

Grundsätze für Ingenieure und Architekten für den erdbebengerechten Entwurf von Hochbauten*

Prof. Dr. Hugo Bachmann
Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) Zürich, Schweiz

KURZFASSUNG: Bei manchen Fachleuten – vor allem bei Architekten - herrscht immer noch die Meinung vor, die Erdbebensicherung von Hochbauten sei eine Sache der Berechnung und Bemessung des Tragwerks durch den Bauingenieur. Dies trifft aber bei weitem nicht zu! Ähnlich wichtig oder oft viel wichtiger sind der konzeptionelle Entwurf und die konstruktive Durchbildung von Tragwerk und nichttragenden Bauteilen, vor allem der Zwischenwände und Fassadenbauteile. Deshalb werden hier wichtige Grundsätze für den erdbebengerechten Entwurf von Hochbauten dargestellt; sie betreffen meist gleichermaßen die Arbeit des Architekten und des Bauingenieurs.

1 EINLEITUNG

Bei der Erdbebensicherung von neuen Bauwerken werden entscheidende Weichen gestellt beim

- konzeptionellen Entwurf und bei der
- konstruktiven Durchbildung

von

- Tragwerk und
- nichttragenden Bauteilen
(Zwischenwände, Fassadenbauteile, usw.)

für die

- Erdbebensicherheit (Versagensverhalten) und die
- Erdbebenverletzbarkeit (Schadenanfälligkeit).

"Erdbebenmässige" Fehler und Mängel beim konzeptionellen Entwurf und bei der konstruktiven Durchbildung von Tragwerk und nichttragenden Bauteilen können durch eine auch noch so ausgeklügelte Berechnung und Bemessung nicht kompensiert werden.

Bei einem fachgerechten konzeptionellen Entwurf und einer ebensolchen konstruktiven Durchbildung sowie bei Anwendung moderner Methoden für Berechnung und Bemessung - insbesondere der verformungsorientierten Kapazitätsbemessung - entstehen für die Erdbebensicherung neuer Bauwerke im Allgemeinen keine oder keine wesentlichen Mehrkosten.

Eine Diaserie mit den hier abgebildeten Grundsatzdias und zugehörigen Illustrationsdias (Schadenbilder, Beispiele) sowie eine entsprechende Broschüre mit erklärenden Texten kann ab Dezember 2000 gegen einen Kostenbeitrag bezogen werden beim Institut für Baustatik und Konstruktion (IBK), Gruppe Baudynamik und Erdbebeningenieurwesen, ETH Zürich Hönggerberg, CH-8093 Zürich.

* Überarbeitete und ergänzte Fassung eines Beitrages zur Tagung der Schweizer Gesellschaft für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik "Erdbebenvorsorge in der Schweiz – Massnahmen bei neuen und bestehenden Bauwerken" vom 7./8. September 2000 an der ETH Zürich.

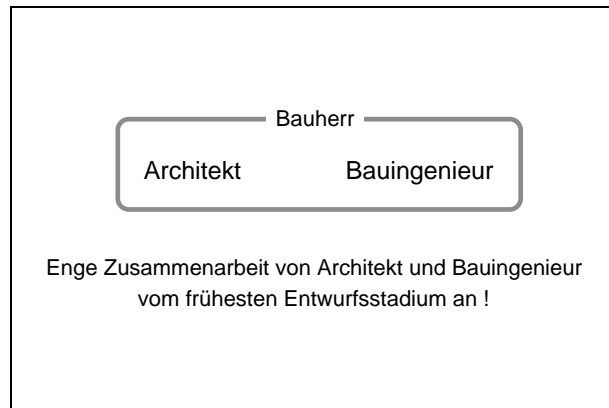
Im Folgenden wird anhand von Grundsätzen der erdbebengerechte Entwurf von Hochbauten auf elementarer Ebene behandelt. Die Einhaltung der dargestellten Grundsätze zu Planung und Vorgehen, zum konzeptionellen Entwurf und zur konstruktiven Durchbildung ist notwendig, jedoch im Allgemeinen nicht hinreichend. Zusätzlich ist eine fachgerechte Berechnung und Bemessung erforderlich. Während beim konzeptionellen Entwurf und bei manchen Aspekten der konstruktiven Durchbildung Architekt und Bauingenieur beteiligt sind, gehört die hier nur mit wenigen Grundsätzen angedeutete Berechnung und Bemessung zum eigentlichen Kerngebiet des Bauingenieurs. Hiefür ist qualifizierte Ingenieurarbeit unabdingbar, deren Kosten aber durch Einsparungen bei den Baukosten meist mehr als kompensiert werden. Die präsentierten Grundsätze werden jeweils durch ein einfaches schematisches Bild und einen zugehörigen relativ kurzen Text charakterisiert. In einer Vortragsversion werden die meisten Grundsätze zusätzlich durch entsprechende Schadenbilder oder Beispiele illustriert (siehe auch Kasten).

2 GRUNDSATZ ZU PLANUNG UND VORGEHEN

Der folgende Grundsatz zu Planung und Vorgehen ist entscheidend für das Erzielen einer optimalen baulichen Lösung:

Enge Zusammenarbeit von Architekt und Bauingenieur vom frühesten Entwurfsstadium an!

Bei der Zusammenarbeit zwischen Architekt und Bauingenieur bestehen vielerorts immer noch wesentliche Lücken, die gravierende Folgen haben und grosse aber unnötige Mehrkosten bewirken können. Häufig wird bei der Planung eines Hochbaus der Ingenieur zu spät beigezogen. Es wird viel zu wenig beachtet, dass "erdbebenmässige" Fehler und Mängel beim konzeptionellen Entwurf und bei der konstruktiven Durchbildung des Tragwerks und der nichttragenden Bauteile durch eine auch noch so ausgeklügelte Berechnung und Bemessung durch den Bauingenieur nicht kompensiert werden können. Deshalb ist es unbedingt erforderlich, dass eine enge Zusammenarbeit von Architekt und Ingenieur vom frühesten Entwurfsstadium an erfolgt.



Falsch ist vor allem ein "Nacheinander-Entwurf". D.h. falsch ist, wenn zuerst der Architekt das Konzept für das Tragwerk entwirft und die nichttragenden Zwischenwände und Fassadenbauteile wählt, und erst nachher der Ingenieur beigezogen wird mit dem Auftrag, eine Berechnung und Bemessung durchzuführen. Und falsch ist auch, wenn zuerst ein Tragwerk für Schwerelasten entworfen wird, dann die nichttragenden Zwischenwände und Fassadenbauteile gewählt werden und erst nachher das Tragwerk zur Bewältigung der Erdbebeneinwirkung noch ergänzt wird.

Viel besser und viel kostengünstiger ist ein "Miteinander-Entwurf": Architekt und Ingenieur entwerfen gemeinsam ein "Mehrzweck"-Tragwerk, d.h. ein Tragwerk für die Schwerelasten und die Erdbebenkräfte, und sie wählen gemeinsam die zu diesem Tragwerk passenden nichttragenden Zwischenwände und Fassadenbauteile. Dieses Vorgehen vermeidet erhebliche Mehrkosten und ein letztendlich trotzdem nicht befriedigendes Flickwerk.

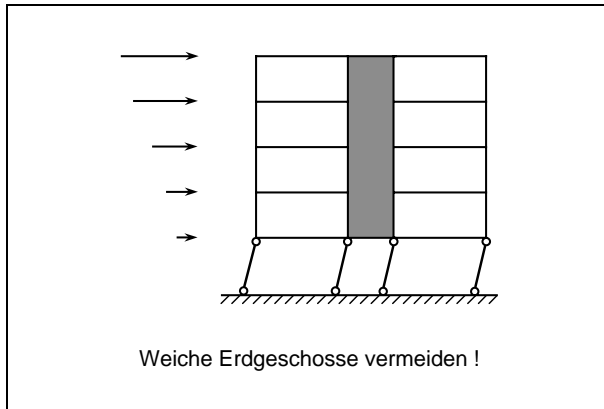
3 GRUNDSÄTZE ZUM KONZEPTIONELLEN ENTWURF

Die folgenden Grundsätze betreffen den konzeptionellen Entwurf von Tragwerk und nichttragenden Bauteilen (vor allem Zwischenwände und Fassadenbauteile), bei dem eine enge Zusammenarbeit von Architekt und Bauingenieur von besonders grosser Bedeutung ist.

Weiche Erdgeschosse vermeiden!

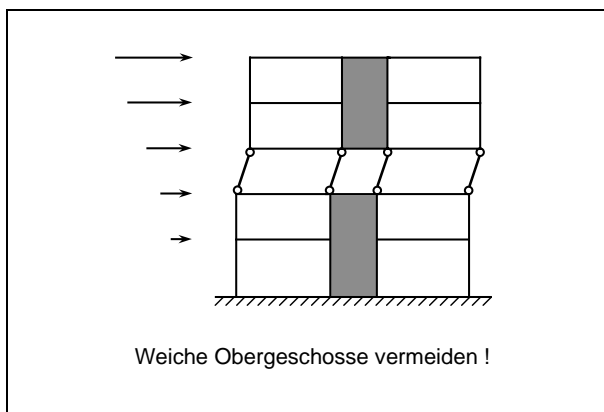
Viele Einstürze von Gebäuden unter Erdbeben sind darauf zurückzuführen, dass Aussteifungselemente, die in den Obergeschossen vorhanden sind, im Erdgeschoss weggelassen und dafür nur relativ dünne Stützen angeordnet werden. Das

bewirkt ein in horizontaler Richtung weiches Erdgeschoss und führt zum gefürchteten Stützenmechanismus (Stockwerksmechanismus).



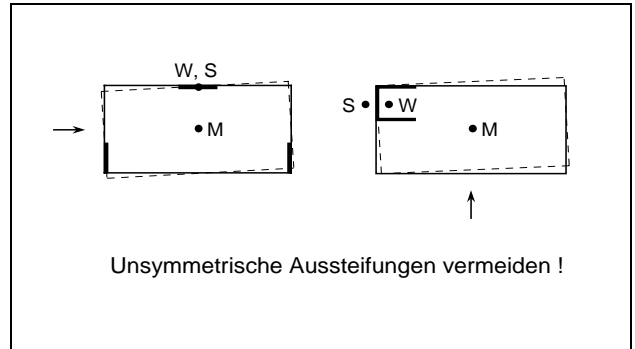
Weiche Obergeschosse vermeiden!

Wenn in einem Obergeschoss Aussteifungen gegen horizontale Kräfte geschwächt oder gar ganz weggelassen werden, ergibt sich ein weiches Obergeschoss und dementsprechend ein gefährlicher Stützenmechanismus (Stockwerksmechanismus.)



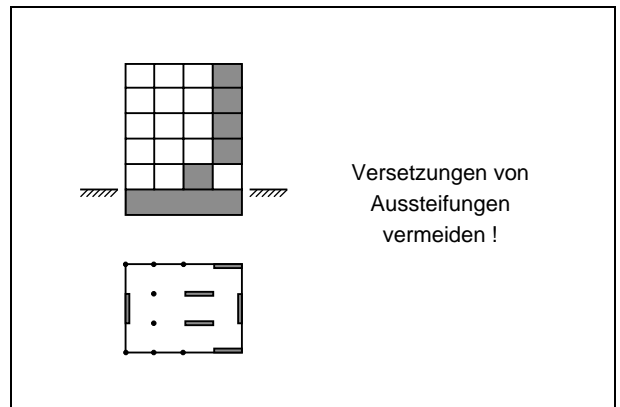
Unsymmetrische Aussteifungen vermeiden!

In den Grundrissen der Gebäude (Bild) sind nur Wände als Aussteifungselemente für horizontale Kräfte und keine Schwerlaststützen dargestellt. Die Wände sind stark unsymmetrisch angeordnet, sodass das Widerstandszentrum W nicht mit dem Massenzentrum M zusammenfällt. Dies führt zu starker Torsion mit Verdrehungen des Gebäudes um das Steifigkeitszentrum (Schubmittelpunkt) S und vorwiegend zum Versagen der von S entferntesten Stützen.



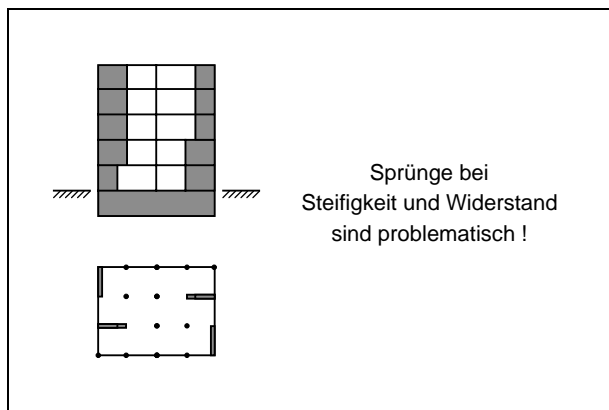
Versetzungen von Aussteifungen vermeiden!

Versetzungen von Aussteifungen, d.h. eine unterschiedliche Lage der Aussteifungen im Grundriss und/oder Aufriss über die Höhe von Gebäuden, sind immer Schwachstellen und führen oft zum Einsturz von Gebäuden. Bei den Versetzungen können auch bei beträchtlichem Mehraufwand vor allem die Biegemomente und Querkräfte der Aussteifungen meist nicht einwandfrei übertragen werden. Versetzungen von Aussteifungen sind deshalb unbedingt zu vermeiden.



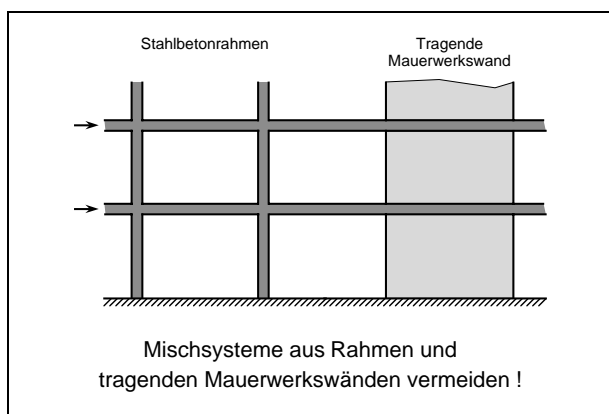
Sprünge bei Steifigkeit und Widerstand sind problematisch!

Sprünge von Steifigkeit und Widerstand der hauptsächlichen Aussteifungen über die Höhe des Tragwerks können zu einem unregelmässigen dynamischen Verhalten und Problemen bei der lokalen Kraftübertragung führen. Eine Vergrößerung von Steifigkeit und Widerstand von unten nach oben (links im Bild) ist wesentlich ungünstiger als umgekehrt. In jedem Fall muss die Bemessung und konstruktive Durchbildung der Übergänge mit grosser Sorgfalt durchgeführt werden.



Mischsysteme aus Rahmen und tragenden Mauerwerkswänden vermeiden!

Gemischte Systeme des Tragwerks mit Teilen als Rahmen und solchen mit tragenden Mauerwerkswänden sind für die Abtragung von Erdbebenkräften denkbar ungeeignet. Auch bei relativ massiven Rahmen werden die Erdbebenkräfte praktisch allein durch die Mauerwerkswände aufgenommen, da sie wesentlich steifer als die Rahmen sind. Wenn die Mauerwerkswände infolge der Erdbebenkräfte versagen, können sie auch die Schwerelasten nicht mehr abtragen, was meist zu einem TotalEinsturz führt.

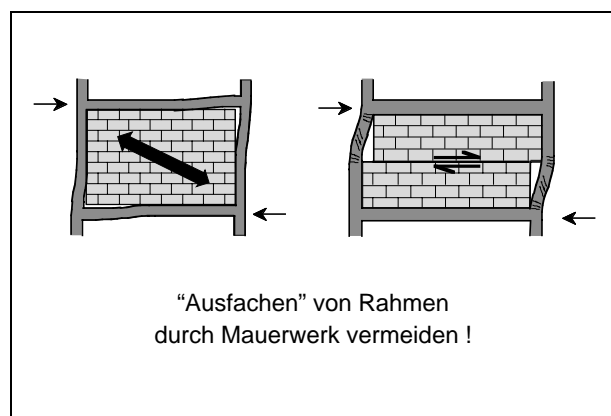


Mischsysteme aus Rahmen und tragenden Mauerwerkswänden sind aber auch bei während der Lebensdauer eines Bauwerks immer häufiger vorkommenden Nutzungsänderungen mit neuen Raumaufteilungen äusserst unflexibel, und sie sollten daher auch aus diesem Grund vermieden werden. Eine konsequente Ausbildung des Tragwerks als Skelettbau mit einigen wenigen horizontal kurzen und über die ganze Gebäudehöhe laufenden Stahlbetontragwänden für die Erdbebenkräfte liegt somit meist auch im längerfristigen Interesse des Bauherrn. Umständliche und teure

Änderungen am Tragwerk können damit vermieden werden.

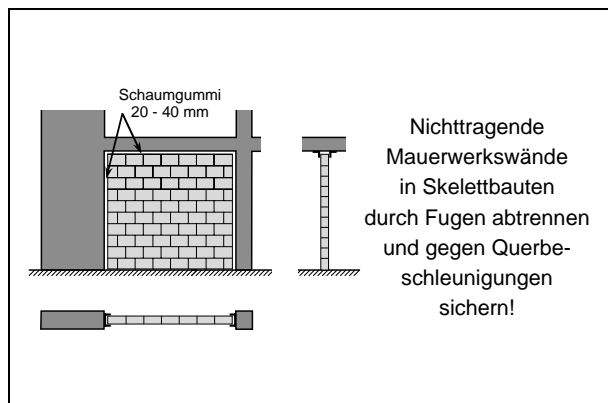
"Ausfachen" von Rahmen durch Mauerwerk vermeiden!

Sogenannte Ausfachungen von Rahmen durch Mauerwerkswände bedeuten eine äusserst ungünstige Kombination von zwei sehr verschiedenen Bauweisen: Rahmen sind weich und mehr oder weniger duktil, Mauerwerk ist steif und zugleich spröde. Am Anfang eines Erdbebens nimmt das Mauerwerk fast die ganzen Erdbebenkräfte auf, aber dann versagt es oft auf schiefen Druck oder durch Gleiten (geringe Reibung infolge mangelnder Auflast). Oder/und das Mauerwerk schert relativ dünne Stützen ab.



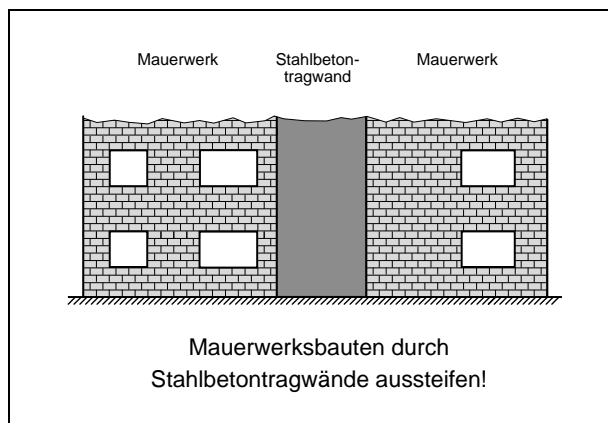
Nichttragende Mauerwerkswände in Skelettbauten durch Fugen abtrennen und gegen Querschleunigungen sichern!

Oft kann es zweckmässig sein, nichttragende Zwischenwände - insbesondere die in ihrer Ebene relativ steifen und spröden nichttragenden Mauerwerkswände - durch Fugen vom Tragwerk abzutrennen und damit vor Schäden bei schwächeren Erdbeben (< Bemessungsbeben) zu schützen. Die Fugen müssen durch einen sehr weichen und zugleich möglichst schallhemmenden Stoff gefüllt werden, z.B. durch Schaumgummi; Kork, Hartschaumstoffe, Fugenkitte usw. sind hingegen zu steif. Die erforderliche Fugendicke hängt von der Steifigkeit des Tragwerks und der Verformungsempfindlichkeit der Zwischenwände sowie vom gewählten Schutzniveau (< Bemessungsbeben) ab. Oft müssen die Zwischenwände auch gegen Querschleunigungen (Plattenwirkung) gesichert werden, z. B. durch Haltewinkel.



Mauerwerksbauten durch Stahlbetontragwände aussteifen!

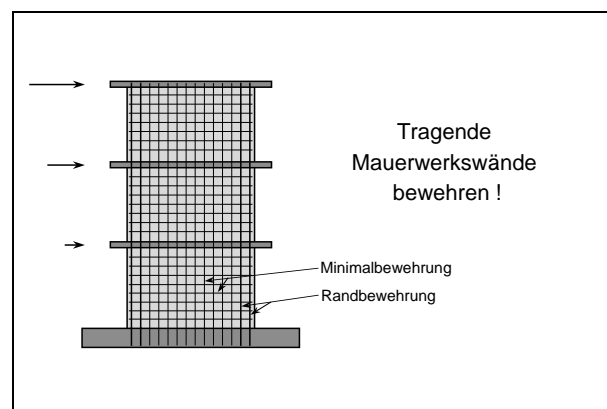
Mauerwerksbauten sind relativ steif. Sie haben meist eine hohe Eigenfrequenz (im Plateaubereich des Bemessungsantwortspektrums der Beschleunigung) und erfahren entsprechend grosse Erdbebenkräfte. Andererseits sind unbewehrte Mauerwerkswände ziemlich spröde und zeigen eine verhältnismässig geringe Energiedissipation. Da bei "reinen" Mauerwerksbauten auch für moderate Erdbebeneinwirkung (z.B. Zone 1 nach SIA 160) meist kein Nachweis einer genügenden Erdbebensicherheit gelingt, müssen unbewehrte Mauerwerksbauten durch kragarmförmige Stahlbetontragwände ausgesteift werden.



Die Stahlbetontragwände müssen genügend steif gestaltet werden (massgebend sind die Wandlänge und der Vertikalbewehrungsgehalt). Sie müssen ihren Anteil an der Erdbebeneinwirkung "elastisch", d.h. ohne Fliessen der Bewehrung, aufnehmen und in die Fundation ableiten können. Die horizontalen Verschiebungen des Bauwerks unter dem Bemessungsbeben dürfen die Bruchverschiebungen der steifsten (längsten) Mauerwerkswände nicht überschreiten.

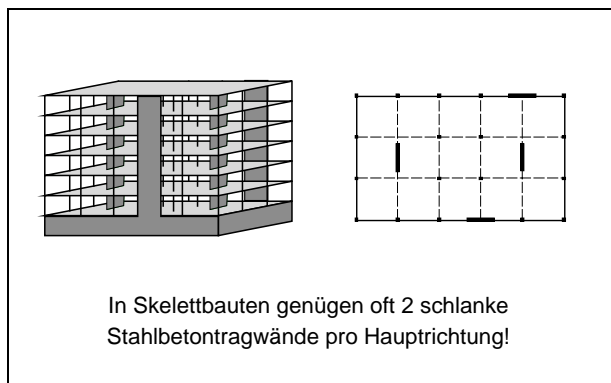
Tragende Mauerwerkswände bewehren!

Eine Alternative zur Aussteifung unbewehrter Mauerwerksbauten durch Stahlbetontragwände ist das Bewehren sämtlicher tragender Mauerwerkswände. In diesen müssen eine vertikale und horizontale Minimalbewehrung und eine verstärkte vertikale Randbewehrung angeordnet werden. Dadurch kann Gleiten in Lagerfugen verhindert und eine gewisse Duktilität ($\mu_{\Delta} \sim 2$) erreicht werden.



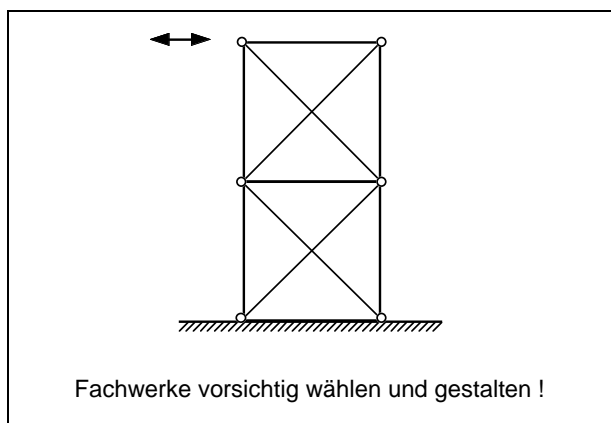
In Skelettbauten genügen oft 2 schlanke Stahlbetontragwände pro Hauptrichtung!

Im Falle mässiger Seismizität mit entsprechend moderaten Bemessungsbeben wie in der Schweiz genügen oft pro Hauptrichtung zwei horizontal kurze und über die ganze Gebäudehöhe laufende Stahlbetontragwände. Dies gilt vor allem bei eher flexiblen oder durch Fugen vom Tragwerk getrennten nichttragenden Zwischenwänden (keine fugenlos eingemauerten Mauerwerkswände). Um Torsioneffekten zu begegnen sollten im Gebäudegrundriss die Wände, was ihre Längsrichtung betrifft, bezüglich der entsprechenden Hauptaxe symmetrisch und die Wände selbst möglichst gegen die Peripherie hin angeordnet werden. Wände an einer Gebäudeecke sind wegen der schwierigeren Abtragung der Reaktionskräfte in den Baugrund möglichst zu vermeiden. Wände mit L-Querschnitt (Winkelwände) und solche mit U-Querschnitt sind meist wesentlich weniger günstig als solche mit Rechteckquerschnitt, da sie bezüglich duktiler Gestaltung zu Schwierigkeiten führen können. Stahlbetonwände mit Rechteckquerschnitt hingegen können mit geringem Mehraufwand sehr duktil ausgebildet werden, womit eine Höhe Erdbebensicherheit für das ganze Gebäude erreicht werden kann.



Fachwerke vorsichtig wählen und gestalten!

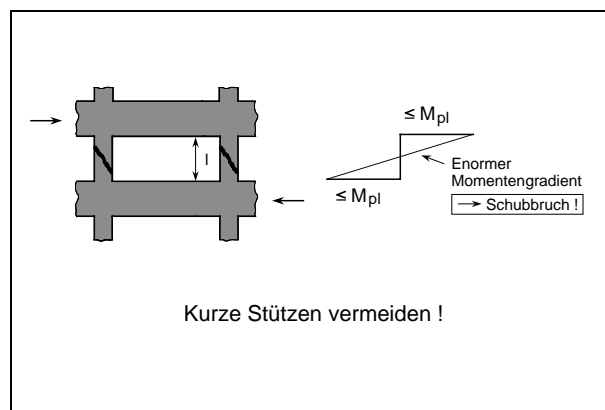
Fachwerke mit den üblichen zentrischen Anschlüssen bei den Knoten zeigen bei zyklischer Beanspruchung oft ein sehr ungünstiges Verhalten. Schlanke Diagonalstäbe fließen unter Zug und werden immer länger, und sie knicken unter Druck. Dadurch nimmt die Steifigkeit des Fachwerks beim Nulldurchgang stark ab, und nach dem Nulldurchgang entstehen dynamische Effekte, die zu einem baldigen Versagen beitragen können. Solche Fachwerke sollen deshalb nur für elastisches Verhalten oder sehr niedrige Duktilität konzipiert werden. Wesentlich besser verhalten sich Fachwerke mit gedrunenen Stäben und exzentrischen Anschlüssen. In jedem Fall ist die Kompatibilität der Verformungen von Fachwerken und anderen tragenden und nichttragenden Bauteilen sorgfältig zu überprüfen.



Kurze Stützen vermeiden!

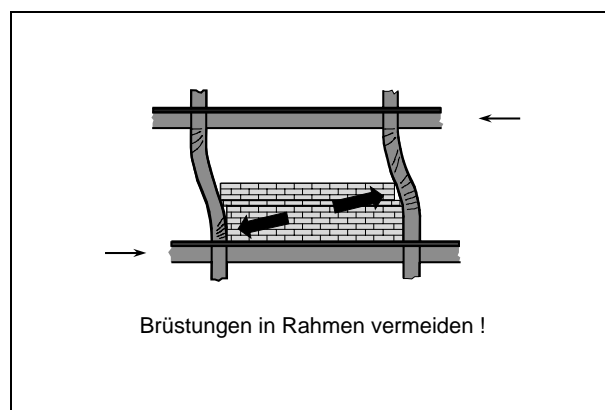
In Rahmen mit starken Riegeln können die Stützen maximal bis zu ihrem plastischen Moment M_{pl} beansprucht werden. Im Falle von kurzen, gedrunenen Stützen ergibt sich ein enormer Momentengradient und somit eine grosse Querkraft, die oft bereits vor dem Erreichen von M_{pl} zu einem

Schubbruch führt (Eine Alternative zum Vermeiden von kurzen Stützen ist eine Schubbemessung und eine konstruktive Durchbildung derselben nach den Regeln der Kapazitätsbemessung).



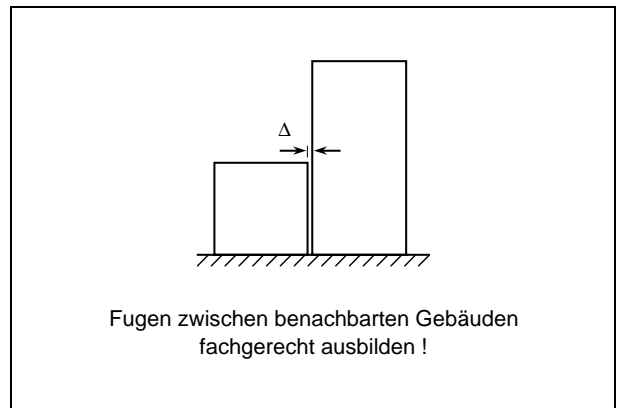
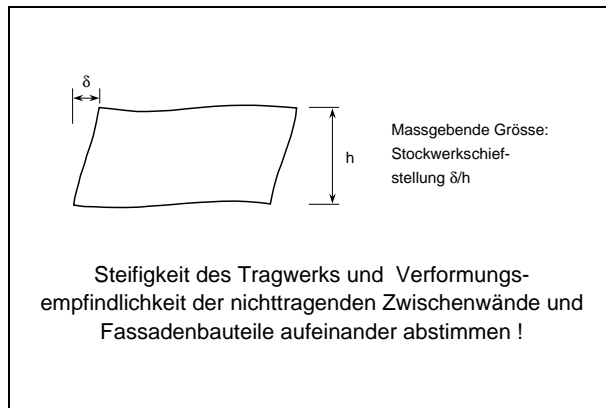
Brüstungen in Rahmen vermeiden!

Das fugenlose Einfügen von Brüstungen in Rahmen bewirkt das Phänomen der kurzen Stützen (siehe Grundsatz oben). Es entsteht ein Schubbruch oder - bei genügender Schubfestigkeit - ein Stützenmechanismus mit wesentlichen Effekten 2. Ordnung (N- Δ -Effekt).



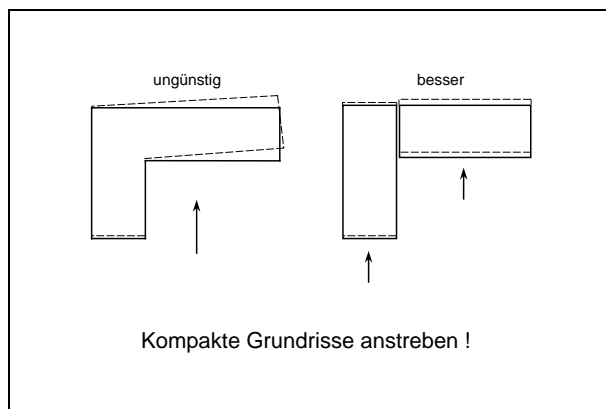
Steifigkeit des Tragwerks und Verformungsempfindlichkeit der nichttragenden Zwischenwände und Fassadenbauteile aufeinander abstimmen!

Werden verformungsempfindliche Zwischenwände und Fassadenbauteile (z.B. aus Mauerwerk) mit einem horizontal weichen Tragwerk (z.B. Rahmen) fugenlos kombiniert, so entstehen bereits bei schwachen Erbeben grosse Schäden. Massgebende Vergleichsgrösse ist die Stockwerkschiefstellung (storey drift), d.h. das Verhältnis der Stockwerksverschiebung δ zur Stockwerkshöhe h.



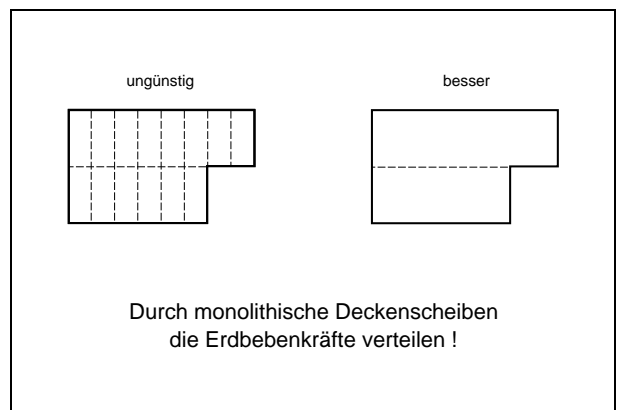
Kompakte Grundrisse anstreben!

Die Teile links und rechts dieses Gebäudes mit stark aufgelöstem Grundriss (Bild) möchten sehr verschieden schwingen, doch behindern sie sich gegenseitig. Dies führt vor allem im Übergangsbereich zu grossen Beanspruchungen. Viel besser ist das Verhalten bei Aufteilung in zwei kompakte Grundrisse durch eine Fuge.



Durch monolithische Deckenscheiben den Zusammenhalt sichern und die Erdbebenkräfte verteilen!

Die Decken müssen in sich kompakt und zudem mit sämtlichen vertikalen Tragelementen zug- und druckfest verbunden sein. Ungünstig sind z.B. Decken aus vorfabrizierten Elementen ohne bewehrten Überbeton (Bild links). Viel besser sind monolithische Decken aus Stahlbeton, die in ihrer Ebene als praktisch starre Scheiben wirken und somit den Querschnitt des kragarmartigen Ersatzstabes erhalten (Diaphragmawirkung).



Fugen zwischen benachbarten Gebäuden fachgerecht ausbilden!

Fachgerecht bedeutet:

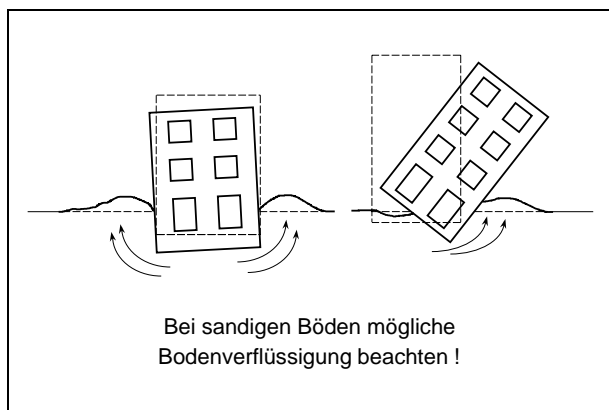
- 1) Die Fugen müssen eine gewisse Mindestbreite haben (Normen);
- 2) Die Fugen müssen leer sein und dürfen keine Kontaktbrücken aufweisen.

Idealerweise kann das Zusammenputschen (pounding) und Gegeneinanderhämmern (hammering) benachbarter Gebäude vermieden werden. Diese sind besonders gefährlich, wenn die Geschosdecken der benachbarten Gebäude auf unterschiedlicher Höhe sind und gegen Stützen stossen.

Bei sandigen Böden mögliche Bodenverflüssigung beachten!

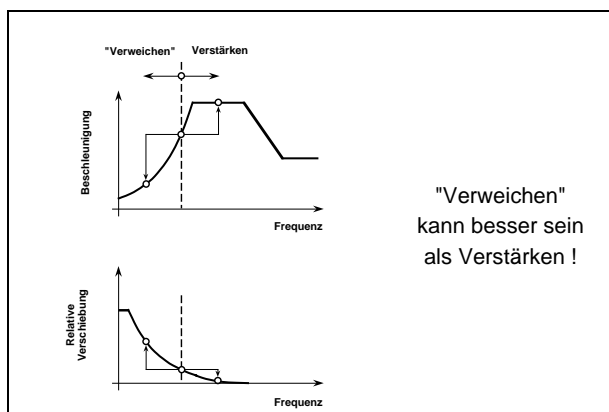
Bestimmte sandige Böden mit eher Höhem Wassergehalt sind für ruhende Lasten sehr fest und tragfähig, aber wenn sie vibriert werden - wie das bei einem Erdbeben geschieht - verhalten sie sich plötzlich wie eine Flüssigkeit. Gebäude können dann absinken oder - bei inhomogenen Boden bzw. ungleicher Verflüssigung - umkippen, was je nach Ausbildung des Tragwerks oft zum TotalEinsturz führt. Eine sorgfältige Untersuchung des Baugrundes und besondere Massnahmen wie Ver-

festigung durch Injektionen, Tieffundation (Pfahlfundation), usw. können dies vermeiden.



"Verweichen" kann besser sein als Verstärken!

Durch eine "Verweichung", (Softening) bzw. Schwächung des Tragwerks - z.B. durch den Einbau von Erdbebengummilagern - kann eine Frequenzverschiebung in den niedrigspektralen Bereich des Bemessungsantwortspektrums der Beschleunigung bewirkt werden. Im Gegensatz zu einer Verstärkung bzw. Versteifung können damit - und oft kombiniert mit einer Erhöhung der Dämpfung - die einwirkenden Erdbebenkräfte (Beschleunigung) drastisch reduziert werden. Andererseits nehmen die Relativverschiebungen stark zu.



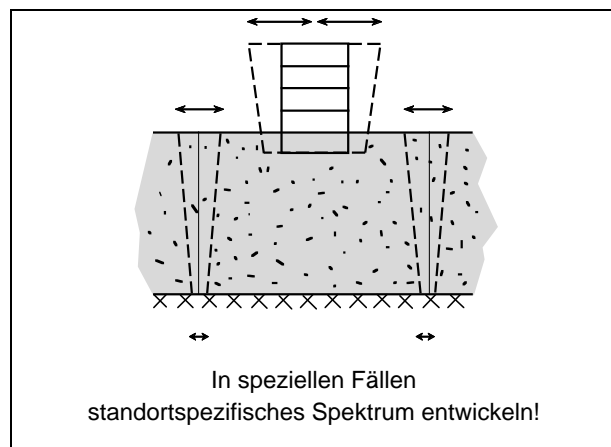
4 GRUNDSÄTZE ZU BERECHNUNG UND BEMESSUNG

Die folgenden Grundsätze zu Berechnung und Bemessung betreffen vorwiegend anspruchsvolle Spezialgebiete des Bau- und Erdbebeningenieurwesens, sie können aber auch für den Architekten von Bedeutung sein.

In speziellen Fällen standortspezifisches Spektrum entwickeln!

Die lokalen Bodenverhältnisse können erhebliche Besonderheiten bei den zu erwartenden Bodenbewegungsgrößen und 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 einigen Tälern mit alluvialen oder glazialen Auffüllungen (Verhältnis Tiefe zu Breite grösser als etwa 0.2)
- allgemein bei Verdacht auf Resonanz zwischen Boden und Bauwerk

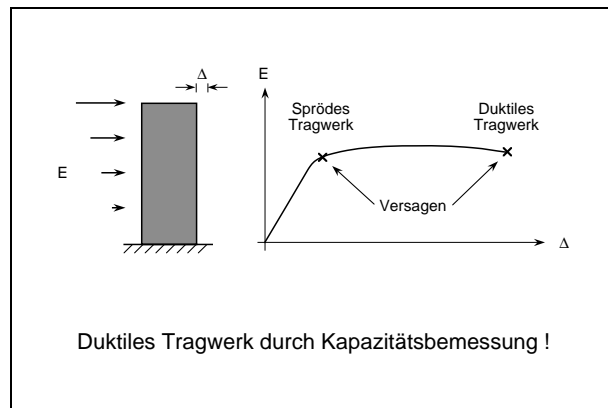


In solchen Fällen neigt der Boden auch bei schwächeren Erdbeben zu ausgeprägten Eigenschwingungen und entsprechenden Amplifikationen der Bodenbewegungen. Deshalb sind spezielle Untersuchungen erforderlich. Sofern noch keine Mikrozonierung mit zugehörigen Spektralwerten (Antwortspektren) vorliegt, müssen die vorherrschende Eigenfrequenz des Bodens ermittelt und ein standortspezifisches Bemessungsantwortspektrum (Beschleunigungs- und Verschiebungsspektrum) entwickelt werden.

Duktiles Tragwerk durch Kapazitätsbemessung!

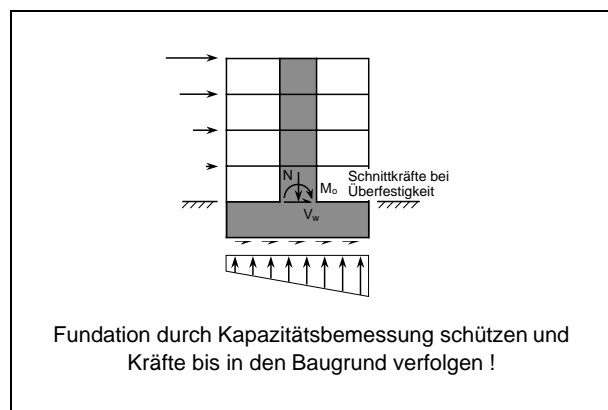
Das Tragwerk eines Hochbaus soll immer duktil, d.h. im plastischen Beanspruchungsbereich stark verformungsfähig gestaltet werden. Dies gilt meist auch für den Extremfall, wo der Tragwiderstand so gross ist, dass das Bemessungsbeben "elastisch" überstanden werden kann. Denn Erdbeben können wesentlich stärker als das Bemessungsbeben sein! Die Methode der Kapazitätsbemessung bietet hierfür ein einfaches und effizientes Verfahren. Damit kann die Sicherheit gegen Einsturz ohne nennens-

werte Mehrkosten wesentlich (Faktor 2 - 4) erhöht werden.



Foundation durch Kapazitätsbemessung schützen und Kräfte bis in den Baugrund verfolgen!

Die Foundation muss gemäss den Grundsätzen der Kapazitätsbemessung die Überfestigkeits-Schnittkräfte des Oberbaus aufnehmen und ohne Fließen auf den Baugrund übertragen können. Foundationen sollten immer elastisch bleiben und somit keine plastischen Bereiche entwickeln können, da diese im Allgemeinen zu einem unübersichtlichen Verhalten mit grossen zusätzlichen Verschiebungen des Oberbaus führen. Auch sind Reparaturen in der Foundation meist erheblich schwieriger auszuführen als im Oberbau. Und Überbeanspruchungen und plastische Verformungen des Bodens sind unbedingt zu vermeiden.



5 GRUNDSÄTZE ZUR KONSTRUKTIVEN DURCHBILDUNG

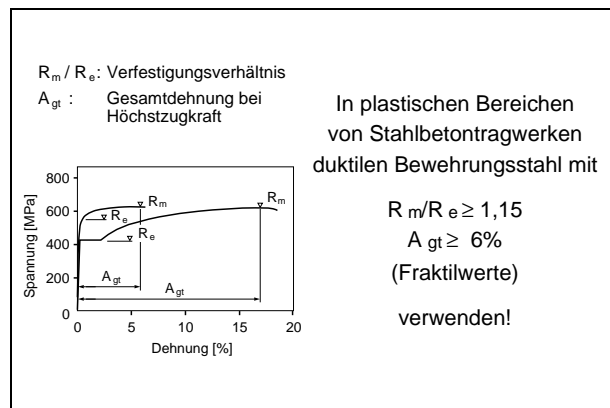
Die folgenden Grundsätze behandeln wichtige Aspekte der konstruktiven Durchbildung von Tragwerk und nichttragenden Bauteilen wie auch

von Installationen (Haustechnik) und Einrichtungen. Sie betreffen in manchen Fällen sowohl den Bauingenieur als auch den Architekten.

In plastischen Bereichen von Stahlbetontragwerken duktilen Bewehrungsstahl mit $R_m/R_e \geq 1.15$ und $A_{gt} \geq 6\%$ (Fraktilwerte) verwenden!

In Europa hat ein wesentlicher Teil des auf dem Markt erhältlichen Bewehrungsstahls - vor allem bei kleinen Stabdurchmessern - schlechte Duktilitätseigenschaften. Um eine "mittlere Duktilität" der Stahlbetontragwerke erreichen zu können, muss - nebst andern Massnahmen - der Bewehrungsstahl in den plastischen Bereichen mindestens die folgenden Anforderungen erfüllen (Fraktilwerte):

- Verfestigungsverhältnis Zugfestigkeit $R_m = f_t$ zu Fließgrenze $R_e = f_y$: $R_m/R_e \geq 1.15$
- Gesamtdehnung bei Höchstzugkraft: $A_{gt} \geq 6\%$



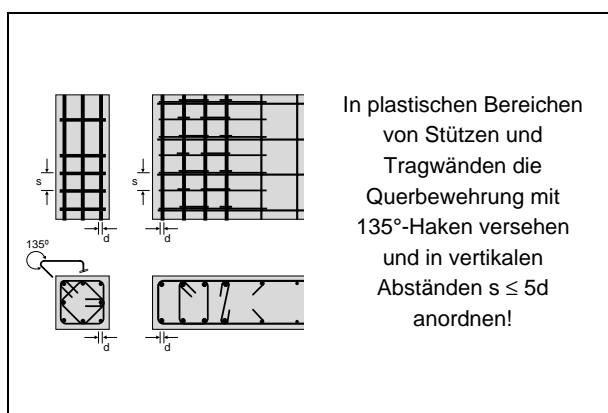
Bezeichnungen wie "Bewehrungsstahl gemäss Norm SIA162" oder "Erfüllt die Normanforderungen" genügen nicht und sind irreführend, weil die derzeit gültigen relevanten Normbestimmungen selbst ungenügend sind.

Es ist dringend zu empfehlen, vor dem Einbau des Bewehrungsstahls entsprechende Prüfungen durchzuführen.

In plastischen Bereichen von Tragwänden und Stützen die Querbewehrung mit 135°-Haken versehen und in Abständen $s \leq 5d$ anordnen!

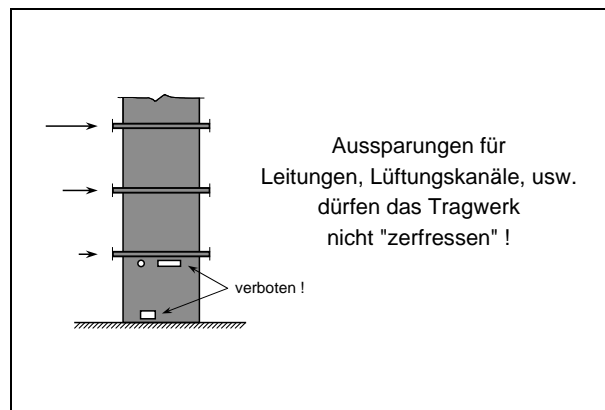
In plastischen Bereichen von Tragwänden und Stützen aus Stahlbeton (plastische Länge L_p) müssen die vertikalen Bewehrungsstäbe gegen Ausknicken unter Druckkräften stabilisiert werden und manchmal muss zudem auch der Beton umschnürt

werden, damit höhere Druckstauchungen möglich sind. Die erforderliche Querbewehrung - Stabilisierungs- und Umschnürungsbewehrung aus Bügeln und Verbindungsstäben - muss mit 135°-Haken verankert werden; 90°-Haken genügen nicht, was sich bei praktisch jedem Schadenbeben erneut wieder zeigt. Der verhältnismässig kleine erforderliche vertikale Abstand der Bügel und Verbindungsstäbe $s \leq 5d$ (d = Stabdurchmesser des stabilisierten Stabes) ist eine Folge der oft schlechten Duktilitätseigenschaften (kleines Verfestigungsverhältnis R_m/R_e) der europäischen Bewehrungsstähle, die zu einem ungünstigen Knickverhalten führen.



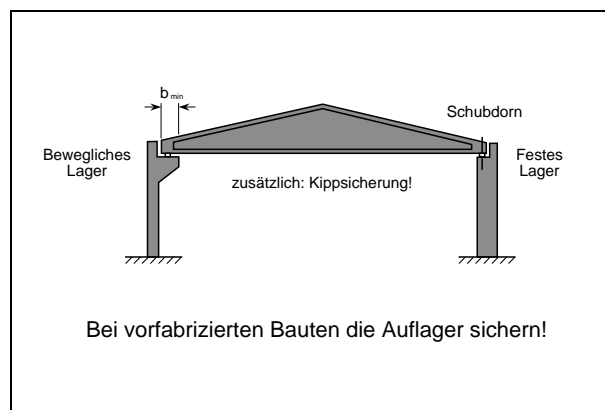
Aussparungen für Leitungen, Lüftungskanäle usw. dürfen das Tragwerk nicht "zerfressen"!

Auf manchen Baustellen besteht die Tendenz, Elemente für Aussparungen für Leitungen, Lüftungskanäle usw. ungeplant, d.h. ohne eingehende Absprache mit dem Bauingenieur, in die Schalung von hochbeanspruchten Teilen des Tragwerks einzulegen oder gar nachträglich herauszuspitzen. Dies kann zum Ruin sorgfältig geplanter Tragelemente (z.B. Wände, Stützen) und zu entsprechenden gravierenden Sicherheitsproblemen führen. Aussparungen müssen in enger Zusammenarbeit mit dem Bauingenieur geplant und in entsprechenden Aussparungsplänen festgehalten sowie auf der Baustelle sorgfältig kontrolliert werden.



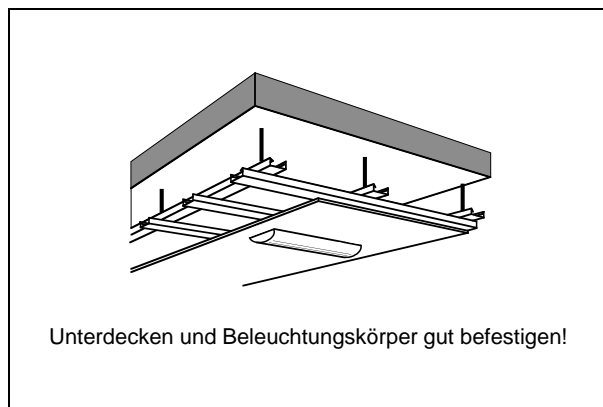
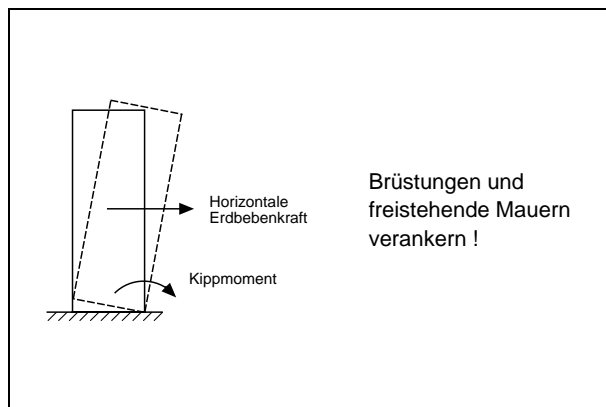
Bei vorfabrizierten Bauten die Auflager sichern!

Bei beweglichen Lagern muss eine minimale Auflagerlänge b_{min} (Normen) und bei festen Lagern müssen kräftige Schubdorne angeordnet werden. Zusätzlich müssen die Träger vor allem bei den Lagern gegen seitliches Kippen gesichert werden.



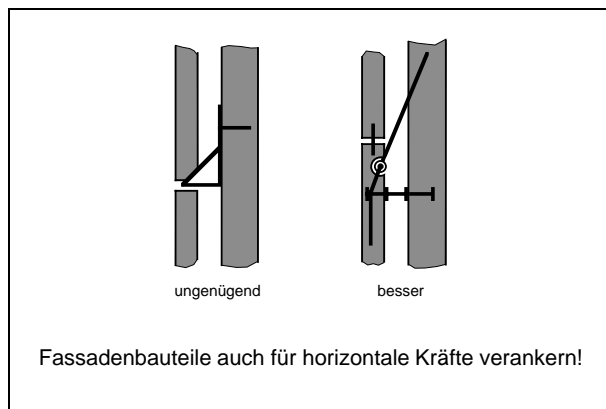
Brüstungen und freistehende Mauern verankern!

Horizontale Erdbebenkräfte bewirken immer ein Kippmoment. Wenn keine oder keine genügende Verankerung vorhanden ist, stürzt der Gegenstand um.



Fassadenbauteile auch für horizontale Kräfte verankern!

Fassadenbauteile dürfen nicht nur einfach auf Konsolen gestellt werden, da bei einem Erdbeben durch horizontale und vertikale Beschleunigungen die Reibung aus Schwerkraft überwunden werden kann. Die Verankerungen der Fassadenbauteile müssen deshalb auch für die horizontale Stockwerksbeschleunigung bemessen werden.

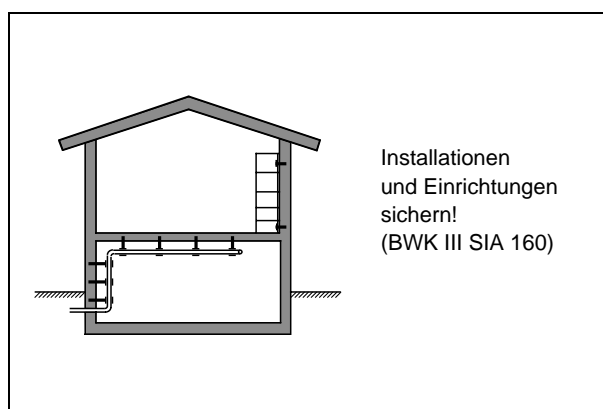


Unterdecken und Beleuchtungskörper gut befestigen!

Immer wieder kommt es vor, dass Unterdecken (ceiling) und Beleuchtungskörper herabfallen und Personen gefährden. Z.B. können Deckenverkleidungen, die nur an dünnen Drähten hängen, ein erhebliches Personenrisiko darstellen. Und schlecht befestigte oder bloss in die Decke hineingesteckte Beleuchtungskörper können ebenfalls leicht abstürzen.

Installationen und Einrichtungen sichern!

Die Sicherung von Installationen und Einrichtungen ist besonders wichtig bei im Katastrophenfall überlebenswichtigen Infrastrukturbauten, z.B. Spitäler, Feuerwehrgebäude, Kommandozentralen usw., die auch bei einem schweren Erdbeben funktionstüchtig bleiben müssen (Bauwerksklasse BWK III gemäss SIA160). Z.B. sollen Rohrleitungen und Schränke auf zweckmässige Weise befestigt werden.



6 FOLGERUNGEN

Für den erdbebengerechten Entwurf von Hochbauten ist es von entscheidender Bedeutung, dass Architekt und Bauingenieur vom frühesten Entwurfsstadium an eng zusammen arbeiten. Dadurch können meist erhebliche Mehrkosten und ein trotzdem entstehendes unzulängliches Flickwerk vermieden werden. Vor allem beim Entwurf des Tragwerks und bei der Wahl der nichttragenden Bauteile - Zwischenwände, Fassadenbauteile - sowie bei der konstruktiven Durchbildung sollten wichtige einfache Grundsätze beachtet werden, und bei der Berechnung und Bemessung durch den Bauingenieur

eur müssen moderne Methoden (verformungsorientierte Kapazitätsbemessung) angewendet werden. Auf dieser Basis ergeben sich bei massiger seismischer Einwirkung für die Erdbebensicherung der Hochbauten im Allgemeinen keine oder nur unwesentliche Mehrkosten.

LITERATUR

- Bundesamt für Zivilschutz: "Katastrophen und Notlagen in der Schweiz, eine vergleichende Übersicht (KATANOS)". Bern, 1995.
- Schweizerischer Pool für Erdbebenversicherung: "Erdbebenszenarien Schweiz". Untersuchungsbericht, Bern 1988. Kurzfassung im 10. Geschäftsbericht, Bern 1988.
- Bachmann H., Darbre G.R., Deichmann N., Koller M.G., Studer J.A., Tiniç S., Tissières P., Wenk T., Wieland M., Zwicky P.: "Handlungsbedarf von Behörden, Hochschulen, Industrie und Privaten zur Erdbebensicherung der Bauwerke in der Schweiz". SGE/SIA-Dokumentation DO150, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich, 1998.
- Paulay T., Bachmann H., Moser K.: "Erdbebenbemessung von Stahlbetonhochbauten". Birkhäuser Verlag Basel, Boston, Berlin, 1990.
- Paulay T., Priestley M.J.N.: "Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings". John Wiley & Sons, Inc., New York, 1992.
- Bachmann H.: "Erdbebensicherung von Bauwerken". Birkhäuser Verlag Basel, Boston, Berlin, 1995.
- Studer J., Koller M.: "Bodendynamik". 2. Auflage. Springer Verlag Berlin, Heidelberg, 1997.
- Wenk T., Lacave C., Peter K.: "Adana-Ceyhan, Turquie, séisme du 27 juin 1998". Ingénieurs et architectes suisses, No. 21, 1998. Auch Sonderdruck Nr. 0021, Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, November 1998.
- Studer J. et al: "Erdbeben in der Westtürkei vom 17. August 1999". Schweizer Ingenieur und Architekt, Nr. 43, 1999.
- Zimmerli B., Schwartz J., Schwegler G.: "Mauerwerk - Bemessung und Konstruktion". Birkhäuser Verlag Basel, Boston, Berlin, 1999.