



*Dr. Anton Steurer
Professor
ETH Zürich / Hochschule für
Technik Zürich
Zürich, Schweiz*

Wie und wo kommt es zu Erdbeben? Ein europäischer Überblick

**How and where do earthquakes
occur? – European overview**

**Come e dove nasce un terremoto?
– Un panorama europeo**

Dokument in Deutsch

Wie und wo kommt es zu Erdbeben? Ein europäischer Überblick

1 Einleitung

Das Bewusstsein um die Bedeutung der Naturgewalt „Erdbeben“ für die Konzeption und Durchbildung von Bau- und Tragwerken hat weltweit stark zugenommen. In Mitteleuropa wurde das Erdbebenrisiko bis vor kurzem stark unterschätzt. Heute weiß man, dass beim Wiederauftreten früherer Beben - was jederzeit möglich ist - mit enormen Schäden zu rechnen ist.

Die Normen erfassen daher neu bzw. verstärkt die Bemessungssituation Erdbeben. Welche Bedeutung dem Erdbeben zukommt äußert sich auch darin, dass in der Reihe der Eurocodes eine eigene Norm, der EC 8 [1], sich diesem Thema widmet. Die Erkenntnisse der Erdbebenwissenschaften und in der Folge die zunehmende Gewissheit, dass ein Erdbeben und somit die Einwirkung *Erdbeben* auch in unseren Breitengraden Realität sein kann, hat das Bewusstsein für diese außergewöhnliche Einwirkung geschaffen und verstärkt.

Die Frage für den Holzbau stellt sich somit nicht mehr, ob ein Erdbeben auftritt, sondern in welcher Stärke und welche Anwendungsbereiche für die Holzkonstruktionen kritisch sind. Es interessieren also mehr die Fragen worauf im speziellen zu achten ist, welche Maßnahmen auf der Hand liegen und geeignet sind den Beanspruchungen aus Erdbeben zu genügen. Im Nachfolgenden werden die Zusammenhänge zu den Ursachen und Wirkungen von Erdbeben und die daraus hergeleiteten konstruktiven Überlegungen für den Holzbau vereinfacht und stichwortartig erläutert und dargestellt.

2 Entstehung, Vorkommen und Wertung

Ist das Thema „Erdbebensicherung von Bauwerken“ nur akademisch? Stellt sich diese Frage für uns Holzbauer in Mitteleuropa tatsächlich? Um diese Frage zu beantworten, ist vorab die Auseinandersetzung mit einigen grundsätzlichen Fakten erforderlich.

2.1 Die Kontinente bewegen sich

Fakt ist, dass sich die Kontinente bewegen und zwar im Schnitt mit mehreren Zentimetern pro Jahr – voneinander weg, aneinander vorbei oder aufeinander zu. Die harte Oberflächenschale der Erde (Lithosphäre), welche rund 30 bis 100 km mächtig ist, besteht aus 7 großen Teilen und einer Vielzahl von kleinen Bruchstücken. Diese Platten werden durch Strömungen im Erdinneren bewegt, vergleichbar mit Treibeis. Im Erdinneren „strömt“ teilweise aufgeschmolzenes Gestein, wie in zähflüssigem Honig. Die Platten schwimmen gewissermaßen auf dem weichen Erdinneren und sind infolge geothermischer Strömungen dauernd in Bewegung.

Die Platten bewegen sich über menschliche Zeiträume betrachtet praktisch in konstanter Geschwindigkeit. In ihrem Kontaktbereich bewegen sie sich aber nicht kontinuierlich und gleichmäßig, meist „klemmt“ es in kleineren oder größeren Bereichen der Plattengrenzen. Die Verschiebungen erfolgen vorerst kontinuierlich und langsam und ergeben elastische Verformungen sowie Kriech- und Fließverformungen, wodurch sich der Spannungszustand in der Erdkruste ständig verändert. Erreichen diese Spannungen die Bruchfestigkeit im Gestein, so ereignet sich ein Bruch mit plötzlichen Verschiebungen.

Dabei kommt es zum Abbau von Spannungen und zur Entspannung durch ruckartige Bewegungen. Mit diesen ruckartigen Bewegungen werden Erdbebenwellen freigesetzt. Diese sog. tektonischen Vorgänge machen rund 90% der Beben aus. Daneben können Beben auch durch vulkanische Einwirkung (vulkanische Beben), Einsturz von Hohlräumen (Einsturzbeben), das erstmalige Auffüllen eines Stausees (Stauseeinduziertes Beben) oder durch Explosionen (künstliche Beben) ausgelöst werden.

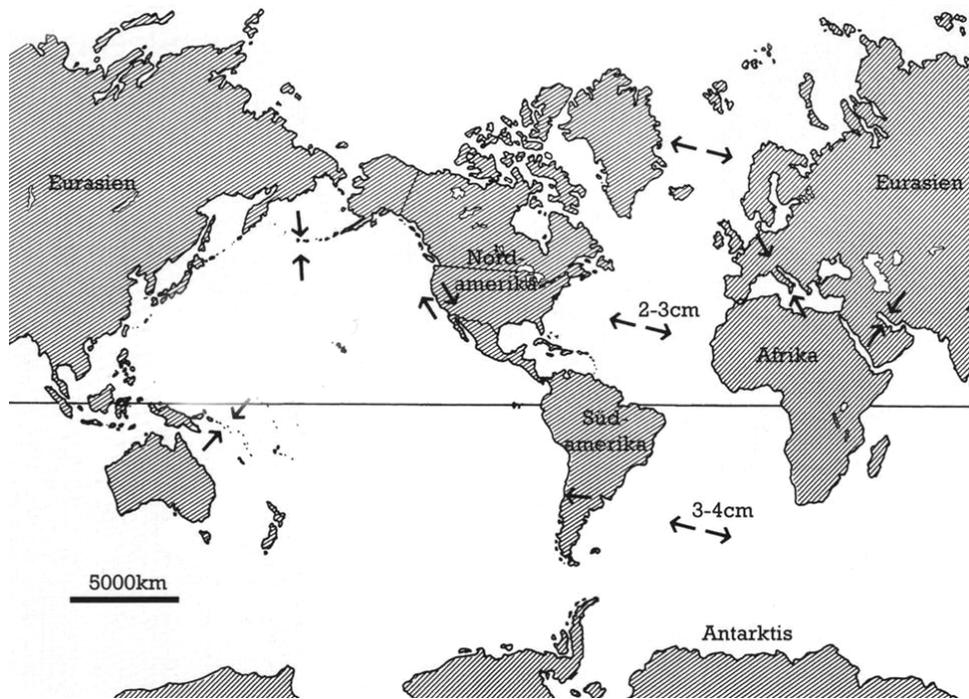


Abbildung 1: Die Kontinente bewegen sich unablässig zwischen 2 bis 16 cm jährlich, aufeinander zu, aneinander vorbei oder aufeinander zu

2.2 Erdbebenaktivität – Erdbebengefährdung

Die Erdbebenaktivität in Mittel- und Südeuropa werden zur Hauptsache von den kompressiven tektonischen Aktivitäten im Bereich der afrikanisch-eurasischen Plattengrenzen verursacht. Dies erklärt die Unterschiede in der Häufigkeit und Intensität der Beben innerhalb des Kontinents, was ein Süd-Nord-Gefälle ergibt mit der höchsten Aktivität in Südeuropa (Italien, Griechenland), vermindert im Alpenraum und der geringsten in Nordeuropa (vgl. Abb. 2).

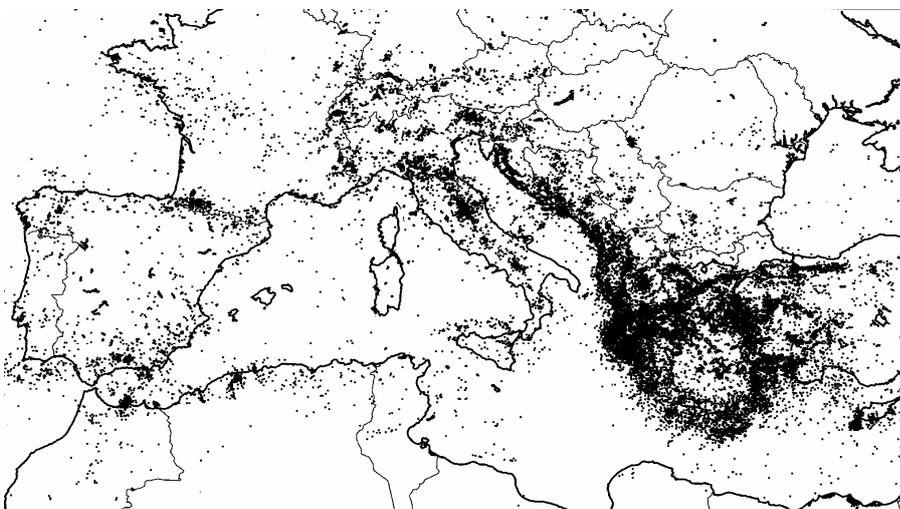


Abbildung 2: Registrierte Erdbeben im Mittelmeer- und Alpenraum in den letzten 30 Jahren [2]

Generell ist die Erdbebengefährdung in Mitteleuropa im weltweiten Vergleich gering bis mittel, jedoch nicht überall gleich groß. Die relativ geringe Erdbebenaktivität in Deutschland, Österreich und der Schweiz im vergangenen 20. Jahrhundert ist zur irrigen „Gewissheit“ etabliert, dass generell nur schwache Erdbeben zu erwarten seien. Dementsprechend wird die Erdbebengefährdung allgemein unterschätzt. Statistisch jedoch muss in der Schweiz, Österreich und Süddeutschland ungefähr alle zehn Jahre mit einem Erdbeben gerechnet werden, welches kleinere Schäden, und alle Hundert Jahre mit einem solchen, welches große Schäden verursacht.

Eine durch den Schweizerischen Pool der Erdbebenversicherungen erarbeitete Studie [3] zeigt, dass im Eintretensfall mit enormen Schäden zu rechnen ist. Die Schätzungen bei einer Wiederholung des sog. „Basler“-Bebens vom Jahre 1356 ergeben Schadenskosten an Gebäuden (abhängig der zugrunde gelegten Szenarien) zwischen 9 Mrd. und 31 Mrd. Euro.

Unter Berücksichtigung der hohen Besiedlungsdichte, des hohen Industrialisierungsgrades, der umfangreichen Bausubstanz und der vor allem im letzten Jahrhundert intensivierten Bebauung auch von Gebieten mit ungünstigem Erdbebenverhalten ergibt sich, trotz beschränkter Seismizität, ein beträchtliches Erdbeben- und Schadensrisiko in Mitteleuropa, welches volkswirtschaftlich und bautechnisch keinesfalls vernachlässigt werden darf.

2.3 Wertung von Erdbeben

Was wir als Schütteln bei einem Beben wahrnehmen, muss für eine wissenschaftliche Betrachtung und schließlich für die Grundlage einer rechnerischen Analyse technisch fass- und bewertbar gemacht werden. Hierzu bestehen heute vom Prinzip her zur Charakterisierung von Beben zwei Maßstäbe bzw. zwei Verfahren:

- Intensitätsskala
- Magnitudenskala

Intensitätsskala

Diese Beurteilung geht von typischen Auswirkungen des Bebens auf die Menschen, Bauwerke und Umwelt aus. Die Intensitätsskala ist ein Maß der Wahrnehmung und der lokalen Zerstörungskraft eines Bebens. Eine Intensitätsangabe bezieht sich somit immer nur auf ein Gebiet (Ortschaft, Region), in welchem sich die gemachte Angabe aus den spezifischen, vor Ort beobachteten Auswirkungen ergibt. Der Wert wird statistisch ermittelt und beruht auf möglichst vielen Beobachtungen innerhalb dieses Gebietes. Ein Vorteil dieser Vorgehensweise besteht darin, dass auch historische Beben, welche auf früheren Aussagen und Beobachtungen basieren, klassier- und bewertbar sind.

Es gibt verschiedene Intensitätsskalen: Rossi-Forel, Mercalli, Japan hat eine eigene (JMA-Skala), Medvedev und EMS-98. Die letztgenannte „Europäische Makroseismische Skala 1998“ unterscheidet in 12 Stufen zwischen *I = nicht fühlbar* bis *XII = vollständig verwüstet* (nahezu alle Bauwerke zerstört, was in der nachfolgend beschriebenen Magnitudenskala in etwa der Magnitude 8 bis 9 entspricht).

Magnitudenskala (Richterskala)

Technisch gesehen sind die Bewegungen bzw. Bodenbeschleunigungen während des Bebens praktisch die einzigen direkten technischen „Fingerabdrücke“ des Bebens. Die Registrierung der Bodenbeschleunigungen lässt sich mit sog. Seismographen erfassen, welche horizontale und vertikale Bewegungen in drei zueinander senkrecht stehenden Richtungen aufzeichnen. Aus den Aufzeichnungen lässt sich die Magnitude errechnen, welche das Maß der Energie ausdrückt, die im Erdbebengebiet frei gesetzt wurde. Oftmals hört man von „der nach oben offenen Richterskala“, was theoretisch stimmt. In der Praxis sind allerdings beliebig große Magnituden nicht möglich, da die Energie begrenzt ist, die Beben freisetzen.

Auch die härtesten Gesteine können nur bis zu einer bestimmten Grenze Energie speichern, womit Bruchflächen nicht unbegrenzt und der Versetzungsbetrag dementsprechend nicht beliebig groß sein können.

Die Magnituden- oder Richterskala ist logarithmisch. Dies bedeutet, dass bei einer Zunahme der Magnitude von beispielsweise 6.8 auf 7.1, die Bodenbewegung und die freigesetzte Energie um den Faktor zwei größer werden. Es braucht somit zwei Beben der Stärke 6.3, um gleich viel Energie freizusetzen wie bei einem der Magnitude 6.5.

Tabelle 1: Vergleich zwischen zugetragener Erdbeben und zugehöriger Magnitude nach [4]

Erdbeben	Magnitude M
gerade noch spürbar	1 - 2
Beben auf der Schwäbischen Alp 1978	5.7
Beben im Vispताल im Wallis (CH) 1855	~ 6
stärkstes im mittleren Alpenraum zu erwartendes Beben	~ 7
Seebeben im indischen Ozean (1994)	9.3
stärkstes je registriertes Beben (Chile 1960)	9.5
stärkstes theoretische mögliches Beben	~ 10

2.4 Erdbebengefährdung für die D-A-CH Staaten

Um die Erdbebengefährdung abschätzen zu können, wurde aufgrund der Beobachtungen und Beurteilung der vergangenen Beben im Jahre 1994 von Deutschland (D), Österreich (A) und der Schweiz (CH) die DACH - Erdbebengefährdungskarte erstellt.

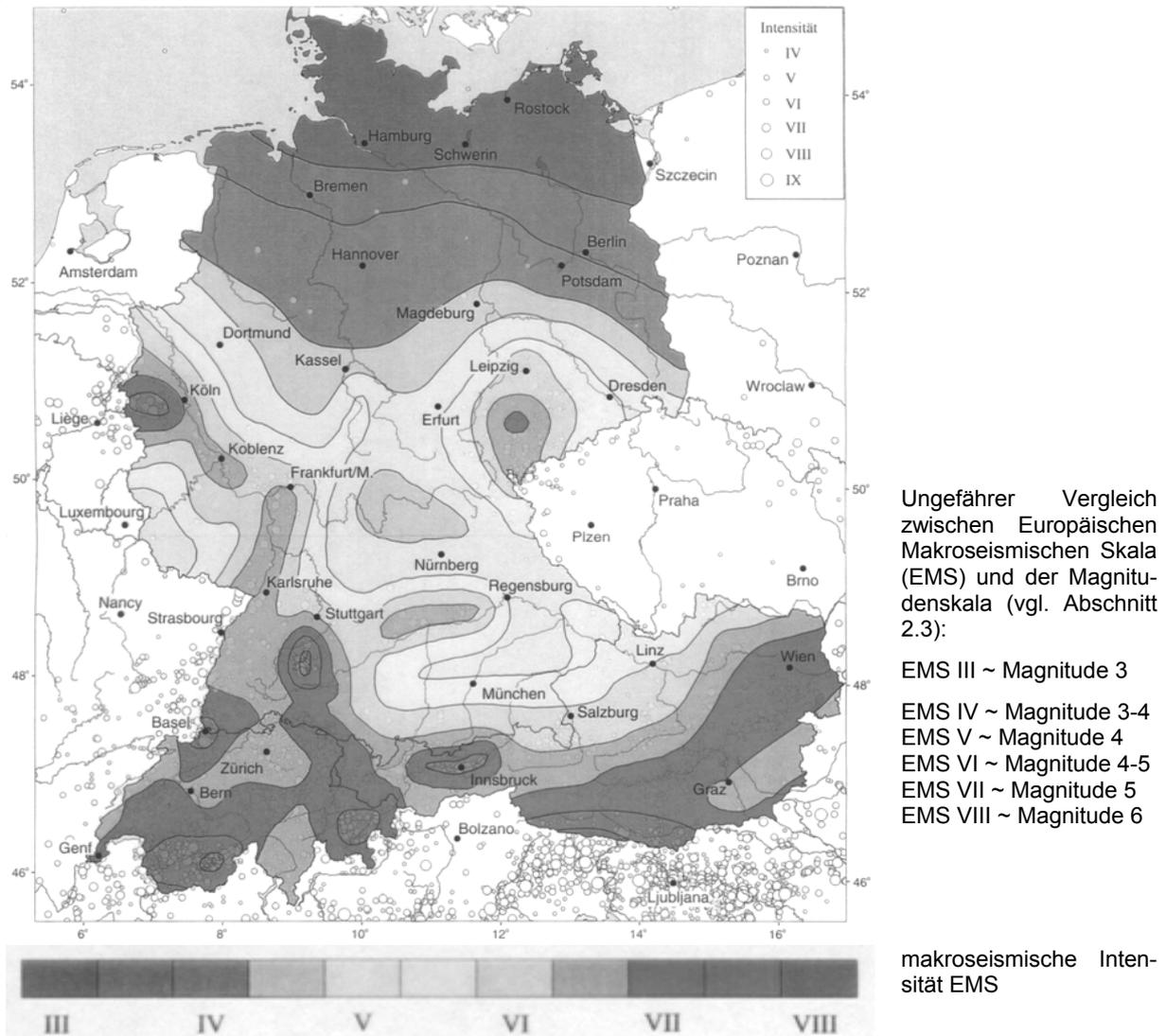


Abbildung 3: Karte der Erdbebengefährdung für die D-A-CH Staaten für eine Ereignis - Wiederkehrperiode von 475 Jahren

Diese Karte gibt die Gefährdung in Form berechneter Intensitätswerte für eine Nichtübertretenswahrscheinlichkeit von 90% in 50 Jahren an. Im aufgerechneten Maßstab bedeutet dies, dass die angegebene Stärke (nach der Intensitätsskala) einem Erdbeben entspricht, welches durchschnittlich alle 475 Jahre auftritt, was letztlich dann die Grundlage für die Festlegung der entsprechenden Bemessungseinwirkung bildet.

3 Was geschieht mit den Tragwerken beim Erdbeben?

Bei einem tektonischen Erdbeben werden durch ruckartige 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 Bauwerkes und erzeugen dort gemischte Bodenbewegungen.

3.1 Welche Bodenbewegungen?

Der Boden bewegt sich rasch in alle Richtungen; horizontal hin und her wie auch vertikal auf und ab. Die vertikalen Bewegungen sind in der Regel meist geringer als die horizontalen. Bei den stärksten zu erwartenden Beben in Mitteleuropa können Horizontal-Beschleunigungen von 0.3 bis 0.5 g (3 bis 5 m/s²) auftreten und dies über eine Dauer von etwa 10 bis 20 Sekunden. Die vertikale Bodenbeschleunigung liegt in der Regel etwas tiefer und beträgt in etwa $\frac{1}{3}$ bis $\frac{2}{3}$ der horizontalen Beschleunigung. Die horizontale Amplitude, d.h. die horizontale Verschiebung kann dabei ohne weiteres 10 bis 30 cm ausmachen.

3.2 Was geschieht mit dem Tragwerk?

Der anstehende Baugrund und der Fundationskörper des Tragwerks sind ein Gesamtsystem und werden entsprechend interaktiv durch das rasche hin und her Bewegen des Bodens erfasst und mitbewegt. Die auf der Foundation aufgebauten Tragwerke werden aufgrund unterschiedlicher Massenträgheit in Schwingungen mit resonanzähnlichem Charakter zwischen Bauwerk und Boden versetzt.

Wesentlich für die Wirkung auf das Tragwerk sind neben der Erdbebendauer die Zeitverläufe der drei Bodenbewegungsgrößen Bodenbeschleunigung (a_g), Bodengeschwindigkeit (v_g) und Bodenverschiebung (d_g). Diese Größen können ortsgebunden sehr stark streuen. Sie hängen von der Distanz, Richtung, Tiefe und dem Mechanismus des Bebenherds sowie vor allem von den lokalen Bodenverhältnissen ab. Insbesondere bei weicheren Böden können im Vergleich zu hartem Gestein erhebliche lokale Aufschaukelungen erfolgen.

3.3 Antwort des Tragwerks

Die durch das Erdbeben hervorgerufenen horizontalen und vertikalen Bewegungen verursachen im Tragwerk bzw. Bauwerk dynamische Beanspruchungen. Die Größe der Einwirkungen und die daraus hervorgehende Antwort des Tragwerks hängen im Wesentlichen von folgenden Gegebenheiten ab:

- Intensität des Bebens bzw. Größe der daraus resultierenden Bodenbewegungsgrößen (Beschleunigung, Geschwindigkeit und Verschiebung) am Standort des Bauwerks
- Baugrundverhältnisse (Aufbau und Zusammensetzung des Bodens, weicher oder steifer Boden)
- Grundrissanordnung, Tragwerkausbildung, Materialwahl, Masse und Steifigkeit (Eigenschwingung) des Bauwerks
- Dämpfungsmaß des Bauwerks
- Konstruktive Detailausbildung
- Aussteifungskonzept
- Duktilität der Tragstruktur

Wie zu erwarten ist, wird das Verhalten des Tragwerks bereits im Entwurfsprozess seitens des Architekten in der gestalterischen und funktionalen Auslegung und seitens des Ingenieurs im konzeptionellen Entwurf vom Tragwerk und der Wahl der nichttragenden Bauteile (vor allem der Zwischenwände und Fassadenbauteile) nachhaltig beeinflusst und festgelegt.

4 Rechnerische Abbildung der Einwirkung „Erdbeben“ - mögliche Tragwerksanalyse

Unweigerlich stellt sich auch die Frage, wie im Fall der Erdbebeneinwirkung unter den genannten Vorgaben die Einwirkung abgebildet und die Berechnung der Schnittkräfte und der Verformungen bzw. die Tragwerksanalyse schließlich geführt werden kann? Hierfür zählen die nachfolgend zwei aufgeführten Verfahren zu den wichtigsten [4]:

- Ersatzkraftverfahren
- Antwortspektrenverfahren

Die größten Vereinfachungen der tatsächlich komplexen Verhältnisse werden beim Ersatzkraftverfahren gemacht. Gleichwohl genügt diese Vorgehensweise auch bei anspruchsvollen Fällen. Wesentlich dabei ist auch, dass damit grundsätzlich die signifikanten Aspekte erfasst und bewusst gemacht werden können. Nur in speziellen Situationen, wie z.B. bei stark unregelmäßigen Tragwerken (unregelmäßig bezüglich Massen- und Steifigkeitsverteilung sowie Grundrissform und Foundation) oder solchen mit hohem Gefährdungspotential (z.B. Chemieanlagen, Atomkraftwerken usw.) rechtfertigt sich die Anwendung des anderen, weit aufwendigeren Verfahrens. Mit anderen Worten, für den Holzbau genügt in der Regel das einfache Ersatzkraftverfahren. Weitere Angaben allgemeiner Art zur Bewertung gibt der mittlerweile überarbeitete Eurocode 8 [1].

4.1 Ersatzkraftverfahren

Die Erdbebeneinwirkung wird beim *Ersatzkraftverfahren* auf eine horizontale statische Ersatzkraft in Abhängigkeit der beteiligten Massen (Eigenlasten zusammen mit einer reduzierten veränderlichen Einwirkung, im allgemeinen Nutzlast) reduziert, die nach vorgegebenen Regeln über die Höhe des Bauwerks verteilt wird. Somit besteht im Grunde genommen berechnungstechnisch eine ähnliche Situation wie sie bei der Einwirkung „Wind“ vorliegt. Die Bemessung des Tragwiderstands der Konstruktion wird folglich rechnerisch durch diese Ersatzkraft diktiert.

Für die Berechnung wird das ganze Bauwerk vereinfachend als Einmassenschwinger angesehen, dessen Frequenz die Grundfrequenz des Bauwerks ist. Nach den Grundgleichungen der Mechanik ist die beschleunigende Kraft F , welche umgekehrt die Einwirkung auf das Tragwerk (die Ersatzkraft) darstellt, gleich dem Produkt aus der Masse m des beschleunigten Körpers und der Beschleunigung a :

$$F = m \cdot a = \text{Erdbeben-Ersatzkraft}$$

Die Masse m repräsentiert die ständig vorhandenen Lasten (Eigen- und Auflasten) und die wahrscheinlich vorhandenen beweglichen Nutzlasten oberhalb der Foundation (Einbindungshorizont) des gesamten Bauwerks.

Die Beschleunigung a ist dabei die maximale horizontale Absolutbeschleunigung aus dem Antwortspektrum des Bauwerks bei seiner Grundfrequenz. Diese Beschleunigung wird als Spektralbeschleunigung S_a bezeichnet. Im Grenzfall heißt dies, dass bei sehr steifen Schwingern (Tragwerk) sich die Masse nahezu wie der Boden bewegt und die Absolutbeschleunigung gleich der Bodenbeschleunigung ist - im umgekehrten Fall bei sehr weichen Schwingern (Tragwerk) die Masse nahezu in Ruhe bleibt und die Absolutbeschleunigung praktisch verschwindet.

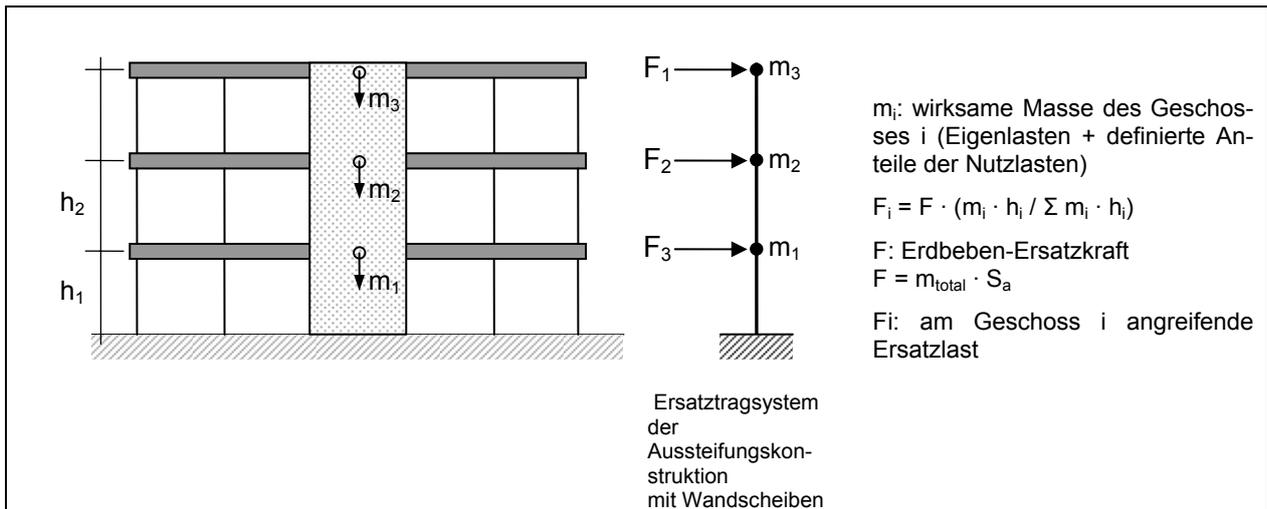


Abbildung 4: Prinzip des Ersatzkraftverfahrens

Einzige Schwierigkeit besteht nun darin die Beschleunigung a bzw. S_a des Tragwerks zu bestimmen. Es leuchtet ein, dass diese Größe nicht in einer einzigen globalen Zahl einigermaßen zuverlässig erfasst werden kann, besteht doch eine fallmäßig unterschiedliche Interaktion verschiedener Parameter vom anstehenden Baugrund über die Konzeption des Tragwerks bis hin zu deren Detailausbildung.

Ansätze zur Ermittlung der Spektralbeschleunigung S_a in einschlägigen Normen haben etwa die folgende Form:

$$a = S_a = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \cdot \alpha_5 \cdot \alpha_6 \cdot \alpha_7 \cdot a_g$$

Der Ausgangswert zur Bestimmung der Spektralbeschleunigung ist der Grundwert der vom Erdbeben erzeugten maximalen horizontalen Bodenbeschleunigung a_g . Mit Hilfe der Faktoren α_i werden die signifikanten Einflussgrößen zur Übertragung auf das Tragwerk erfasst. Dabei bedeuten: α_1 : Seimischer Faktor (geographische Lage - Erdbebenzone); α_2 : Dynamischer Faktor (Antwortschwingung Bauwerk - Erregerfunktion); α_3 : Baugrundfaktor; α_4 : Dämpfungsfaktor; α_5 : Abminderungsfaktor (Duktilität des Tragwerkes); α_6 : Überfestigkeits - Reduktionsfaktor (Effekt Überfestigkeit - Plastifizierung); α_7 : Bedeutungsfaktor (Bedeutung des Bauwerks - Ausmass der Folgen)

4.2 Antwortspektrenverfahren

Während beim Ersatzkraftverfahren eine statische, lineare Berechnung (elastisches Materialverhalten) erfolgt, fußt das *Antwortspektrenverfahren* auf einem dynamischen, linearen Verfahren bei elastischem Materialverhalten und viskoser Dämpfung. Dabei wird in der Regel am räumlichen Tragwerksmodell neben der Grundswingungsform auch die maßgebenden angeregten höheren Eigenschwingungsformen ermittelt und daraus die Beanspruchung des gesamten Tragwerks bestimmt. Höhere Eigenschwingungsformen sind vor allem bei unregelmäßigen Tragwerken mit beträchtlichen Steifigkeitssprüngen in vertikaler und horizontaler Richtung oder solchen mit erheblichen Torsionsschwingungen von Bedeutung.

5 Bedeutung der Einwirkung „Erdbeben“ für Holztragwerke

Für den Holzbau stellt sich primär die Frage, wie das Verhalten von Holzkonstruktionen im Zusammenhang mit der Einwirkung Erdbeben zu bewerten bzw. was die entscheidenden Kriterien dazu sind?

Unabhängig der anzuwendenden Berechnungsverfahren stehen für die Beurteilung eines Materials bzw. deren Bauweise in diesem Zusammenhang spezifisch zwei relevante Größen in die Augen, welche die Wahl, den Einsatz des Materials, die Tragwerkskonzeption und die Detailausbildung signifikant beeinflussen:

- Maßgebende Kraft: Horizontalkraft
- Verformungsverhalten: Duktilität des Tragwerks

5.1 Maßgebende Kraft: Horizontalkraft

Offensichtlich sind die durch die Erdbebeneinwirkung hervorgerufenen ausschlaggebenden Kräfte für die Bemessung des Tragwerks primär Horizontalkräfte, deren Größe wiederum von der bewegten Masse abhängt. Daraus lässt sich als erstes folgendes schließen und werten:

- Die Horizontalkraft aus Erdbeben ist in ihrer Beschreibung ähnlich der Windkraft. Somit gelten im Grunde für das „Erdbeben“ die gleichen Überlegungen was die Abtragung dieser Kräfte anbelangt. Ein sorgfältig ausgelegtes Konzept mit der bewussten Ab- und Weiterleitung der horizontalen Kräfte in die Foundation - wie dies bei der Einwirkung Wind auch sein sollte - ist ebenso im Fall Erdbeben unerlässlich. Gerade bei den mehrheitlich als Stabtragwerke ausgebildeten Holzkonstruktionen sind dabei die Verbände für die Sicherung der geometrischen Unveränderlichkeit des Systems außerordentlich wichtig.
- Die Horizontalkraft aus Erdbeben ist in ihrem Charakter allerdings insofern anders als jene aus Wind, als sie dynamisch und in Wechselwirkung auftritt. Dies bedeutet für die einzelnen an der Aufnahme beteiligten Elemente und Verbindungen rasche Lastumkehr und Wechselbeanspruchung, womit der konstruktiven Konzeption erhöhte Bedeutung zukommt.
- Die Größe der Horizontalkraft hängt maßgeblich von den beteiligten Massen ab. Dabei wirkt sich das dem Holzbau vergleichsweise typisch niedrige Eigengewicht seiner Bauteile günstig aus, sind doch damit beispielsweise die entsprechenden Ersatzlasten aus Erdbeben auch entsprechend kleiner als z.B. jene im Massivbau. Die daraus oftmals abgeleitete Begründung, die Erdbebeneinwirkung sei bei Holztragwerken folglich durch eine entsprechende „Windbemessung“ ausreichend abgedeckt, ist allerdings irrig. Der in vielen Fällen entscheidende Einfluss des dynamischen Aspekts wird dabei vollends außer Acht gelassen.

5.2 Verformungsverhalten: Duktilität des Tragwerks

Bestehende Duktilität, d.h. das nicht-lineare Verformungsvermögen der Tragstruktur mit seinen sog. Überfestigkeiten, begünstigt das Gesamtverhalten unter Einwirkungen aus Erdbeben. Die Reserven die durch plastisches Verformungsvermögen aktiviert werden, verhelfen dem Tragwerk zur Möglichkeit der „Vernichtung“ der angreifenden Energie (Energiedissipation). Dies äußert sich im oben gezeigten Ersatzkraftverfahren (bei linear elastischer Rechnung) verfahrenstechnisch indirekt insofern, als die angreifende Horizontalkraft aufgrund der vorhandenen Duktilität rechnerisch entsprechend reduziert werden kann.

Für die Holztragwerke lassen sich grundsätzlich folgende Aussagen machen:

- Holz selbst besitzt in der allgemeinen Verwendung bei Tragwerken nur ein elastisches aber kein plastisches Werkstoff- bzw. Tragverhalten. Zudem ist die Eigendämpfung von Holz gering. Der anisotrope Aufbau von Holz verhindert duktilen Verhalten praktisch gänzlich, gewisse „Reserven“ sind allenfalls bei Druckbeanspruchung zu mobilisieren. Für die Holzteile und verleimten Verbindungen ist daher generell von einem nicht-duktilen Verhalten auszugehen.
- Angemessene Duktilität kann dennoch über die Verbindungsbereiche bzw. Verbindungsmittel „eingebracht“ werden, namentlich mit stiftförmigen Stahlverbindungsmiteln. Die Duktilität des Stahls wird direkt genutzt, indem sich der Stift plastisch verformt und so Energie dissipiert.
- Die stiftförmigen stählernen Verbinder verfügen über ein hohes Potential zur Dissipation kinetischer Energie aus dynamischen Einwirkungen. Dies setzt allerdings geometrische Verhältnisse (Holzdicke – Schlankheit des Verbindungsmittels, End- und Zwischenabstände) voraus, die ein vorzeitiges Versagen des beteiligten Holzes ausschließen.
- Angestellte Untersuchungen zeigen, dass die gezielte Verwendung darauf abgestimmter Stabdübel bei den Verbindungsausbildungen von Rahmentragwerken beispielsweise, duktilen Tragverhalten mit zum Teil hoher Dämpfung bewirkt [5].
- Die praktische Erfahrung in Erdbebengebieten zeigt im Weiteren, dass sich Holzkonstruktionen mit Horizontalaussteifungen durch Schubwände, deren Beplankung durch abgestimmte Nagelung erfolgte, sehr gutmütig verhalten. Der jeweilige Befund macht deutlich, dass dies ist in erster Linie auf die hohe Energiedissipation im genagelten Anschluss der Beplankung zurückzuführen ist.

Zusammengefasst lässt sich hinsichtlich der Duktilität von Holztragwerken die Aussage machen, dass die Bewertung solcher Tragwerke sich folglich in erster Linie am Vorhandensein und der Anzahl duktiler Verbindungsbereiche misst.

5.3 Ist Holzbau ohne stiftförmige Verbindungsmittel von der „Erdbebenliga“ ausgeschlossen?

Indem Duktilität bei Holztragwerken nicht von „Haus“ aus vorliegt und oftmals schwierig zu beschaffen ist, ließe sich auf den ersten Blick überstürzt folgern, Holztragwerke ohne Beteiligung stiftförmiger Verbindungsmittel wären praktisch von einer erdbebengerechten Konstruktionsweise ausgeschlossen. Zweifellos besteht im Tragverhalten des Tragwerks unter Erdbebeneinwirkung eine enge Wechselbeziehung zwischen

- Tragwiderstand gegenüber horizontalen Einwirkungen

und

- Duktilität (Verformungsvermögen) der Tragstruktur

welche vereinfacht wie folgt in Zusammenhang gebracht werden kann:

„Güte“ des Erdbebenverhaltens \approx Tragwiderstand \cdot Duktilität [4]

Somit kann der Widerstand gegenüber Erdbeben in der „Grenzauslegung“ grundsätzlich nach zwei Konstruktionskonzepte bzw.

Bemessungsverfahren erbracht werden:

Nicht-duktiler Tragverhalten

Besteht kein Gewähr zu duktilem Verhalten oder ist die Einschätzung einer solchen zu unsicher (was die meisten Holztragwerke im Hochbau anbelangt), so muss das Tragwerk imstande sein die auftretenden Horizontalkräfte, und dies in wiederholter Wechselwirkung, aufzunehmen. Das heißt nichts anderes, als die Bemessung praktisch in gleicher Art wie bei der Einwirkung Wind erfolgt, wobei der zugehörige Überfestigkeits-Reduktionsfaktor (α_6) nur die Materialüberfestigkeit berücksichtigt und die angesprochene Reduktion der Horizontalkraft beim Ersatzkraftverfahren folglich am geringsten ausfällt. Das Tragwerk wird folglich mit einem so hohen Tragwiderstand ausgestattet, dass es die Einwirkung Erdbeben elastisch, d.h. ohne gezielt genutzte plastische Verformung, aufnimmt.

Duktiler Tragverhalten

Ist duktiler Trag- und Verformungsverhalten des Tragwerks gewährleistet, so ist die Reduktion der Ersatzhorizontalkraft entsprechend dem Umlagerungs- und Energiedissipationsvermögen unter zyklisch-plastischer Beanspruchung im Vergleich dazu größer. Das Tragwerk kann also mit einem geringeren Tragwiderstand als bei nicht-duktiler Verhalten ausgebildet werden. Die Bemessung richtet sich nach der sog. Kapazitätsbemessung, indem die plastifizierenden Bereiche bewusst gewählt werden, so dass ein geeigneter plastischer Mechanismus des Tragwerks entsteht. Die übrigen Bereiche werden mit zusätzlichem Tragwiderstand (Kapazität) versehen, damit sie elastisch bleiben (und nicht vorzeitig spröde versagen), wenn die plastifizierenden Bereiche ihre Überfestigkeit entwickeln.

Die Inanspruchnahme der duktilen Eigenschaften des Tragwerks führt unter der Einwirkung des Bemessungsbebens zwar zu großen plastischen Verformungen und eventuell auch zu Schäden, aber der Einsturz wird ausgeschlossen.

6 „Erdbeben“: Bedeutung und für welche Tragwerke im Holzbau?

Hergeleitet aus der Kenntnis der Einwirkungsgröße und -art kommt seitens der Anwendungsbereiche im Holzbau der Einwirkung Erdbeben bei den Hochbauten den mehrgeschossigen Bauwerken die größte Bedeutung zu. Bauwerke also, die von ihrer Charakteristik her über größere beteiligte Massen (Eigenlast, sowie die Lasten der über die Geschoße aufaddierten ausbaubedingten Bauelemente (Fassaden, Zwischenwände usw.) sowie aufsummierte Nutzlasten) wie auch größere Höhe (Anzahl Geschoße) aufweisen. Die Relation zwischen bauwerksbedingten ständigen Lasten und den bemessungsbestimmenden übrigen Einwirkungen ist bei Hallen- oder Brückentragwerke eine gänzlich andere. Zudem bestehen in der Regel im Vergleich zu mehrgeschossigen Bauten günstigere geometrische Verhältnisse.

Dies bedeutet nicht, dass damit bei den Hallen- und Brückentragwerken die Einwirkung Erdbeben vollkommen vernachlässigt werden kann, sondern einzig, dass die Bemessung ihrer Bauteile im Allgemeinen nicht durch das Erdbeben diktiert wird. Unabhängig der Bauwerkskategorie (ob mehrgeschossiger Hochbau, Hallen- oder Brückenbau) kommt den konstruktiven Übergangsbereichen und Detailausbildungen in allen Fällen eine genauso entscheidende Bedeutung zu. Was nützt eine für sich intakte Konstruktion, wenn diese beispielsweise aus ihren Lagern springt und „abstürzt“ oder aber das einzelne Element für sich widerstehen würde, seine Kräfte aber nicht im zyklischen Wechselspiel der Beanspruchungen weiterleiten kann?

In allen Fällen spielen somit primär folgende grundsätzliche Faktoren eine ausschlaggebende Rolle:

- Erdbebengerechte Tragwerkskonzeption
- Konstruktive Detailausbildung

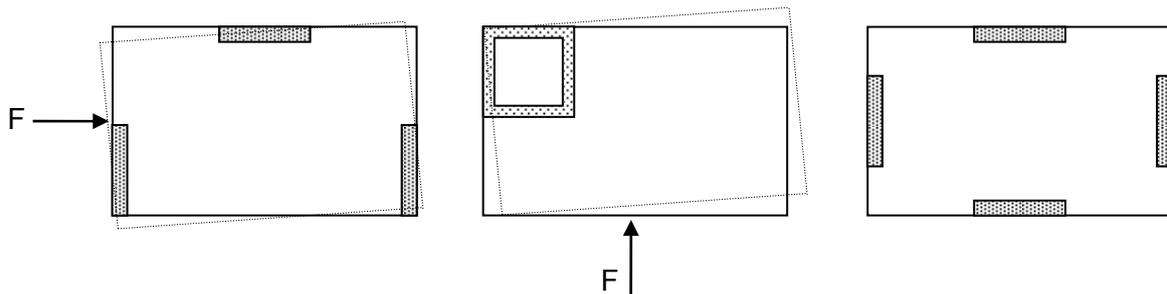
7 Konzeptionelle Konsequenzen für erdbebengerechten Entwurf

Dem erdbebengerechten Tragwerksentwurf liegt die fundamentale Erkenntnis zugrunde, dass zur Hauptsache zunächst (dynamische) horizontale Kräfte abzutragen sind. Folglich liegt im Vordergrund der Überlegungen zur Tragwerkskonzeption die Aufnahme und Abtragung von horizontalen Kräften, d.h. das sog. Aussteifungskonzept. Mit einer handvoll Grundsätzen lassen sich die grundlegenden Zusammenhänge bzw. Konsequenzen klar aufzeigen.

Für das Aussteifungskonzept gilt im Grundsatz nichts anderes als für die Abtragung der horizontalen Windkräfte, mit der Ausnahme allerdings, dass die Kräfte aus Erdbeben dynamisch wirken. Die damit hervorgerufenen raschen Wechsellasten lassen sich nicht vermeiden, doch sollen Zusatzbeanspruchungen und Aufschaukelungen durch ungeschickte Anordnung und Ausbildung der Aussteifungselemente vermieden werden. Grundsätzlich sind Asymmetrien in der Geometrie und der Steifigkeiten möglichst zu unterlassen. Im Nachfolgenden werden darauf abgestimmte Konzeption und deren Konsequenz erläutert.

7.1 Grundrissausbildung

Unsymmetrische Aussteifung ist eine häufige Ursache von Einstürzen von Bauten bei Erdbeben. Die Tragwerke zur Abtragung der horizontalen Kräfte (Tragwände, Rahmen, Fachwerke und Kerne) sollten möglichst symmetrisch über den Grundriss verteilt und mit ähnlichen Verformungseigenschaften versehen werden.



ungünstig: Asymmetrische Aussteifung (Massenzentrum liegt exzentrisch zum Widerstandszentrum und Schubmittelpunkt) - Folge: zusätzliche Torsion und Verdrehung

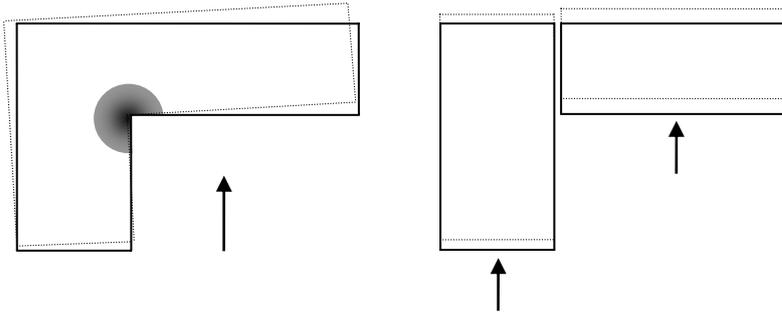
ungünstig: Asymmetrische Aussteifung (Massenzentrum liegt exzentrisch zum Widerstandszentrum und Schubmittelpunkt) - Folge: zusätzliche Torsion und Verdrehung

optimal: Symmetrische Aussteifung (Massen- und Widerstandszentrum sowie Schubmittelpunkt sind identisch) - Folge: keine zusätzliche Beanspruchungen und keine Verdrehungen

Abbildung 5: Einfluss der Anordnung der Aussteifungstragwerke im Grundriss

Jedes Gebäude hat im Grundriss ein Massenzentrum (Schwerpunkt aller Massen), in dem die wirkenden Trägheitskräfte angenommen werden, ein Widerstandszentrum für horizontale Kräfte (Schwerpunkt der Aussteifungselemente) und ein entsprechendes Steifigkeitszentrum (Schubmittelpunkt). Falls das Widerstandszentrum nun nicht im Massenzentrum und somit exzentrisch liegt, entsteht Torsion und das Gebäude verdreht sich im Grundriss. Dies bewirkt am vom Steifigkeitszentrum weit entferntesten Punkt große Relativverschiebungen, was zu entsprechenden Stützenverschiebungen und zu Zusatzbeanspruchungen in den Stützen führt (vgl. Abbildung 5). Eine massive Überbeanspruchung bis hin zum Versagen ist die Folge.

Indem bei Holztragwerken in der Regel eine ausreichende Torsionssteifigkeit der Tragwerke zum Kleinhalten der Verdrehungen in vielen Fällen fehlt, sollte in der Grundrisskonzeption folglich besonders darauf geachtet werden, dass eine weitgehend symmetrische Anordnung der Aussteifungen angestrebt wird und diese zudem möglichst entlang der Gebäuderänder angeordnet werden (große Hebelarme, vgl. Abbildung 5 Situation rechts).



Ungünstige Grundrissform: führt zu Verdrehungen und lokal großen Beanspruchungen im Eckbereich

Besser: Lösung der Problematik durch Auftrennung der beiden Gebäudeflügel in selbständige Tragwerke

Abbildung 6: Ungleichmäßige, aufgelöste Grundrissformen führen zu unterschiedlichen Steifigkeiten und in der Folge zu lokal hohen Zusatzbeanspruchungen

Im Weiteren sollte auch bei der Gestaltung der Grundrisse auf das dynamische Verhalten geachtet werden. Stark aufgelöste Grundrisse, wie z.B. zusammenhängende L-förmige Grundrisse haben unterschiedliche Steifigkeiten unter horizontaler Erdbebeneinwirkung (vgl. Abbildung 6). Die beiden Flügel möchten unterschiedlich schwingen, behindern sich allerdings gegenseitig. Die Folge sind große Zusatzbeanspruchungen in den Deckenscheiben im inneren Eckbereich, was zusätzliche konstruktive Maßnahmen erfordert, die im Holzbau schwierig zu erbringen sind. Durch konstruktive Trennung der beiden Gebäudeflügel mit entsprechender Fugenausbildung („Zusammenprallen“ der Gebäude verhindern) kann dies umgangen werden.

7.2 Vertikales Aussteifungskonzept

Bei der Auslegung des vertikalen Aussteifungskonzepts (Wandscheiben usw.) sind zur Ableitung der Horizontalkräfte über die Geschoße in die Foundation möglichst Unstetigkeiten von Steifigkeiten und Widerständen zu vermeiden.

Veränderungen des Querschnitts von Aussteifungen über die Höhe des Tragwerks ergeben Diskontinuitäten und führen zu verhaltetechnisch ungünstigen Sprüngen im Verlauf der Steifigkeiten und Widerstände. Die Folge sind entsprechende Zusatzbeanspruchungen und vor allem Probleme bei der lokalen Kraftübertragung zwischen den einzelnen Aussteifungselementen. Der konstruktiven Durchbildung der Übergänge, einem Problempunkt der Holzbauweise im Allgemeinen, kommt dabei zudem eine verstärkte Bedeutung zu.

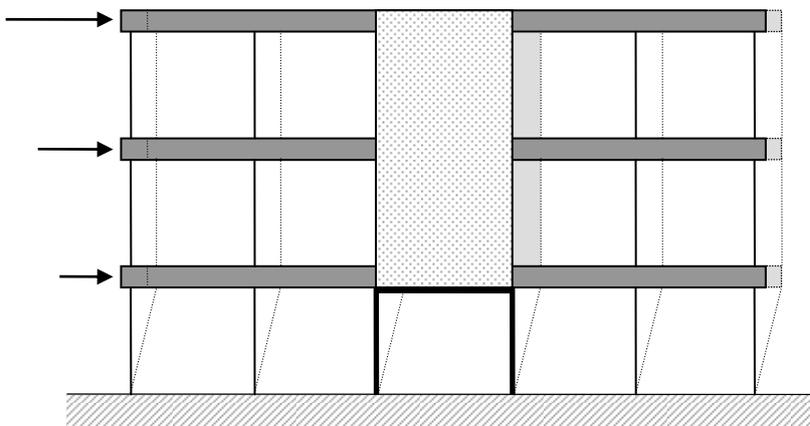


Abbildung 7: Steifigkeitsunterschiede im Aussteifungstragwerk, wie weiche Zwischen- bzw. Erdgeschosse führen zu Überbeanspruchungen an den Stützenenden und oftmals zum „Umklappen“ bzw. dem sog. Stockwerksmechanismus

Hält man sich den Schwingvorgang vor Augen, so leuchtet ein, dass unterschiedliche Steifigkeiten von Geschoßen äußerst ungünstig sind. Die Beobachtungen in Erdbebengebieten zeigen auch, dass viele Einstürze darauf zurückzuführen sind, dass Aussteifungselemente, z.B. Wände, die in den Obergeschossen vorhanden sind, im Erdgeschoss weggelassen und dafür nur Stützen angeordnet sind. Dadurch wird das Erdgeschoss in horizontaler Richtung weich, die darüber liegende Masse schwingt und die Stützen sind in der Regel nicht in der Lage die Relativverschiebungen schadlos mitzumachen (vgl. Abbildung 7). Gleiches gilt, wenn ein Zwischengeschoss deutlich weicher ausgebildet wird als die umgebenden.

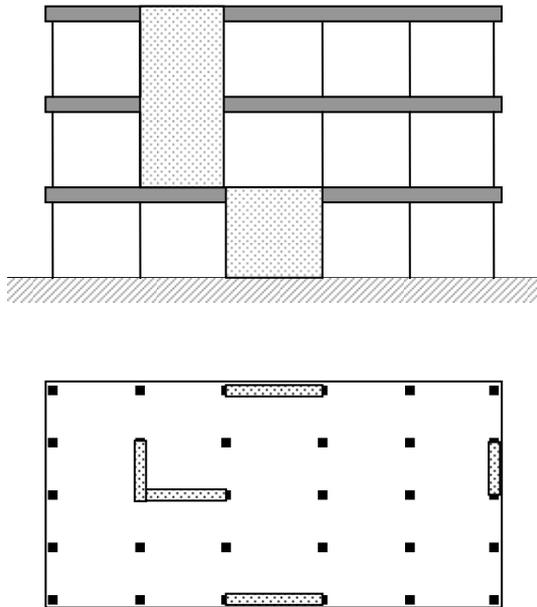


Abbildung 8: Versetzte Anordnung der Aussteifungselemente im Aufriss und im Grundriss

Nicht in der gleichen Flucht, sondern horizontal versetzte (oder sogar zusätzlich im Grundriss versetzte) Anordnung der Aussteifungselemente über die Gebäudehöhe stören den direkten Kraftfluss, schwächen den Tragwiderstand und verschlechtern das Verformungsverhalten markant (vgl. Abbildung 8). Hinzu kommt, dass insbesondere bei den Holztragwerken die vorhandenen Querkräfte und Biegemomente der einzelnen Aussteifungselemente beim Geschoßübergang konstruktiv schwierig weiterzuleiten sind und oftmals nicht einwandfrei übertragen werden können. Horizontale Versetzungen von Aussteifungselementen im Aufriss und im Grundriss sind daher unbedingt zu vermeiden.

7.3 Weiterleiten der Kräfte

Das saubere Übergeben und Weiterleiten der horizontalen Kräfte von Stockwerk zu Stockwerk ist für das Funktionieren der Aussteifung bereits bei der Komponente „Wind“ von Bedeutung und gewinnt bei Erdbeben durch die zyklische Art der Beanspruchung noch signifikant hinzu. Dies bereitet dem „regulären“ Holzbau oftmals Mühe. Nicht selten wird dieser Aspekt stiefmütterlich behandelt und die Verbindungen (bewusst oder unbewusst) mehr über Reibungskraft (vorhanden oder nicht vorhanden) bewerkstelligt als mit ordentlichen Mitteln. Was im Fall „Wind“ mit der Aktivierung nicht ingenieurmäßig erfassbaren Ausbauelemente möglicherweise für den Normalfall noch ausreichen mag oder „unbemerkt“ (ohne gravierende Folgen) bleibt, kommt bei der wechselnden Erdbebenkraft längst nicht hin.

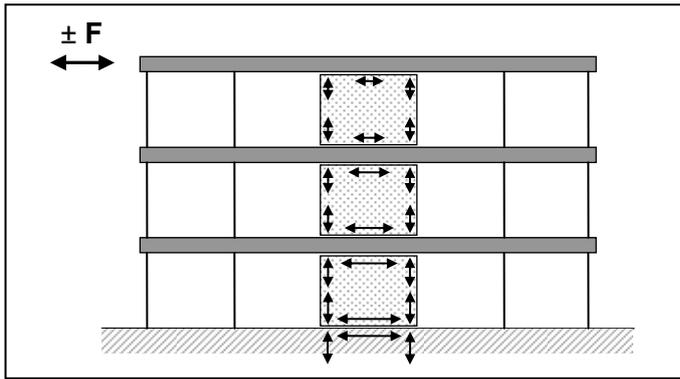


Abbildung 9: Typische verbindungstechnische Problemstellung bei der Weiter- und Ableitung der horizontalen Kräfte zur Gewährleistung durchgängiger Aussteifungsstrukturen Holztragstrukturen

In diesem Fall besteht für den Holzbau eindeutig Nachholbedarf und zwar in rechnerischer und konstruktiver Hinsicht. Die horizontalen Kräfte aus den Deckenscheiben sind vollumfänglich in die vertikalen Aussteifungselemente geschoßweise konstruktiv und mechanisch einwandfrei zu übertragen. Genauso sind abhebende Kräfte bzw. Biegemomente korrekt weiterzuleiten (vgl. Abbildung 9). Dies führt insgesamt in der Regel zu erhöhtem Konstruktionsaufwand und äußert sich optisch auch im Allgemeinen durch vergleichsweise massive mechanische Verbindungsbereiche. Letztlich muss für das einzelne vertikale „Aussteifungsfeld“ statisch ein durchgehender Kragarm erzielt werden, bei welchem im Stockwerksübergang die horizontalen Deckenkräfte eingeleitet werden.

Die Geschoßdecken müssen dabei als starre Scheiben wirken können, denn sie sichern den Zusammenhalt in horizontaler Richtung. Nicht durchgehende Decken oder Decken aus vorfabrizierten Elementen, was beides im Holzbau die Regel ist, müssen konstruktiv über entsprechend schubfeste Verbindungen zu starren Scheiben ausgebildet werden.

7.4 Verformungsvermögen der Tragstruktur

Duktile, d.h. im plastischen Beanspruchungsbereich stark verformungsfähige Tragwerke bieten gegenüber spröden Strukturen wesentliche Vorteile. Der erforderliche Tragwiderstand kann dann reduziert werden und gleichzeitig wird damit allgemein die Sicherheit gegen Einsturz erhöht. Das grundsätzliche Ziel erdbebengerechten Konstruierens ist duktiler Tragverhalten. Wie vorgängig unter Abschnitt 5.4 erläutert, ordnet man konzeptionell dem Tragwerk ganz genau zu, wo es plastifizieren (sofern es überhaupt kann) darf und soll und wo nicht, um einen günstigen plastischen Mechanismus zu erreichen.

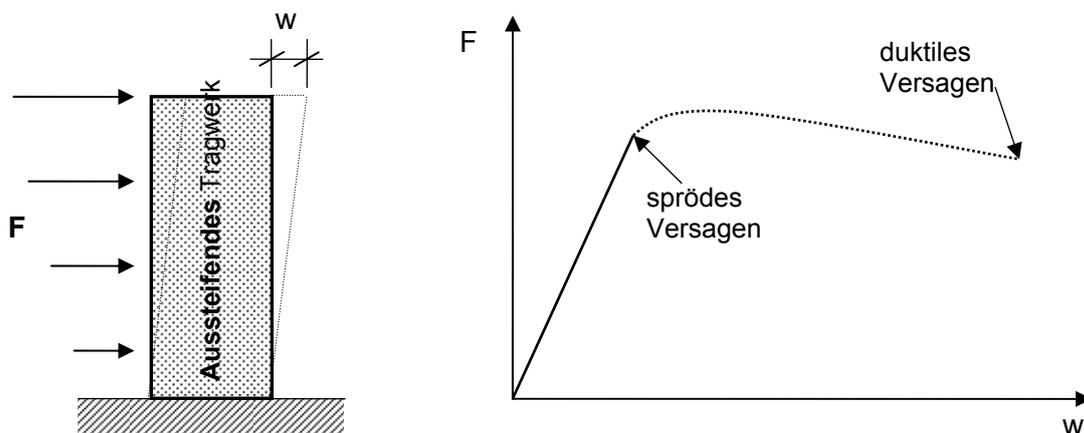


Abbildung 10: Prinzipieller Vergleich zwischen sprödem und duktilem Tragwerksverhalten; Gewinn bei duktilem Verhalten

Wie bekannt, mangelt es den Holztragwerken im Allgemeinen an duktilen Eigenschaften. Daher kann die gezielte Nutzung von Energiedissipation durch lokale Plastifizierung im Holzbau praktisch nur in zwei Fällen tatsächlich (beherrscht) realisiert werden: In Verbindungsbereichen, im speziellen mit stiftförmigen Stahlverbindern und in Einzelfällen auch bei Druckkraftübertragungen quer zur Faser. Im letzteren Fall wird das plastische Verformungsvermögen von Holz quer zur Faser genutzt. Hinderlich sind dabei allerdings zwei Dinge: Einerseits die vergleichsweise geringe Festigkeit und Steifigkeit (geringe Energievernichtung) quer zur Faser und andererseits der Umstand, dass auch bei Lastumkehr das Vorzeichen der Kraft (Druck) letztlich nicht wechseln sollte.

Der bewusste Einsatz plastischen Verhaltens zur Erzielung eines duktilen Tragwerksverhaltens kann somit tatsächlich einzig durch das duktile Verhalten stählerner Verbindungsmittel erreicht werden. Hierfür eignen sich aufgrund ihrer Lagerungsart („Kragarmsysteme“) die vergleichsweise schlanken, querbelasteten stiftförmigen Verbindungsmittel (Nägel, Schrauben und Stabdübel). Bei geeignetem Schlankheitsverhältnis liefert das Verbindungsmittel den Hauptteil der Verformungen durch elastische und plastische Anteile ohne dass das beteiligte Holz spröd bricht.



Abbildung 11: Plastische Verformung bei einer vierschnittigen Nagelverbindung resultierend aus dem duktilen Verhalten des Nagels und der lokalen Plastifizierung des Holzes durch Lochleibung

Damit sich plastische Verformungen des stählernen stiftförmigen Verbindungsmittels tatsächlich ausbilden können (und verbunden damit lokale plastische Verformungen im Holz durch Lochleibungsbeanspruchung), muss gewährleistet sein, dass das Holz im Verbindungsbereich nicht frühzeitig aufspaltet oder abschert. Dies kann durch konstruktive Maßnahmen erreicht werden, indem die Zwischenabstände wie auch Randabstände (Vorsicht Lastumkehr) gegenüber den nach Norm geforderten Mindestabstände erhöht werden (knapp das 2-fache). Mit auf- oder eingeleimten Absperrungen in Form von Sperrholz kann die gleiche Wirkung erzielt werden.

7.5 Nichttragende Bauteile und Elemente

Zwischenwände und Fassadenteile und -elemente sind in der Regel nichttragend. Diese sind im Holzbau in den meisten Fällen fugenlos und mehr oder weniger satt eingebunden. Indem die Holztragwerke von der Sache her eher weiche Strukturen sind, schaffen diese Bauteile ungewollt über ihren direkten Kontakt und Reibungseinflüsse einerseits günstige Dämpfung, gleichzeitig verändern sie allerdings andererseits unbeabsichtigt die „Steifigkeitsgeometrie“ des Aussteifungstragwerks (was ev. ungünstige Asymmetrien hervorruft). Hinzu kommt, dass diese nichttragend ausgebildeten Elemente unplanmäßig beansprucht werden. Diese Bauteile erfahren eine Schiefstellung, so dass - je nach Anfälligkeit - bereits bei relativ schwachen Erdbeben erhebliche Schäden entstehen. Erfahrungen zeigen, dass in solchen Fällen ein Gebäude irreparabel wird, obschon das eigentliche Tragwerk keine oder nur unwesentliche Schäden erlitten hat.

Folglich sind die nichttragenden Bauteile, welche aufgrund ihrer Grundrissposition und ihres Aufbaus (z.B. großflächige, ganzteilige Elemente) Gefahr laufen ungewollte Scheibenwirkungen zu entwickeln, konstruktiv durch speziell nachgiebige Verbindungsmittel oder entsprechend flexible Fugenausbildung (durch konsequente Abtrennung) Lastinaktiv zu machen.

Die im Holzbau normalerweise feingliedrigen, vergleichsweise leichten Fassadenausbildungen tragen begünstigend zur Dämpfung bei und sind entsprechend auch gegen Horizontalkräfte verankert. Bei ihnen besteht die Schwierigkeit nicht, welche bei schweren Fassadenbauteilen (z.B. Beton- oder Natursteinelemente) zu beobachten sind. Oftmals sind diese nur auf Konsolen gestellt und oben leicht fixiert. Die fehlende oder mangelhafte Halterung für alternierende horizontale Zug- und Druckkräfte kann zum Losreißen und Absturz dieser Bauteile führen.

8 Konstruktive Überlegungen

Genauso wichtig, wenn nicht sogar wichtiger als der angemessene Tragwerksentwurf ist letztlich die darauf abgestimmte konstruktive Auslegung und Detailausbildung. Speziell im Holzbau, wo bereits im Normalfall die konstruktive Konzeption und die Ausbildung der Verbindungsbereiche ausschlaggebend für die Qualität, Robustheit und Effizienz sind, wächst im Fall „Erdbeben“ deren Bedeutung noch an. Im Nachfolgenden sind ein paar grundsätzliche konstruktive Überlegungen stichwortartig erläutert.

8.1 Die Verbindung

Grundsätzlich muss bewusst sein, dass es sich bei den betroffenen Verbindungen speziell um die Verbindungen im Zusammenhang mit den Aussteifungsmaßnahmen handelt, d.h. um die Verbindungen der Tragwerkseinheiten, welche die Aufnahme der horizontalen Einwirkungen bewerkstelligen.

Kontaktstoß

Unabhängig davon ob duktile oder nicht-duktiler Verbindung bestehen, ist für deren konstruktive Auslegung grundsätzlich vor Augen zu halten, dass sich während des Bebens die Belastungsrichtung mehrfach ändert und Wechselbeanspruchungen entstehen und aufzunehmen sind. Reine Kontaktstöße, die nur Druckkräfte übertragen können sind prinzipiell daher ungeeignet. Theoretisch ist mit „andreasförmiger“ Auskreuzung Lastumkehr auch mit einfachen Kontaktstößen möglich, allerdings ist der damit verbundene Systemwechsel bei rascher Belastungsabfolge und die damit verbundenen, un stetigen und schlagartigen Verformungswechsel unvorteilhaft für den Beanspruchungs- und Verformungsablauf.

Knotenanschlüsse

Generell sind die Knotenanschlüsse bei den Aussteifungstragwerken (Fachwerkverbände, Rahmen) dem Prinzip nach konstruktiv auf die Möglichkeit der Lastumkehr auszulegen. Darüber hinaus kann der Verbindungsbereich konstruktiv gezielt als „Plastifizierungspunkt“, d.h. als Energiedissipationsbereich ausgelegt werden. Wie bereits im Abschnitt 5.3 erwähnt, ist dies speziell mit Hilfe von Verbindungsausbildungen mit stiftförmigen stählernen Verbindungsmitteln (Nägeln, Schrauben und Stabdübel) realisierbar. Die mehrschnittige Ausführung ist der einschnittigen Verbindung aufgrund ihrer vergleichsweise höheren Steifigkeit und ihres deutlich höheren Energieaufnahmevermögens vorzuziehen. Dies kann allgemein allerdings nur erzielt werden, wenn die dazu erforderliche plastische Verformung im Stahl zusammen mit lokalen plastischen Lochleibungsspannungen im Holz geschieht. Um frühzeitiges sprödes Aufspalten oder Abscheren auszuschließen sind die Holzabmessungen (Holzdicke und Verbindungsmittelabstände) entsprechenden anzupassen bzw. gegenüber dem Normalfall zu vergrößern (schlankere Stifte).

Beplankungen

Im Rahmenbau kann bekanntlich mit der Beplankung der Rahmentragwerke statisch eine Scheibe geschaffen werden. Die bestehende Duktilität der dazu erforderlichen Verbindungsmittel (Nägel oder Schrauben) kann gezielt genutzt werden um der ganzen Wandscheibe zu duktilem Verhalten zu verhelfen. Konstruktiv muss auch in diesem Fall ein vorzeitiges Holzversagen ausgeschlossen werden, indem gegenüber dem Normalfall größere Verbindungsmittelabstände und ev. erhöhte Einschlagtiefen ausgeführt werden.

8.2 Zusammenwirken von Elementen und Weiterleiten der Kräfte

Wiederholt ist auf die signifikante Bedeutung der konstruktiven Ausbildung der Übergänge und Verbindungen bei der Ausführung von Aussteifungstragwerken hinzuweisen. Dabei muss die Kraftweiterleitung bis zur Gründung Punkt für Punkt sorgfältig verfolgt und entsprechende konstruktiv bewerkstelligt werden.

Es handelt sich dabei um die identischen Problempunkte, wie sie auch im normalen Holzbau anzutreffen sind. Sie lassen sich beispielsweise mit der Frage ausdrücken, ob die aus mit für den Holzbau typischen Einzelementen gebildete Decke tatsächlich auch schubsteif verbunden ist, damit die Decke statisch effektiv als Scheibe wirkt? Im Falle des Erdbebens mit den zyklischen Lastwechseln verschärft sich die entsprechende Anforderung an die konstruktive Auslegung und Ausbildung der entsprechenden Verbindung deutlich.

Der zweite Punkt betrifft den Übergang vom horizontalen Element (von der Deckenscheibe) zum vertikalen Aussteifungstragwerk. Unweigerlich bestehen Durchdringungsstellen, die bei einer nicht monolithischen Bauweise konstruktiv einzig mit Verbindungen zu bewerkstelligen sind. Hier gilt es (auch im Normalfall) auf beengtem Raum äußerst konzentriert größere Kräfte, hauptsächlich in Form von Schub-, Zug- oder Druckkräften, weiterzuleiten (vgl. Abbildung 9). Hier offenbart sich eine grundsätzliche Schwierigkeit des Holzbaus an sich, die nur mit entsprechender konstruktiver Intelligenz, gewissenhaftem rechnerischen Aufschluss und sorgfältiger Ausführung bewältigt werden kann. Die spezielle Situation der dynamischen wechselnden Beanspruchungen im Fall des Erdbebens macht die verschärfte Bedeutung dieser Übergangsstellen deutlich.

8.3 Auflagersicherungen

Außerhalb des eigentlichen Aussteifungstragwerks kommt der konstruktiven Detailgestaltung des übrigen Tragwerks (Abtragung der vertikalen Lasten), insbesondere der Ausbildung vorhandener Auflager eine zentrale Rolle zu. Besonders die Holzbauweise, bei welcher vorgefertigte Bauteile aufeinander „gestapelt“ werden, ist sehr verletzlich im Falle des Erdbebens. Kurze Auflagerlängen oder zu schwache oder ganz fehlende Rückhaltvorrichtungen von Deckenbauteilen beispielsweise sind häufig beobachtete Einsturzursachen in Erdbebengebieten. Träger und ganze Decken springen förmlich aus ihren Auflagern oder rutschen schlichtweg ab den Lagern.

Bewegliche Auflager müssen daher eine minimale Auflagerlänge (welche in den einschlägigen Erdbebennormen definiert ist) aufweisen. Feste Auflager sind gleichzeitig konstruktiv durch Positionierungs- und Rückhaltvorrichtungen gegenüber Abheben und „Ausziehen“ zu sichern.

9 Zusammenfassung

Die signifikanten Schlüsse zur Einwirkung „Erdbeben“ bei Holztragwerken lassen sich in drei Aspekte zusammenfassen: Als erstes muss bewusst sein, dass Erdbeben in Mitteleuropa jeder Zeit auftreten können und zwar in einer Stärke, welche unsere Bauwerke allgemein in einer besonderen Art und Weise beanspruchen, auf die sie nicht a priori bemessen und konstruktiv ausgelegt sind. Davon ist zweitens auch der Holzbau betroffen, allerdings im Grunde nur der mehrgeschossige Holzbau. Drittens schließlich bieten dabei weite Bereiche im Holzbau keine Probleme, vorausgesetzt die Konstruktion ist bereits in der „normalen“ Auslegung fachgerecht bemessen, sachgemäß konstruktiv gestaltet und sorgfältig ausgeführt. Mit anderen Worten, mit dem Verständnis und dem Bewusstsein, was im außerordentlichen Fall des Erdbebens geschieht, kann durch angepasste Tragwerkskonzeption und geschickte konstruktive Umsetzung Sicherheit bei Holztragwerken geschaffen werden, ohne dass wesentliche Mehrkosten entstehen.

10 Literatur

- [1] DIN V ENV 1998 (Eurocode 8) (1997). Teil 1-1 Grundlagen: *Erdbebeneinwirkung und allgemeine Anforderungen an Bauteile*; Teil 1-2 Grundlagen: *Allgemeine Regeln für Holzbauten*; Teil 1-3 Grundlagen: *Baustoffspezifische Regeln für Hochbauten*; 1997.
- [2] Weidmann M. (2002). *Erdbeben in der Schweiz*; Verlag Desertina Chur,; 303 pp.
- [3] Schaad W. (1988). *Erdbebenszenarien Schweiz*; Schweiz. Pool für Erdbebenversicherung, Bern
- [4] Bachmann, H. (1995). *Erdbebensicherung von Bauwerken*; 1995; Birkhäuser, Basel-Boston-Berlin; 292 pp.
- [5] Gnuschke, M. et al. (2000). Brettschichtholz-Rahmentragwerke mit duktilen Verbindungen unter dynamischer Belastung; Bautechnik 2000, Heft 4; pp. 229 - 245.