22/3 Auch bei diesen Wohnhäusern bestanden die Decken nur aus vorgefertigten Platten, die unter sich und mit den Wänden ungenügend verbunden waren (Armenien 1988).

# GS 23 Duktile Tragwerk dank Kapazitätsbemessung!



Duktile, d.h. im plastischen Beanspruchungsbereich stark verformungsfähige Tragwerke bieten gegenüber analogen spröden Tragwerken meist wesentliche Vorteile. Vor allem kann der erforderliche Tragwiderstand reduziert werden, was erhebliche Einsparungen bringt, und die Sicherheit gegen Einsturz wird meist wesentlich erhöht. Deshalb soll das Tragwerk eines Hochbaus wenn immer möglich duktil gestaltet werden. Dies ist auch zweckmässig im Extremfall, wo der Tragwiderstand aus anderen Gründen so gross ist, dass das Bemessungsbeben «elastisch» überstanden werden kann; denn tatsächliche Erdbeben «haben die Normen nicht gelesen» (nach T. Paulay) und können auch wesentlich stärker als das Bemessungsbeben sein.

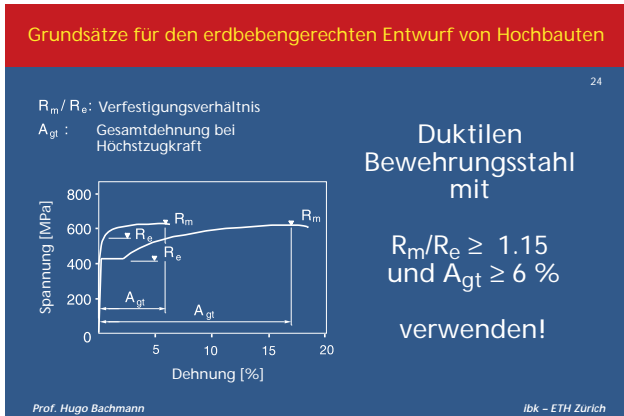
Für eine duktile Gestaltung des Tragwerks bietet die Methode der Kapazitätsbemessung ein einfaches und effizientes Verfahren: Man «sagt» dem Tragwerk ganz genau, wo es plastifizieren darf und soll und muss, und wo nicht. Damit wird ein günstiger plastischer Mechanismus bewirkt. Durch eine fachgerechte Kapazitätsbemessung kann ein hoher und gut bekannter Schutzgrad gegen Einsturz erreicht werden [PP 92] [Ba 02].



23/1 Statisch-zyklische Versuche am unteren Teil von 6-stöckigen Stahlbetontragwänden im Massstab 1:2 haben die Wirksamkeit einer duktilen Gestaltung auf eindrückliche Weise demonstriert [Da 99]. Mit kapazitätsbemessenen Wänden wurde im Vergleich zu konventionell d.h. nach der SIA-Norm 162 bemessenen Wänden ohne nennenswerten Mehraufwand eine rund 3 bis 4 mal grössere Erdbbensicherheit erreicht.



# GS 24 Duktilen Bewehrungsstahl mit $R_m/R_e \geq 1.15$ und $A_{gt} \geq 6\%$ verwenden!



In Stahlbetontragwerken muss der Bewehrungsstahl so beschaffen sein, dass sich genügend grosse und verformungsfähige plastische Bereiche entwickeln können. Im Hinblick darauf gibt es beim Bewehrungsstahl zwei entscheidende Parameter (Duktilitätseigenschaften):

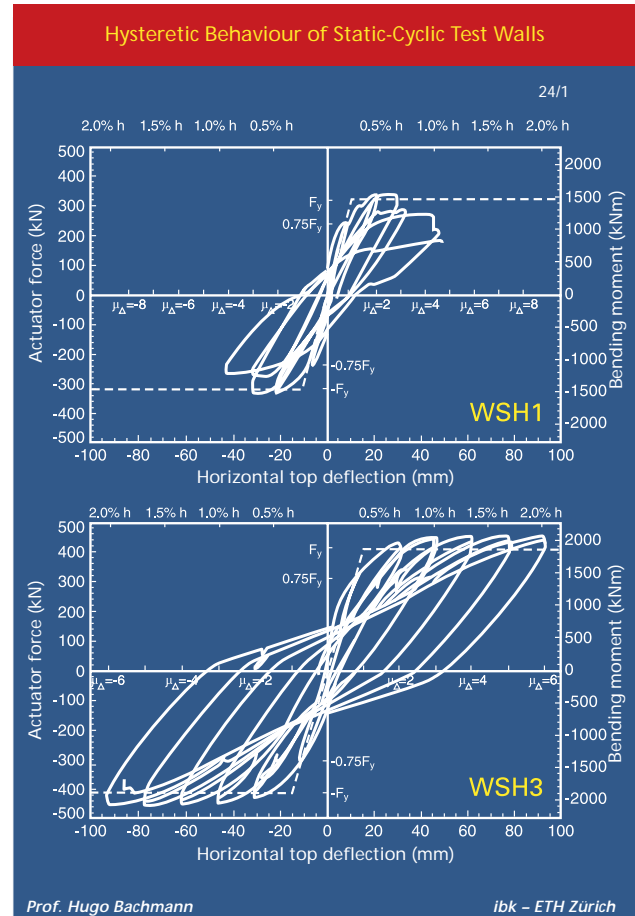
- Verfestigungsverhältnis  $R_m/R_e$ , d.h. das Verhältnis der Zugfestigkeit  $R_m$  zur Fließgrenze  $R_e$
- Gesamtdehnung bei Höchstzugkraft  $A_{gt}$

Das Verfestigungsverhältnis ist auch von grosser Bedeutung für das Ausknicken gedrückter Bewehrungsstäbe. Je kleiner  $R_m/R_e$ , desto früher knicken die Stäbe aus [TD 01].

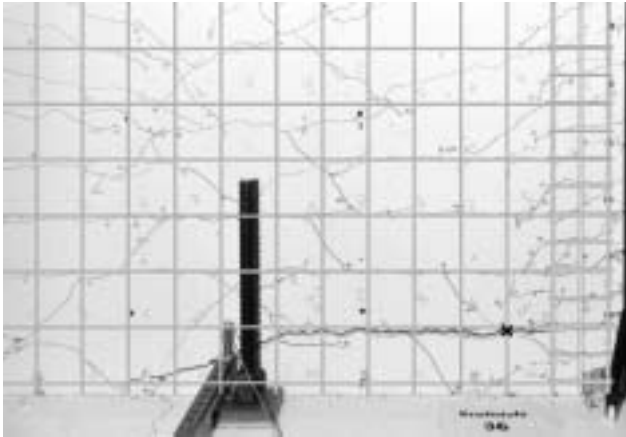
In Europa hat ein grosser Teil des auf dem Markt erhältlichen Bewehrungsstahls – vor allem bei kleineren Stabdurchmessern bis 16 mm – ungenügende Duktilitätseigenschaften [BW 98]. Um eine «mittlere» Duktilität der Tragwerke erreichen zu können muss – nebst anderen Massnahmen – der Bewehrungsstahl mindestens die folgenden Anforderungen erfüllen (Fraktilwerte):

- $R_m/R_e \geq 1.15$
- $A_{gt} \geq 6\%$

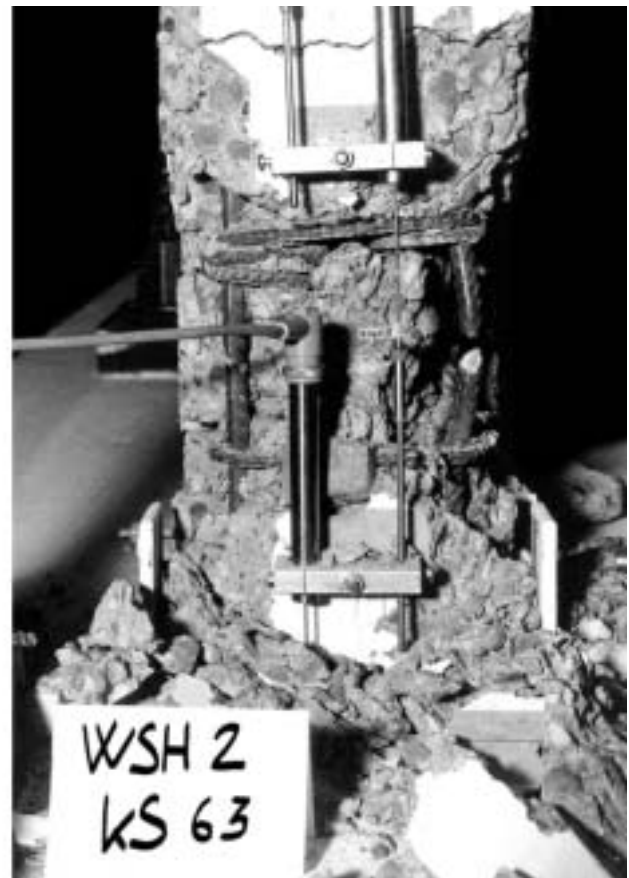
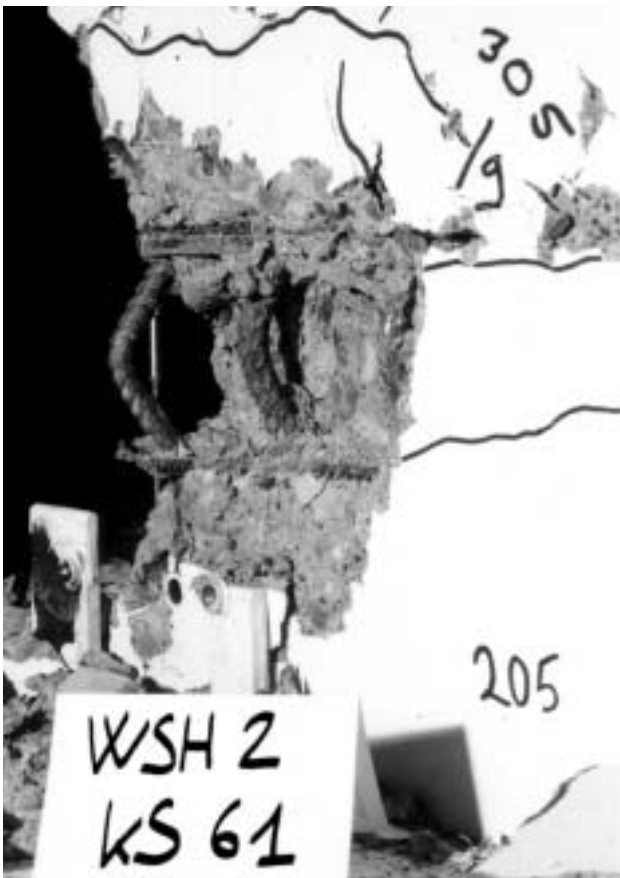
Bezeichnungen wie «Bewehrungsstahl gemäss Norm SIA 162» oder «Erfüllt die Normanforderungen» oder «duktil» bzw. «hochduktil» usw. genügen nicht und sind irreführend, weil die relevanten Normbestimmungen selbst ungenügend sind. Es ist deshalb dringend zu empfehlen, bei Bauausschreibungen klare Anforderungen festzulegen und vor Beschaffung bzw. Einbau des Bewehrungsstahls entsprechende Prüfungen durchzuführen.



24/1 Diese Hysteresekurven des plastischen Bereichs von 2 verschiedenen 6-stöckigen Stahlbetontragwänden ohne (WSH1) und mit (WSH3) duktilen Bewehrungsstahl zeigen auf eindrückliche Weise den Unterschied des Verhaltens: Die wenig duktile Wand erreichte knapp eine Verschiebeduktilität von nur  $\mu_{\Delta} \approx 2$ , die sehr duktile Wand hingegen  $\mu_{\Delta} \approx 6$ . Die duktile Wand kann damit ein etwa 4 mal stärkeres Erdbeben überstehen!

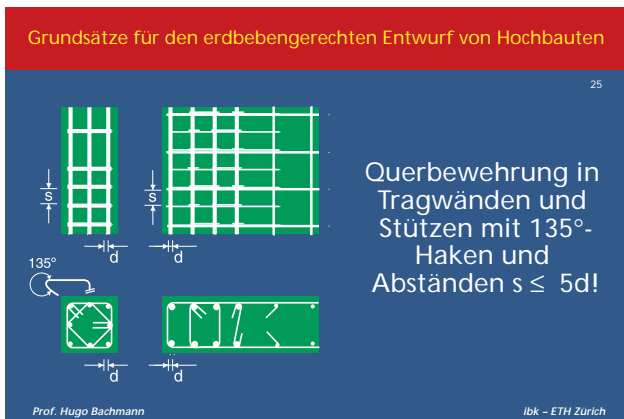


24/2 Bei dieser Versuchswand mit Bewehrungsstäben mit zu kleinem Verfestigungsverhältnis  $R_m/R_e$  konzentrierten sich die plastischen Verformungen weitgehend auf nur einen einzigen Riss («Ein-Riss-Gelenk» gemäss [BW 98]). Bald wurden Bewehrungsstäbe im Wandinnern (x) zerrissen. Dadurch war der betreffende Wandquerschnitt geschwächt, und die weiteren plastischen Verformungen konzentrierten sich voll auf diesen Querschnitt, sodass auch Bewehrungsstäbe am Wandrand zerrissen wurden. Die Wand konnte knapp (nur 2 Zyklen) eine Verschiebeduktilität  $\mu_\Delta=2$  erreichen [DW 99].



24/3 24/4 Hier knickten die Bewehrungsstäbe mit relativ kleinem  $R_m/R_e$  aus (links) und wurden bei der anschliessenden Zugbeanspruchung dort zerrissen (rechts), wo die grösste Knickkrümmung gewesen war [DW 99].

# GS 25 Querbewehrung in Tragwänden und Stützen mit 135°-Haken und Abständen $s \leq 5d$ !



In zyklisch beanspruchten plastischen Bereichen von Stahlbetontragwänden und -stützen wird nach dem Überschreiten der Fließgrenze der Vertikalbewehrung die Betonüberdeckung abgesprengt. Daher müssen dort die vertikalen Bewehrungsstäbe gegen Ausknicken stabilisiert und allenfalls auch der Beton umschnürt werden, damit grössere Druckstauchungen möglich sind. Die Querbewehrung – Stabilisierungs- und Umschnürungsbewehrung aus Bügeln und Verbindungsstäben – muss mit 135°-Haken verankert werden; 90°-Haken genügen nicht, was sich bei Schadenbeben stets wieder neu zeigt. Und die Querbewehrung muss in relativ kleinen vertikalen Abständen von  $s \leq 5d$  ( $d$  = Stabdurchmesser des stabilisierten Stabes) angeordnet werden; dies ist eine Folge der relativ schlechten Duktilitätseigenschaften (kleines Verfestigungsverhältnis  $R_m/R_e$ ) der europäischen Bewehrungsstähle, die zu einem ungünstigen Knickverhalten führen [TD 01].

In plastischen Bereichen von Rahmenriegeln sind ähnliche Regeln zu beachten [Ba 02].

In den gemäss Kapazitätsbemessung elastisch bleibenden Bereichen genügen die Regeln der konventionellen Bemessung gemäss SIA162.



25/1 Bei der Stütze einer Halle aus vorfabrizierten Stahlbetonelementen waren die Bügel mit 90°-Haken ungenügend verankert. Deshalb öffneten sich die Bügel und die Vertikalstäbe knickten aus (Adapazari Türkei 1999).



25/2 Auch am Fuss dieser Rahmenstütze erfolgte ein Verankerungsbruch der Bügel, weil diese nur mit 90°-Haken versehen waren (Izmit Türkei 1999)

Seite 59

25/3 Diese Querbewehrung – Bügel und Verbindungsstäbe – im Endbereich einer Stahlbetontragwand ist mustergültig bezüglich der Verankerung mit 135°-Haken und der Verlegegenauigkeit. Der vertikale Abstand der Querbewehrung ist jedoch zu gross, nämlich  $s = 7.5 d$  anstatt  $s \leq 5d$ , wie er für Bewehrungsstahl mit einem relativ kleinen Verfestigungsverhältnis ( $R_m/R_e = 1.15$ ) erforderlich ist [DW 99][TD 01].



# GS 26 Keine Aussparungen und Öffnungen in plastischen Bereichen!



Auf manchen Baustellen besteht die Tendenz, Aussparungen für Leitungen, Lüftungskanäle usw. oder gar grössere Öffnungen für verschiedenste Zwecke ohne Planung und Absprache mit dem Bauingenieur irgendwo im Tragwerk anzuordnen. Oft werden solche in die Schalung von hochbeanspruchten Stahlbetonbauteilen eingelegt oder gar nachträglich herausgespitzt. Dies wirkt sich in plastischen Bereichen besonders ungünstig und schädigend aus und ist unbedingt zu vermeiden. Denn es kann zum vorzeitigen Versagen von zuvor sorgfältig geplanten «überlebenswichtigen» Tragelementen und somit zu gravierenden Sicherheitsproblemen führen.

In elastisch bleibenden Bereichen des Tragwerks hingegen sind gut geplante und günstig platzierte Aussparungen und eventuell auch grössere Öffnungen im Allgemeinen möglich und zulässig. Sie sind z.B. mit einer kräftigen Zusatzbewehrung einzufassen oder allenfalls aufgrund einer Rahmenberechnung zu gestalten [D0171].



26/1 Diese zuvor gut geplante «Erdbebenwand» wurde durch in die Schalung eingelegte Aussparungskörper, grosse herausgespitzte Löcher und teilweise brutale Durchtrennung der Bewehrungsseisen gänzlich ruiniert.



26/2 Mit aufwendigen Reparaturarbeiten durch sorgfältiges Ausbetonieren der Öffnungen mit Quellbeton sowie Aufkleben und Verankern von fachwerkartig angeordneten Stahlblechen konnte bei der ruinierten Wand der Tragwiderstand wieder hergestellt werden; das mit der ursprünglichen Bewehrung mögliche duktile Verhalten wird jedoch kaum mehr erreicht werden können (Schweiz 2001).



26/3 Hier wurde ein – viel zu grosses – Loch gespitzt und die Bewehrungsseisen wurden durchgetrennt. Eine mit dem Ingenieur geplante, viel kleinere Öffnung ohne Verletzung der Bewehrung und mit konzentrierten und rechtwinklig zur Wand geführten Leitungen wäre vielleicht zulässig gewesen.



26/4 Immerhin konnte die Verletzung einigermaßen behoben und – anders als im vorherigen Fall – die ursprüngliche Wirkungsweise etwa wieder hergestellt werden (Schweiz 2001).

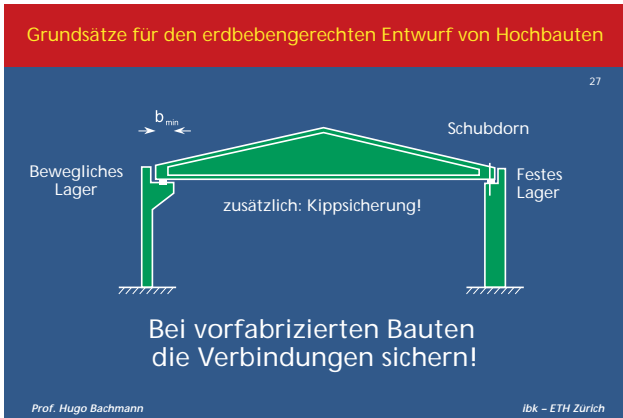


26/5 Auch solche ungeplant verlegte Leitungsstränge können das Erdbebenverhalten einer Stahlbetontragwand beeinträchtigen (Schweiz 2001).



26/6 In elastisch bleibenden Bereichen des «erdbebenrelevanten» Tragwerks (hier eine kurze Stahlbetontragwand) sind je nach Umständen Öffnungen erlaubt. Eine sorgfältige Absprache mit dem Ingenieur ist jedoch unerlässlich (Schweiz 2001).

# GS 27 Bei vorfabrizierten Bauten die Verbindungen sichern!



Die Verbindungen von vorfabrizierten Bauten werden oft nur auf die bei der Montage wirkenden Schwerlasten ausgelegt. Solche Bauten können deshalb durch Erdbeben sehr verletzbar sein: Kurze Auflagerlängen, zu schwache oder ganz fehlende Schubdorne und mangelhafte Kippsicherungen von Trägern sind häufige Einsturzursachen. Deshalb müssen bei beweglichen Lagern eine minimale Auflagerlänge ( $b_{min}$ ) gemäss Erdbebennormen und bei festen Lagern Schubdorne angeordnet werden, die auf die Schnittkräfte entsprechend der Überfestigkeit in den plastischen Bereichen bemessen sind (Methode der Kapazitätsbemessung). Zusätzlich müssen die Träger meist bei den Lagern gegen Kippen gesichert werden. Um eine Scheibenwirkung sicherzustellen, müssen Decken aus vorfabrizierten Platten mit einem bewehrten und in gutem Verbund wirkenden Überbeton versehen werden (vergleiche Grundsatz 22).



27/1 Auf den Stützenkonsolen einer vorfabrizierten Fabrikhalle waren zwar Schubdorne jedoch keine genügenden Kippsicherungen vorhanden. Der Auflagerbereich hat versagt, die Hauptträger sind seitlich – d.h. in Hallenlängsrichtung – ausgekippt ...



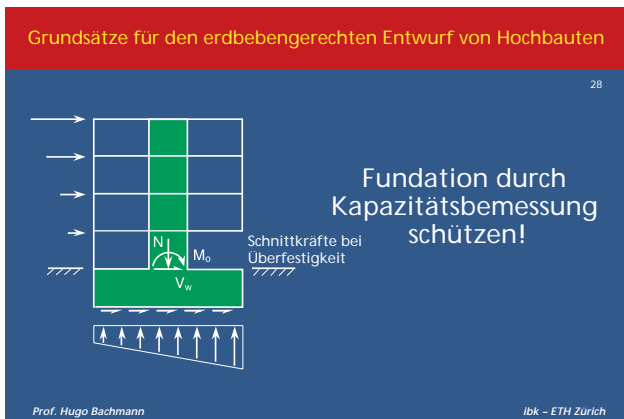
27/2 ... und die gesamte Dachkonstruktion ist abgestürzt (Adana-Ceyhan Türkei 1998).

Seite 63  
27/3 Folgen von schlechtem Entwurf und ungenügender Bemessung und konstruktiver Durchbildung eines vorfabrizierten Industriebaus (Adapazari Türkei 1999).





# GS 28 Foundation durch Kapazitätsbemessung schützen!



Wichtig für die Erdbebensicherung von Hochbauten ist die fachgerechte Ausbildung der Fundation zur Abtragung der Erdbebenkräfte. Meist sind kragarmförmige Wände und auch Rahmenstützen in einer Fundationsstruktur bestehend aus einem oder mehreren Untergeschossen («steifer Kasten») oder in einer massiven Fundamentplatte eingespannt. Da sich an den Einspannstellen plastische Bereiche entwickeln, müssen deren Überfestigkeits-Schnittkräfte gemäss den Prinzipien der Kapazitätsbemessung durch die Fundation übernommen und ohne Fließen auf den Baugrund übertragen werden können [PB 90]. Fundationen sollten immer elastisch bleiben, da plastische Verformungen im Allgemeinen zu einem unübersichtlichen Verhalten und zusätzlichen Verschiebungen und Beanspruchungen im Oberbau führen; zudem sind Reparaturen in der Fundation meist erheblich schwieriger auszuführen als im Oberbau. Deshalb muss die Bewehrung unmittelbar unterhalb der plastischen Bereiche deutlich verstärkt und entsprechend konstruktiv durchgebildet werden [D0171].

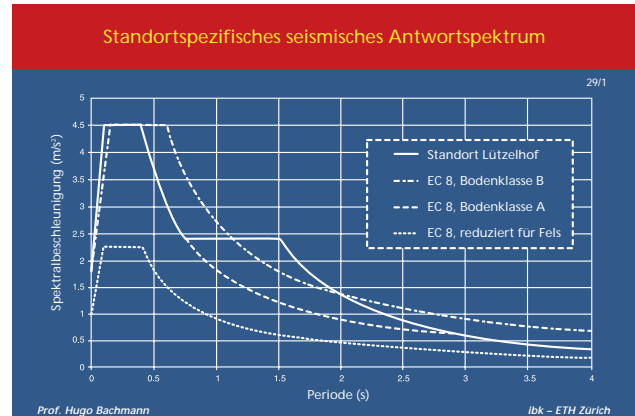
Sofern die Fundationsstruktur als steifer Kasten aus Stahlbetonwänden und -Decken ausgebildet ist, muss die Weiterleitung der Schub-, Zug- und Druckkräfte aus Biegung und Querkraft der plastischen Bereiche von Stahlbetontragwänden über die Decken zu den Umfassungswänden und zur Bodenplatte gewährleistet sein. Dabei müssen eine allfällig erforderliche Verstärkung dieser Tragelemente (unter Berücksichtigung von eventuell vorhandenen Aussparungen und Öffnungen), eine lokale Vergrößerung der Bodenpressungen im Bereich der Wände einschliesslich Verstärkung der Bodenplatte sowie allfällige weitere Massnahmen in Betracht gezogen werden.

Die Kräfte aus der Erdbebeneinwirkung müssen somit über die ganze Fundationsstruktur bis hin zur sicheren Abtragung durch den Baugrund verfolgt werden. Dabei können die zulässigen dynamischen Beanspruchungen des Bodens höher angesetzt werden als analoge statische Beanspruchungen, doch sind auch im Boden plastische Verformungen unter allen Umständen zu vermeiden [SK 97].



28/1 Hier mussten Bodenanker angeordnet werden, um das Abheben der Fundation von – noch zu betonierenden – duktilen Stahlbetontragwänden vom Baugrund verhindern zu können (Schweiz 1999).

# GS 29 Standortspezifisches Antwortspektrum entwickeln!



Besondere lokale Bodenverhältnisse können im Vergleich zu den Bemessungsantwortspektrern der Normen erhebliche Modifikationen bei den zu erwartenden Bodenbewegungsgrößen und damit auch bei der Bauwerksantwort bewirken. Dies kann der Fall sein

- bei weichen Böden mit Scherwellengeschwindigkeiten unter etwa 200 m/s oder/und bei grossen Schichtstärken
- bei bestimmten Tälern mit alluvialen oder glazialen Auffüllungen (Verhältnis Tiefe zu Breite grösser als  $\sim 0.2$ )
- allgemein bei Verdacht auf Resonanz zwischen Boden und Bauwerk

In solchen Fällen kann der Boden auch bei schwächeren Erdbeben zu ausgeprägten Eigenschwingungen und entsprechenden Amplifikationen der Bewegungen an der Erdoberfläche neigen. Deshalb sind vor allem bei wichtigeren Gebäuden spezielle Untersuchungen erforderlich. Sofern noch keine Mikrozonierung mit zugehörigen Spektralwerten (boden- und schichtstärkenspezifische Antwortspektren) vorliegt, müssen die vorherrschende Eigenfrequenz des Bodens ermittelt und ein standortspezifisches Bemessungsantwortspektrum (Beschleunigungs- und Verschiebungsspektrum) entwickelt werden.

29/1 Am Standort eines Gebäudes mit geplanter «Base isolation» (schwimmende Lagerung auf speziellen Erdbebenlagern) beträgt die in nahen Bohrlöchern gemessene vorherrschende Bodenfrequenz 0.65 bis 0.85 Hz, was einer Eigenperiode von 1.2 bis 1.5 s entspricht. Bei der Entwicklung eines standortspezifischen Bemessungsantwortspektrums der Beschleunigung wurde das relevante Normspektrum in diesem Bereich wesentlich angehoben und bereits ab  $T = 1.5$  s eine konstante Verschiebung angenommen. Um allfällige Resonanzerscheinungen klar auszuschliessen und die Beschleunigungen möglichst klein zu halten, wurde bei der Erdbebenbemessung des Gebäudes die Zielperiode auf  $T_0 \cong 3$  s ( $f_0 \cong 0.33$  Hz) festgelegt (Schweiz 2000).

# GS 30 Mögliche Bodenverflüssigung untersuchen!



Bestimmte sandige und siltige Böden mit wesentlichem Wassergehalt können für ruhende Lasten sehr fest sein und eine gute Tragfähigkeit aufweisen. Wenn sie aber vibriert werden – wie das bei einem Erdbeben geschieht – verhalten sie sich plötzlich wie eine Flüssigkeit. Ganze Gebäude oder Teile davon können dann absinken oder – bei inhomogenem Boden bzw. ungleicher Verflüssigung – umkippen, was je nach Ausbildung des Tragwerks meist zum Totaleinsturz führt. Deshalb müssen sandige und siltige Böden auf ihr Potential zur Verflüssigung untersucht werden. Gegenmassnahmen wie Verfestigung durch Injektionen, Pfahlfundation usw. können die Folge sein.



30/1 Dieses Gebäude ist infolge Bodenverflüssigung um etwa 1 m gleichmässig abgesunken. Das verdrängte Bodenmaterial hat die Strasse aufgewölbt (Izmit Türkei 1999).



30/2 Das schief stehende Gebäude ist ungleichmässig abgesunken und lehnt sich gegen ein Nachbargebäude (Izmit Türkei 1999).

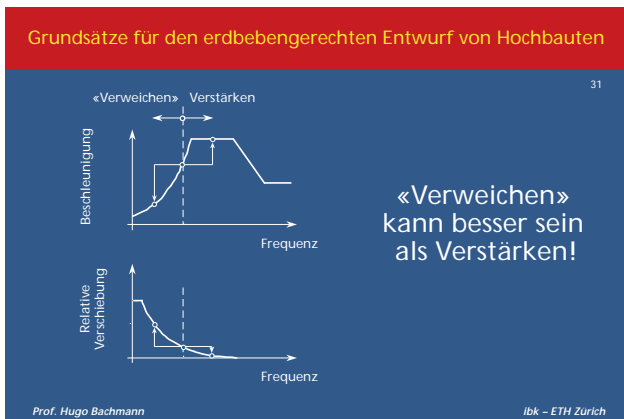


30/3 Dieses solid konstruierte Gebäude ist wie ein starrer Körper umgekippt, die massive Bodenplatte ragt in die Luft. Das Gebäude selbst hat nur relativ geringe Schäden erlitten (Adapazari Türkei 1999).



30/4 Auch dieser Tank hat sich schief gestellt. Als Ursache wurde die Verflüssigung von aufgeschüttetem sandigem Boden festgestellt (Kobe Japan 1995).

# GS 31 «Verweichen» kann besser sein als Verstärken!



Zur Verbesserung des Erdbebenverhaltens eines geplanten oder eines bestehenden Gebäudes denken manche Architekten und Bauingenieure an eine Verstärkung, d.h. an eine Erhöhung der Festigkeit bzw. des Tragwiderstandes für horizontale Kräfte. Eine Verstärkung (strengthening) bewirkt immer auch eine Versteifung (stiffening), wodurch die Eigenfrequenzen angehoben werden. Unter bestimmten Bedingungen kann jedoch eine «Verweichung» (softening) besser sein als eine Verstärkung bzw. Versteifung [Ba 01]. Durch den Einbau von speziellen horizontal relativ weichen Erdbebenlagern über der Foundation für eine «Base isolation» (schwimmende Lagerung) wird eine Frequenzverschiebung in den niedrigspektralen Bereich des Bemessungsantwortspektrums der Beschleunigung bewirkt. Dadurch – und weil meist auch kombiniert mit einer Vergrößerung der Dämpfung – werden die einwirkenden Erdbebenkräfte und damit auch das Schadenpotential erheblich reduziert. Andererseits nehmen die relativen Verschiebungen wesentlich zu, was einen genügend grossen Freiraum um das erdbebenisolierte Gebäude und die Flexibilisierung sämtlicher Zu- und Ableitungen erfordert.

31/1 Dieser Grosstank für 700 t Flüssiggas und mit einer Tragkonstruktion aus Stahlbeton wurde durch eine «Verweichung» ertüchtigt (Schweiz 1999).

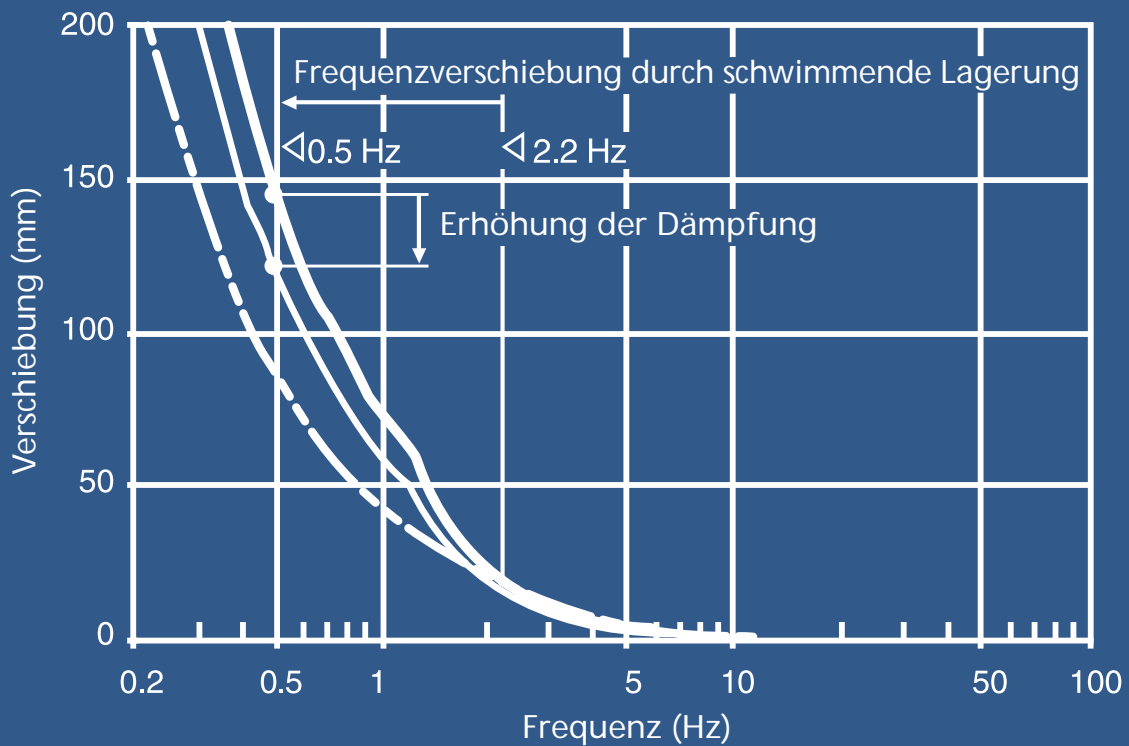
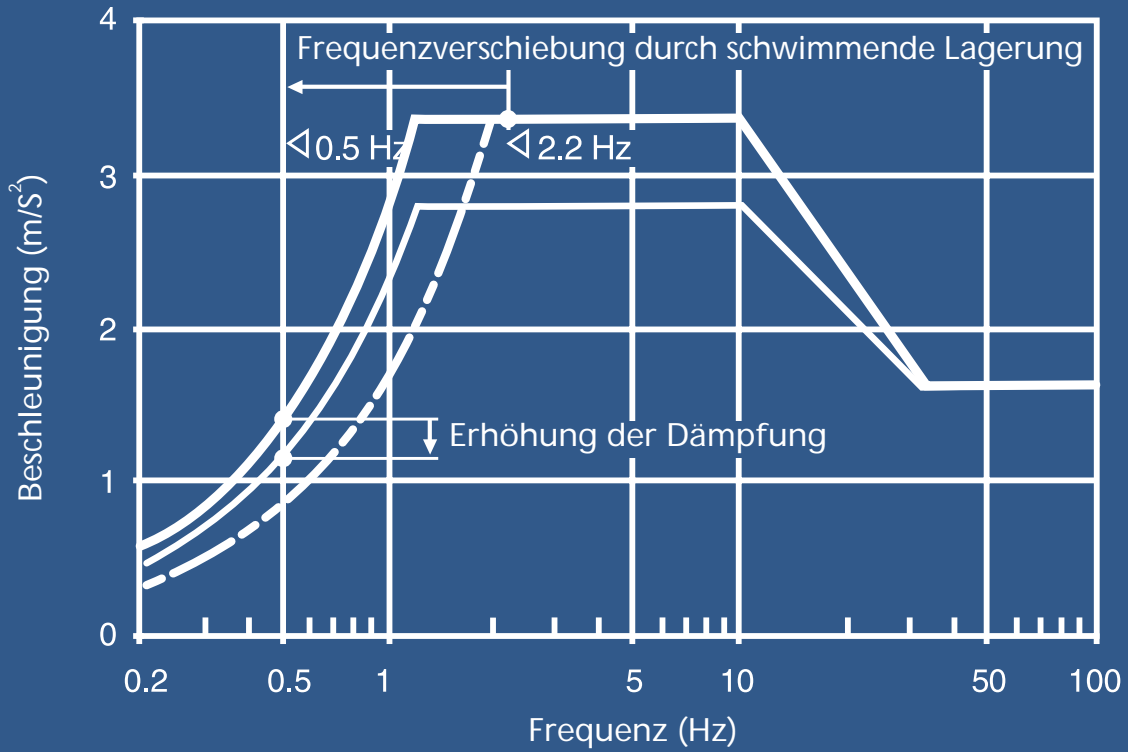


31/2 In die 8 Stahlbetonstützen wurden Erdbebenlager aus hochdämpfendem Gummi mit einem Durchmesser von 60 cm und einer Höhe von rund 30 cm eingebaut.

Seite 69

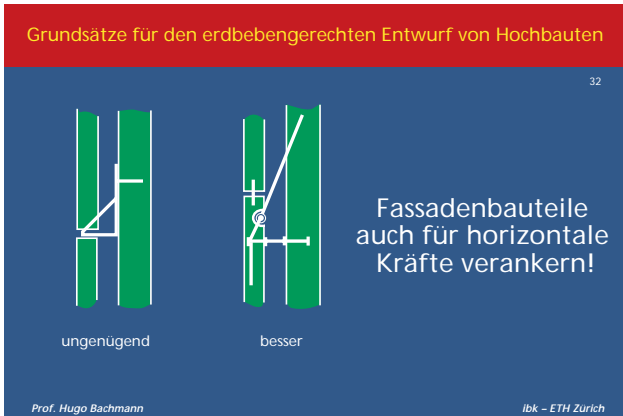
31/3 In den Bemessungsantwortspektrums der Beschleunigung und der relativen Verschiebung können die Wirkung der Verringerung der Grundfrequenz auf ~ 0.5 Hz und diejenige der zusätzlichen Dämpfung direkt abgelesen werden.

# Bemessungsspektren Grosstank



- Standortspezifisches Spektrum  $\zeta = 5\%$
- Standortspezifisches Spektrum  $\zeta = 8\%$
- - - Spektrum für mittelsteife Böden nach SIA 160  $\zeta = 5\%$

# GS 32 Fassadenbauteile auch für horizontale Kräfte verankern!



Die Verankerungen von Fassadenbauteilen werden häufig nur für Kräfte aus den Schwerelasten und somit nur für vertikale Kräfte ausgebildet. Oft werden Fassadenbauteile gar nur auf Konsolen gestellt und oben leicht fixiert. Bei Erdbebeneinwirkung kann jedoch durch horizontale und vertikale Beschleunigungen die Reibung aus den Schwerelasten überwunden werden, und ein Absturz der Fassadenbauteile mit entsprechender Gefährdung von Fussgängern, Fahrzeugen, usw. ist unvermeidlich. Die Verankerungen von Fassadenbauteilen müssen deshalb nicht nur für Schwerelasten sondern auch für alternierende horizontale Zug- und Druckkräfte fachgerecht dimensioniert und konstruiert werden. Die Verankerungen und allfällige Fugen zwischen den Fassadenbauteilen sollten zudem auf die zu erwartenden Verformungen des Tragwerks abgestimmt werden.



32/1 Das Tragwerk dieses Gebäudes stürzte nicht ein, hingegen sind ungenügend verankerte, schwere Fassadenplatten abgestürzt (Kobe Japan 1995).



32/2 Auch diese Leichtbetonplatten als Verkleidung eines wenig beschädigten Stahlbaus wurden zerstört (Kobe Japan 1995).



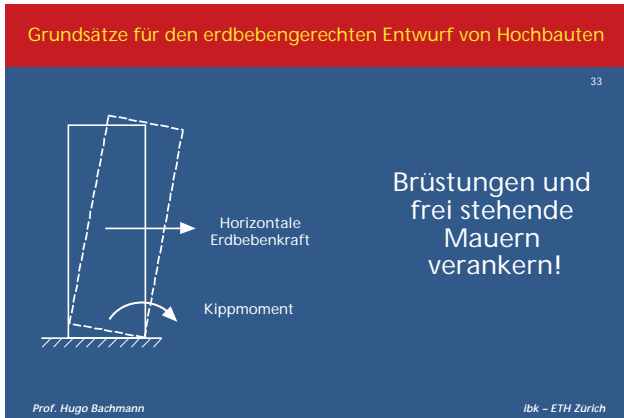
32/3 Diese Fassadenverkleidung war ungenügend verankert und nicht auf die zu erwartenden Verformungen des Tragwerks (Stahlbetonrahmen) abgestimmt (Northridge Kalifornien 1994).



32/4 Der Blick in eine enge Gasse zeigt zahlreiche abgestürztes «Fassadengut», durch das auch die Rettungsarbeiten, der Zugang der Feuerwehr usw. stark behindert wurden (Kobe Japan 1995).



# GS 33 Brüstungen und frei stehende Mauern verankern!



Wo rasche horizontale Verschiebungen und entsprechende Beschleunigungskräfte wirken, entsteht ein Kippmoment. Wenn keine oder keine genügende Verankerung oder Einspannung vorhanden ist, können vor allem schlanke Bauteile umkippen.

33/2 ... und der Sims und einzelne ihn tragende Baluster haben beim Absturz die auskragende Dachplatte beschädigt (Loma Prieta Kalifornien 1989).



33/1 Bei diesem klassizistischen Stahlbetongebäude entstanden keine grösseren Schäden, sogar die Fensterscheiben sind intakt geblieben. Auf der einen Seite der Dachterrasse ist jedoch die Brüstung (Balustrade) teilweise umgekippt...



33/3 Frei stehende und im Fundament nicht weiter verankerte Mauern können umstürzen (Kobe Japan 1995).

Seite 73

33/4 Auch diese Gartenmauer aus Blocksteinen ist umgestürzt (Northridge Kalifornien 1994).

SPEED  
LIMIT  
40



# GS 34 Unterdecken und Beleuchtungskörper gut befestigen!



Herabfallende Unterdecken und Beleuchtungskörper können Personen erheblich gefährden. Die Befestigungen müssen deshalb nicht nur das Eigengewicht sondern auch Kräfte aus vertikalen und horizontalen Beschleunigungen und Vibrationen mit genügender Sicherheit übertragen können. Gleiches gilt für die Befestigungen von Lüftungskanälen und Leitungen aller Art, die in den Hohlräumen zwischen Unterdecke und tragender Decke montiert sind.

34/2 ... die nur an dünnen Drähten hängen, können ein grosses Personenrisiko darstellen (Northridge Kalifornien 1994).

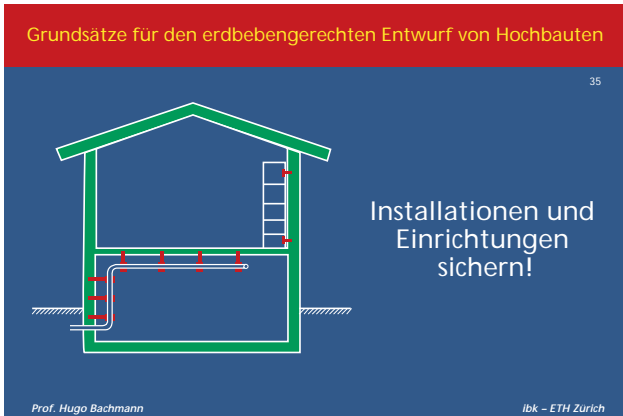


34/1 Unterdecken und Deckenverkleidungen...



34/3 34/4 Auch solche schlecht befestigte oder nur in die Decke hineingesteckte Beleuchtungskörper können abstürzen und Personen gefährden (San Fernando Kalifornien 1971).

# GS 35 Installationen und Einrichtungen sichern!



Die Sicherung von Installationen und Einrichtungen aller Art in Gebäuden – evtl. auch ausserhalb derselben auf Dächern usw. – ist sehr wichtig bei Bauten, die nach einem schweren Erdbeben funktionstüchtig bleiben sollten, oder wo das zumindest sehr erwünscht ist. Es betrifft dies vor allem sogenannte Lifelinebauten, d.h. überlebenswichtige Infrastrukturbauten der Bauwerksklasse III gemäss Norm SIA 160 wie Spitäler, Zentralapotheken, Feuerwehrgebäude, Kommandozentralen, Kommunikationseinrichtungen usw.; es kann sich aber z.B auch um Industrieanlagen handeln, deren Stillstand zu Produktionsausfällen und entsprechenden, hohen Verlusten führt. Sämtliche Installationen und Einrichtungen wie Rohrleitungen, Sprinkleranlagen, Laborgeräte, Behälter, Schränke, Lagergestelle etc. und gegebenenfalls auch Produktionseinrichtungen müssen auf Erdbebeneinwirkungen systematisch untersucht und wo nötig durch zweckmässige Massnahmen wie Befestigungen, Aussteifungen usw. wirksam gesichert werden.



35/2 Behälter und Maschinen können umkippen, wenn sie nicht genügend verankert sind (Kobe Japan 1995).



35/3 In einem Chemielabor sind ungesicherte Gläser mit Chemikalien vom Tisch und durch offene Türen heruntergestürzt und geborsten (San Fernando Kalifornien 1971).



35/1 Rohrleitungen – vor allem solche mit grösseren Durchmessern – weisen eine hohe Verletzbarkeit auf, sofern sie nicht wirksam befestigt sind (San Fernando Kalifornien 1971).



35/4 Aktenschränke können umstürzen, besonders wenn die Rollschubladen nicht gesichert sind (Morgan Hill Kalifornien 1984)



35/6 Bücher stellen eine beträchtliche Masse dar, sodass kräftige Verankerungen und Aussteifungen der Gestelle in beiden Hauptrichtungen erforderlich sind (Whittier Narrows 1987).



35/5 Offene Büchergestelle entleeren sich bei jedem starken Erdbeben. Wertvolle Bücher können durch nach hinten geneigte Tablare oder durch Haltestäbe gesichert werden (Loma Prieta Kalifornien 1989).



35/7 Gut gesicherte Batteriangruppen und Notstromaggregate können auch nach einem starken Erdbeben die Energieversorgung gewährleisten (Kalifornien 1980).



35/8 Diese «wertvollen» Flaschen in einem Getränkeladen wurden durch Drähte mit Federn gesichert (Kalifornien 1978).



35/9 Und sogar Lagergestelle für Weinfässer können auf einem Erdbbensimulator («Rütteltisch») geprüft werden... (Berkeley 2000).

# Bildnachweis

Die verwendeten Bilder stammen von folgenden Personen und Institutionen:

Walter Ammann, Davos: 11/2, 20/1, 20/2, 20/3

Hugo Bachmann, Zürich: Grundsatzbilder 1 bis 35, E/1, E/2, E/3, 1/1, 1/2, 2/1, 2/2, 4/9, 4/10, 6/1, 7/1, 8/1, 8/2, 9/1, 9/3, 9/4, 10/1, 12/1, 12/2, 12/3, 12/4, 12/5, 15/1, 15/2, 15/3, 17/6, 21/1, 25/1, 26/1, 26/3, 26/5, 26/6, 27/3, 31/3

Marc Badoux, Lausanne: 30/1

Alessandro Dazio, San Diego CA: Umschlagbild mit Bewehrung, 9/2, 23/1, 24/1, 24/2, 24/3, 24/4, 25/3

Martin Koller, Carouge: 28/1, 29/1

Pierino Lestuzzi, Lausanne: 4/2, 4/3, 11/3, 11/4, 17/2, 17/3, 17/4, 17/5, 25/2, 30/2

Eberhard Luz, Stuttgart: 14/1, 22/1, 22/2, 22/3

Roland Madöry, Basel: 31/1

Paul Missbauer, Sion: 31/1

Kaspar Peter, Lausanne: 14/2

Meta Sozen, Illinois: 30/3

Dieter Wepf, Flawil: 11/1, 16/3

Thomas Wenk, Zürich: Umschlagbild mit Gebäude, 4/4, 4/5, 4/6, 4/7, 4/8, 5/2, 5/3, 6/2, 6/3, 6/4, 6/5, 6/6, 13/6, 13/7, 14/3, 16/2, 27/1, 27/2, 30/4, 32/1, 32/4

Architectural Institute of Japan: 5/1, 18/1, 18/2, 18/3, 19/1, 19/2, 19/3, 19/4, 19/5, 19/6, 20/4, 32/2, 32/3, 33/3

Earthquake Engineering Research Institute, Oakland CA: Umschlagbild mit Rohrleitung, 16/1, 32/3, 33/1, 33/2, 33/4, 34/1, 34/2, 34/3, 34/4, 35/1, 35/2, 35/3, 35/4, 35/5, 35/6, 35/7, 35/8

Losinger AG, Lyssach BE: 13/4, 13/5

Pacific Earthquake Engineering Research Center, Berkeley CA: 35/9

Schweizerische Ziegelindustrie, Zürich: 13/1, 13/2, 13/3

Stahlton AG, Zürich: 26/2, 26/4

NN.: 4/1, 13/8, 17/1

- [Ba 02] Bachmann H.: «Erdbebensicherung von Bauwerken». 2. Auflage Birkhäuser Verlag Basel Boston Berlin 2002
- [Ba 01] Bachmann H.: «Softening as Seismic Upgrading Strategy – Requirements and Case Studies». Proceedings 20th European Regional Earthquake Engineering Seminar Sion, September 3-7, 2001. Schweizer Gesellschaft für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik SGEb, Martigny 2001.
- [BW 98] Bachmann H., Wenk T.: «Ungenügende Duktilität beim Bewehrungsstahl». Schweizer Ingenieur und Architekt, Heft 29, Juli 1998.
- [DW 99] Dazio A., Wenk T., Bachmann H.: «Versuche an Stahlbetontragwänden unter zyklisch-statischer Einwirkung». Institut für Baustatik und Konstruktion (IBK), ETH Zürich. Bericht Nr. 239, Birkhäuser Verlag Basel Boston Berlin 1999.
- [D0150] Bachmann H., Darbre G.R., Deichmann N., Koller M.G., Studer J., Tiniç S., Tissières P., Wenk Th., Wieland M., Zwicky P.: «Handlungsbedarf von Behörden, Hochschulen, Industrie und Privaten zur Erdbebensicherung der Bauwerke in der Schweiz». SGEb/SIA-Dokumentation D0150, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich 1998.
- [D0171] Bachmann H., Dazio A., Bruchez P., Mittax X., Peruzzi R., Tissières P.: «Erdbebengerechter Entwurf und Kapazitätsbemessung eines Gebäudes mit Stahlbetontragwänden». SGEb/SIA-Dokumentation D0171, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich 2002.
- [EC 8] Eurocode 8 (Norm): «Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben», Teile 1-1, 1-2, 1-3. Norm SIA V160.811/812/813 als Europäische Vornorm ENV 1998-1-1/-2/-3. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich 1997.
- [GM98] Grünthal G., Mayer-Rosa D., Lenhardt W.: «Abschätzung der Erdbebengefährdung für die D-A-CH-Staaten – Deutschland, Österreich, Schweiz», Bautechnik 75 (1998) Heft 10, S. 753–767.
- [La 02] Lang K.: «Seismic Vulnerability of Existing Buildings». Institut für Baustatik und Konstruktion (IBK), ETH Zürich. Bericht in Vorbereitung, Birkhäuser Verlag Basel Boston Berlin 2002.
- [PB 90] Paulay T., Bachmann H., Moser K.: «Erdbebenbemessung von Stahlbetonhochbauten». Birkhäuser Verlag Basel Boston Berlin 1990.
- [PP 92] Paulay T., Priestley M.J.N.: «Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Structures». John Wiley & Sons, New York 1992.
- [Sc 00] Schumacher R.: «Zur rechtlichen Verantwortung für die Erdbebensicherung von Bauwerken». SGEb/SIA-Dokumentation D0162 «Erdbebenvorsorge in der Schweiz – Massnahmen bei neuen und bestehenden Bauwerken», Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich 2000.
- [SIA 160] SIA 160 (Norm): «Einwirkungen auf Tragwerke». Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich 1989.
- [SK 97] Studer J., Koller M.G.: «Bodendynamik – Grundlagen, Kennziffern, Probleme». 2. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1997.
- [TD 01] Thiele K., Dazio A., Bachmann H.: «Bewehrungsstahl unter zyklischer Beanspruchung». Institut für Baustatik und Konstruktion (IBK), ETH Zürich. Bericht Nr. 264, Birkhäuser Verlag Basel Boston Berlin 2001.



# Kontakte

<http://www.bwg.admin.ch>  
Bundesamt für Wasser und Geologie BWG  
Koordinationsstelle für Erdbebenvorsorge  
Ländtesstrasse 20  
2501 Biel

<http://www.sgeb.ch>  
Schweizer Gesellschaft für Erdbeben-  
ingenieurwesen und Baudynamik SGEB  
Case postale 1571  
1227 Carouge

<http://www.sia.ch>  
Schweizerischer Ingenieur- und  
Architektenverein SIA  
Selnaustrasse 16 Postfach  
8039 Zürich

<http://www.seismo.ethz.ch>  
Schweizerischer Erdbebendienst SED  
ETH Hönggerberg  
8093 Zürich

<http://www.vkf.ch>  
Schweizerischer Pool für Erdbebendeckung  
Bundesgasse 20  
3001 Bern

<http://www.ibk.baug.ethz.ch>  
Institut für Baustatik und Konstruktion IBK  
Bereich Baudynamik und Erdbebeningenieurwesen  
ETH Hönggerberg  
8093 Zürich

<http://beton.epfl.ch>  
Laboratoire de construction en béton  
Faculté ENAC Institut de Structures EPFL GC  
1015 Lausanne

