



Erdbebensicherheit von Holzbauten

*Prof. Dr. Helmut Prion,
Ph.D., P.Eng.
Dept. of Civil Engineering
Univ. of British Columbia
Vancouver, Canada*

Erdbebensicherheit von Holzbauten

Einleitung

Bereits seit Urzeiten baut man mit Holz und viele Völker haben aus dieser Tradition eine regelrechte Holzbaukultur entwickelt. Dies ist vor allem in alten Kulturen, wie man sie in Europa und Asien antrifft, der Fall. Während der Erforschung Nordamerikas durch europäische Pioniere hat man mit traditionellen Kenntnissen und primitiven Mitteln die üppig vorhandenen Wälder als Hauptquelle für den Bau von Wetterschutz und Befestigungen benutzt. Daraus entstand die relativ verschwenderische Blockhausbauweise und später, nach Errichtung effizienter Sägewerke, die sogenannte Holzrahmenbauweise, wie sie heutzutage in Nordamerika noch sehr üblich ist. Diese Bauweise hat ihre Eignung in verschiedenen Erdbeben hervorragend bewiesen, wie dieses Bild aus Alaska zeigt, bei dem



Bild 1: Ein Holzhaus das eine wilde Fahrt überlebt hat (Alaska, 1964)

ein Holzhaus in einem Erdbeben extreme Verschiebungen durchmachte (Bild 1).

In Japan baut man heute noch hauptsächlich nach der traditionellen Holzrahmenbauweise, wobei das relativ schwere Ziegeldach von einem verzapften Vierkantholzrahmen getragen wird. Es geht bei dieser Bauweise darum, das Dach möglichst schnell zu errichten, um vor Monsunregen geschützt zu sein, während der Innenausbau in Ruhe fertiggestellt werden kann. Die Wände

bestehen meist aus vermörteltem Bambusflechtwerk und seitliche Stabilität wird durch leichte

Holzverstrebungen gewährleistet (so überhaupt vorhanden). Obwohl viele Gebäude dieser Bauweise jahrhundertlang Erdbeben widerstanden haben, kam es beim Erdbeben 1995 in Kobe zu erheblichen Schäden an solchen Bauten (Bild 2).



Bild 2: Erdbebenschäden an Holzgebäuden in Kobe (1995)

Im Mittelmeerraum baute man zwar hauptsächlich mit Steinen und Mörtel, nutzte jedoch zusätzlich Holzrahmen zum Aussteifen und zur Sicherung gegen Erdbebenschäden. In den meisten Fällen wurde Holz jedoch nur im Dachstuhl verwendet. Laut traditioneller griechischer Bauart baute man oft eine gewisse Sicherung gegen Erdbebenschäden ein, wie z.B. eine Keilverbindung, die sich bei Erschütterungen lockert und das Gebäude somit vor starken Beschleunigungen geschützt wird. Zusätzlich wurden Verstrebungen zur seitlichen

Versteifung eingebaut und halfen zusätzlich eingebaute Rahmen, die oberen Stockwerke im Falle eines Zusammensturzes der Steinwände zu tragen. Außerdem verwendete man einen Ringbalken aus Holz, der dem Haus eine einheitliche Festigkeit verlieh.

Einführung in die Theorie der Gebäude-Dynamik

Während die Lasteinwirkung bei Gebäuden in den meisten Fällen eine direkte Kraftanwendung ist, so ist es bei Erdbeben die Verschiebung oder Schwingung des Fundaments. Dies hat eine indirekte Erzeugung von Trägheitskräften durch die Beschleunigung der Gebäudemasse zur Folge. Zum Errechnen dieser Kräfte braucht man also erstens Informationen über die zu erwartenden Erdbebenschwingungen. Diese sind jedoch meist sehr ungenau, da sie von den Ursprungsgegebenheiten und der Distanz zur Bruchstelle, sowie zum grossen Teil von den Fels- und Bodeneigenschaften abhängig sind. Da die beschleunigte Masse selten auf Fundamenthöhe liegt, spielt zweitens die Konstruktion des Gebäudes eine grosse Rolle bei der Wirkung der Schwingungsverschiebungen auf die beschleunigte Masse. Die Eigenfrequenz des Gebäudes ist dabei ein wichtiger Faktor, ebenso die Dämpfungs-eigenschaften der unterschiedlichen Bauteile.



Bild 3. Einfaches Gebäudemodell zur Darstellung des dynamischen Verhaltens

Schlußendlich ist also die Bestimmung von Erdbeben-einwirkungen von einer Vielzahl zum Teil unbekannter Faktoren abhängig, so daß die Erstellung von realistischen Bemessungseingaben eine regelrechte Kunst ist, die einiges Feingefühl erfordert. Trotzdem hat man, durch viele Jahre Erfahrung und Forschung, einige brauchbare Regeln aufstellen können, die dem Ingenieur in etwa als Richtlinie dienen.

An dieser Stelle ist es nun angebracht, eine kurze Übersicht zur Gebäudedynamik zu präsentieren.

Wenn man ein Modell aus einem Drahtstab und einer schweren Kugeln hin- und herschiebt (Bild 3), so hat man eine vereinfachte Darstellung des Schwingungsverhaltens eines einstöckigen Gebäudes bei Erdbebeneinwirkung. Für ein mehrstöckiges Gebäude kann man dasselbe mit mehreren Gewichten, angebracht an unterschiedlichen Höhen, erproben und somit Schwingungen zweiter, dritter bzw. höherer Ordnung erzeugen. Diese Schwingungsformen, die bei höheren Frequenzwerten auftreten, können zu erheblichen Schäden an Gebäuden führen, da sie oft mit hohen Beschleunigungen verbunden sind. Wichtig sind hierbei jedoch die relativen Verschiebungen, von denen die Schnittkräfte direkt ableitbar sind. Hat man die Resonanzfrequenz einmal gefunden und schüttelt weiterhin mit dieser Frequenz, nehmen die Verschiebungen dermaßen zu, daß es schlußendlich zum Bruch kommt. In der Praxis kommt dies zum Glück nicht zum Tragen, da ein Erdbeben viele verschiedene Frequenzen enthält, die in keiner vorgesehenen Ordnung aufeinanderfolgen. Außerdem findet in Bauteilen ein hohes Maß an Dämpfung statt, welches durch Reibung oder nicht-lineares Fließen von Materialien hervorgerufen wird. Letzteres wird auch hysteretische Dämpfung genannt, welches im Grunde genommen eine Energieabsorption durch die zyklische Fließbeanspruchung von Holz, Metall oder anderen Bauteilen ist.

Ein Gebäude ist natürlich nicht ganz so einfach aufgebaut wie unser Modell. Vielmehr trägt die große Anzahl unterschiedlicher Bauteile dazu bei, die Frequenzen und auch die Dämpfung zu beeinflussen. Die Kunst ist nun, die Übertragung der Bodenbeschleunigungen zur höher liegenden Masse zu errechnen und somit die daraus resultierenden Schnittkräfte zu bestimmen. In der Praxis hat man die Erdbebenkräfte in den vergangenen Jahren einfach als Prozentsatz der beschleunigten Masse berechnet. Anfangs schätzte man eine Beschleunigung von etwa 10%. Die Horizontalkraft wäre also $0,1 \times \text{Masse} \times g$, jeweils an der Bodenhöhe jedes Stockwerks wirkend. Als man später feststellte, daß dies nicht ausreichend

war, erhöhte man die Beschleunigung auf 20% oder 30%, doch auch dies war recht vereinfacht und entsprach nicht der Erdbebeneinwirkung, wie man sie aus Erfahrung kannte.

Die erste grosse Verbesserung der Erdbebennormen fand nach dem San Fernando (1971) Erdbeben statt, worauf regelmässige Verfeinerungen der Norm folgten, welche auch heute noch ständig neuen Erkenntnissen angepasst wird.

Prinzipiell wird die Gesamthorizontalkraft mit einer Formel berechnet, die in etwa wie die folgende aussieht (aus der kanadischen Norm, NBCC 1994):

$$V = \phi V_e$$

wobei V_e die Gesamtschubkraft (horizontal) in Fundamenthöhe, für ein elastisches Gebäude ist (d.h. Energiedissipation durch Fließen von Materialien findet nicht statt) und aus folgenden Teilen besteht:

$$V_e = v s I F W$$

- wo
- v ein Beschleunigungswert ist, der von der Untergrundbeschaffenheit abhängt und in der Norm aus einer geophysischen Karte abzulesen ist.
 - s ein Übertragungswert ist, der das Verhältnis der Gebäudemassenbeschleunigung zur Bodenbeschleunigung einschätzt. Dieser Wert ist aus vielen errechneten Beispielen erstellt worden und ist im Grunde genommen von der Hauptfrequenz des Gebäudes abhängig. Diese wiederum wird mit relativ einfachen Formeln eingeschätzt und ist hauptsächlich von der Gebäudehöhe und den Grundrißdimensionen abhängig.
 - I ein Wichtigkeitswert ist mit dem die Erdbebenkräfte für katastrophensichere Gebäude erhöht werden können
 - F der Fundamentwert ist, welcher für unzulängliche Bodenverhältnisse erhöht werden kann
 - W das Gesamtgewicht des Gebäudes ist, inklusive einer Teilschneelast

Ganz wichtig bei der Einschätzung der Erdbebenkräfte ist der Verringerungsbeiwert ϕ . Dieser ist hauptsächlich davon abhängig, wieviel der kinetischen Energie des Erdbebens durch Reibung und Fließen der Materialien aufgenommen werden kann, und entsprechend die Beschleunigungskräfte verringert werden. Ausserdem haben die meisten Gebäude eine Vielfalt nicht-struktureller Elemente (Innenwände, usw.), die zur Stabilität beitragen, meist jedoch nicht in die Berechnung gebracht werden. Der Beiwert kann mitunter zwischen 0,15 und 0,6 liegen und ist im Grunde genommen auf Erfahrung basiert. In wenigen Fällen liegen handfeste Forschungsergebnisse vor, die diesen Wert bestätigen. Bei Holzbauten liegt der Beiwert ϕ in etwa zwischen 0,2 (für Wandscheibensysteme) und 0,4 (für querverstrebte Rahmen).

Die Kunst des Bemessens für Erdbeben liegt darin, die zu erwartenden Kräfte ausreichend einzuschätzen und zudem die Details der Struktur so zu konstruieren, daß möglichst viele parallele Möglichkeiten der Kraftabtragung zur Verfügung stehen (Redundanz) und die Struktur im Ganzen eine Einheit mit möglichst wenigen Schwachstellen formt. Wenn letzteres nicht zu vermeiden ist, so sollten diese Schwachstellen möglichst viel Energie durch relativ große Verformungen verbrauchen können.

Beispiele von Erdbebenschäden an Holzgebäuden

Nimmt man die Prinzipien aus dem vorherigen Abschnitt in Betracht, so ist zu erkennen, daß folgende Regeln beim Bauen von Gebäuden in Erdbebenzonen wichtig sind. Ein Gebäude sollte folgende Eigenschaften haben:

- Eine möglichst leichte Struktur, vor allem im Obergeschoß und Dach
- Ein redundantes Struktursystem, das zum gewissen Grad bauliche Fehler dulden kann
- Ein Struktursystem, das relativ große Verformungen ertragen kann, ohne dabei zum Bruch zu kommen
- Ein möglichst symmetrisches System, das Torsionsverformungen ausschließt
- Die unteren Stockwerke müssen kontinuierlich die Wände der oberen Stockwerke bis zum Fundament durchtragen
- Die Struktur muß eine feste Einheit durch angemessene Verbindungen formen

Obwohl Holzgebäude im allgemeinen recht gut in schweren Erdbeben abgeschnitten haben (Rainer und Karacabeyli, 1999), kommt es doch immer wieder zu Schäden, aus denen man lernen kann.

An dieser Stelle sollen einmal exemplarisch zwei Erdbeben vorgestellt werden. Beide trafen dicht besiedelte Gebiete sowie Gegenden wo die meisten Einfamilienhäuser aus Holz gebaut werden: Kobe und Los Angeles.



Bild 4: Eingestürztes Apartmentgebäude in Northridge (1994). Im Erdgeschoß untergebrachte Parkgaragen verursachten eine Schwachstelle in der Struktur

Im Januar 1994 wurde Nord-Los Angeles durch ein mittelschweres Erdbeben erschüttert, das vor allem dadurch sensationelle Ausmaße erreichte, daß massive Brücken einstürzten und es den Verkehr der Großstadt zum Erliegen brachte (Hall, 1994). Die relativ wenigen Todesfälle gab es vorwiegend in mehrgeschossigen Apartmenthäusern aus Holz, welche "weiche" Erdgeschosse hatten (Bild 4). Zusätzlich zu den wenigen Zusammenstürzen, gab es jedoch finanziell sehr hohe Teilschäden an Gebäuden und fast die Hälfte aller Reparaturkosten dieses bisher teuersten Erdbebens der USA waren für Holzgebäude vorgesehen. Die Lehre, die aus diesem Beben gezogen werden kann, ist daß man nicht nur auf Sicherheit achten sollte, sondern auch das Verhüten von übermäßigen Schäden in Betracht ziehen muss. Momentan findet an der Westküste Nordamerikas eine Massensanierung von bestehenden Gebäuden statt, wobei viele Firmen patentierte Systeme anbieten, die eine Verstärkung von alten Häusern leicht machen soll.

Als im Januar 1995 der Erdboden unter Kobe bebte, kam es zu einer Nationalkatastrophe. In diesem mittelstarken Erdbeben kamen über 5000 Menschen ums Leben und ein Vielfaches davon wurde obdachlos (Prion und Filiatrault, 1996). Die meisten Todesfälle gab es in den in Japan üblichen Holzrahmenbauwohnungen. Trotz jahrhundertelanger Bau Erfahrung erwies sich die dort übliche Bauweise als ungünstig bei Erderschütterungen. Die schweren Ziegeldächer, zusammen mit einer schwachen Rahmenstruktur wurden zum Verhängnis der Industriestadt (Bild 5 & 6). Zudem wurde beim Wiederaufbau nach dem Zweiten Weltkrieg zum grossen Teil mit schlechtem Material gearbeitet. Zusätzlich mangelte es an guten Handwerkern und es kam daher oft zu schwachen Verbindungsknoten, die beim Erdbeben ein sprödes Versagen zur Folge hatten (Bild 7). Im Gegensatz zu den schwer beschädigten traditionellen Wohnungen, baute man seit einiger Zeit schon Häuser nach der nordamerikanischen Leichtrahmenbauweise. Eine Siedlung solcher Bauten ist auf aufgeschüttetem Grund gebaut und litt unter besonders starken Beben. Trotzdem konnte man fast keine Schäden feststellen (Bild 8).



Bild 5 : Eingestürztes Mehrfamilienhaus in Kobe (1995). Schwaches Untergeschoß



Bild 6: Schwere Ziegeldächer führten zu Zusammenstürzen (Kobe, 1995)



Bild 7: Spröder Bruch am Verbindungsknoten



Bild 8: Leichtrahmenhaus in schwer erschüttertem Gebiet in Kobe. Sandauftrieb zeugt von starker Bodenverflüssigung

Im Gegensatz zu den schwerbeschädigten Häusern und Wohnungsblocks erlitten alte traditionelle Tempelgebäude kaum Schäden. Hier wirkt ein geniales System. Die Tempelbauten haben ein Labyrinth aus Kreuz- und Querbalken, die lediglich aufeinanderliegen und im Falle eines Erdbebens hin- und herkippen und somit eine große Menge an Energie aufnehmen ohne daß die Struktur dabei zum Bruch kommt (Bild 9). Zur Aussteifung des Unterbaus werden oft verkeilte biegesteife Rahmen verwendet. Das

Zusammendrücken des Holzes quer zur Faser dient dazu, möglichst viel Energie aufzunehmen.

Die dabei gelockerte Verbindung verringert die Eigenfrequenz des Gebäudes und trägt dazu bei, die hohen Beschleunigungen des Erdbebens zu dämpfen (Bild 10).



Bild 9: Energieaufnehmendes Balkensystem in japanischen Tempelbauten



Bild 10: Verkeilte biegesteife Verbindung in Tempelstruktur. Zu beachten sind die vom Erdbeben verursachten Verschiebungen

Struktursysteme zum Tragen von Erdbebenlasten

Da Erdbebenlasten größtenteils horizontal angreifen, sind die meisten Struktursysteme, die hauptsächlich auf Gravitationslasten ausgerichtet sind, oft nicht besonders effizient. In erdbebengefährdeten Gebieten muß man darum besonders darauf achten, daß genügend Widerstand vorhanden ist, diese Schwingungen standzuhalten. Es gibt im Grunde genommen drei Systeme, die sich dazu eignen, nämlich

1. Kreuzverstrebt Rahmen
2. Biegesteife Rahmen, und
3. Wandscheiben

Während man im Massivbau und Stahlbau gerne biegesteife Rahmen verwendet, da diese räumlich am wenigsten Platzprobleme verursachen, ist dies im Holzbau wegen der komplizierten Verbindungen recht problematisch. Man könnte höchstens mit Kopfbändern einen biegesteifen Rahmen nachahmen und somit den seitlichen Widerstand erreichen, trotzdem aber noch genügend Platz für Türen und Fenster haben (Bild 11).

Eine recht beliebte Methode, vor allem in industriellen Gebäuden, ist der verstrebt Rahmen. Meist hat man genügend Wandfläche, diese Kreuzverstrebtungen unterzubringen, welche dann wiederum einige Flexibilität zur Gestaltung der Wände und des Innenraums erlauben. Der grösste Nachteil der Kreuzverstrebtungen sind die hohen Kräfte, die an den Verbindungen auftreten. Vor allem im Holzbau kann dies problematisch werden und darum greift man oft zu Stahlverstrebtungen zurück (Bild 12). Diese können einfach mit dem Holzrahmen durch Druckverbindungen angekoppelt werden. Holzverstrebtungen sind da schon einmal um einiges komplizierter zu realisieren.



**Bild 11: Mit Kopfbändern verstrebt
Rahmen**

**Bild 12: Mit Stahlstäben querverstrebt
Rahmen**

Wandscheibensysteme sind für seitliche Belastungen besonders geeignet (Bild 13). Eine Wandscheibe kann drei Arten von Lasten aufnehmen: Erstens die vertikalen Gravitationslasten, dann die normal zur Wandfläche gerichteten Windlasten und drittens, die in der Wandfläche wirkenden Schubkräfte. Ferner tragen die Boden- und Dachflächen zur weiteren Lastableitung bei. Ein solches System funktioniert nicht ungleich eines Pappkartons, der durch die Kombination vieler Wandscheiben ein stabiles System bildet. Die Verbindungen für ein Wandscheibensystem sind recht einfach, da Nägel meist für die relativen geringen Lastübertragungen ausreichen. An Wandecken müssen manchmal noch zusätzlich Anker eingebaut werden um die Kippsicherheit zu gewährleisten. Ein weiterer Vorteil eines Wandscheibensystems ist die hohe Duktilität, da durch die vielen Nagelverbindungen grosse Mengen an Energie verbraucht werden, was zum Dämpfen eines Erdbebens besonders wirksam ist.



Bild 13: Wandscheibensysteme zur seitlichen Aussteifung von mehrstöckigen Apartment- und Einfamilienhäusern; (a) Sperrholzplatten; (b) OSB Platten; (c) Bretterbeplankung

Neues aus der Forschung

In Gebieten mit hoher Erdbebengefahr, vor allem in den Ländern des "pazifischen Feuerrings", hat man sich schon seit langer Zeit mit dem Thema Erdbebensicherheit befaßt. Holzbauten blieben jedoch stets das Stiefkind der Forschung und man hat sich erst nach den Katastrophen in Kobe und Los Angeles dieses Themas ernsthaft gewidmet. In Japan, Kanada und den USA sind umfangreiche Forschungsprojekte gestartet worden und es wird versucht, die noch vorhandenen Schwachstellen zu beseitigen. Ein umfangreiches Forschungsprojekt am Bauforschungsinstitut in Tsukuba (Japan) befaßt sich damit, moderne Konstruktionsarten einzuführen, wie z.B. das bewährte nordamerikanische Leichtbausystem. Zusätzlich ist man bestrebt, die Normen auf eine leistungsbewertende Basis ("performance based codes") zu bringen.

Die Forschungsaktivität schließt eine Vielfalt von Projekten ein, wobei das kalifornische "Woodframe Project" wohl das umfangreichste ist. Dieses 10 Millionen US Dollar schwere Projekt wurde vor zwei Jahren, motiviert durch die erheblichen Schäden beim Northridge Erdbeben in 1994, gestartet und befaßt sich mit einer Vielfalt von unterschiedlichen Themen. Diese umfassen experimentelle und analytische Untersuchungen sowie Sozial- und Informationskampagnen. Mehrere amerikanische und kanadische Institute sind daran beteiligt, z.B. auch die UBC, welche schon seit vielen Jahren Erdbebenforschung als eines ihrer Hauptforschungsziele eingestuft hat. Es wird vorwiegend experimentell geforscht obwohl es auch schon einige Computermodelle gibt, die für Holzbauten anwendbar sind. Letztere sind jedoch noch meist im Entwicklungsstadium und brauchen noch einige Jahre, um für die Praxis benutzerfreundlich gestaltet zu werden.

In Nordamerika hat sich die Forschung vielfach mit Holzwandscheiben befasst. Dieses genagelte System, das aus einem leichten mit Sperrholz- oder OSB-Platten beplankten Rahmen aus enggestellten Stützen kleineren Querschnitts besteht, verbraucht ein großes Maß an Energie unter Erdbebeneinwirkung. Dies geschieht durch die Verformung einer großen Anzahl von Nägeln, die sich bei Belastung in das Holz eindrücken und dabei Fließgelenke bilden. In letzter Zeit hat man dieses Wandscheibensystem weiterentwickelt, so daß es relativ hohe Schubkräfte aufnehmen kann, was vor allem für mehrstöckige Wohnungsbauten wichtig ist (Bild 13).

Übergroße OSB-Platten, die eine gesamte Wand beplanken, haben sich als besonders wirksam erwiesen, die Steifigkeit sowie den Gesamtwiderstand zu erhöhen (Lam *et al*, 1997, He *et al*, 1999). An der UBC in Vancouver wurde eine Reihe von Versuchen an 2,4 x 2,4 m und 7,2 x 1,8 m großen Wandscheiben durchgeführt. Diese waren mit normalgroßen (1,2 x 2,4 m) oder mit übergroßen (d.h. 2,4 x 2,4 m bzw. 7,2 x 2,4 m) OSB-Platten bedeckt. Einige hatten eine Tür- und eine Fensteröffnung (Bild 14). In allen Fällen hat sich dieses "Superplattensystem" hervorragend bewiesen (Bild 15). Mit derselben Anzahl von Nägeln hat man z.B. die Steifigkeits- und Widerstandswerte von Wandscheiben ohne Öffnungen verdoppeln können. Bei Wänden mit größeren Öffnungen bildeten sich an den Ecken hohe Spannungskonzentrationen und kam es hier häufig zum Reißen oder Beulen der Platten. Bei hohen Verschiebungen teilt sich die große Platte in kleinere Segmente und die Wand verhält sich dann mehr oder weniger wie eine mit kleineren Platten beplankte Wandscheibe (Bild 15).

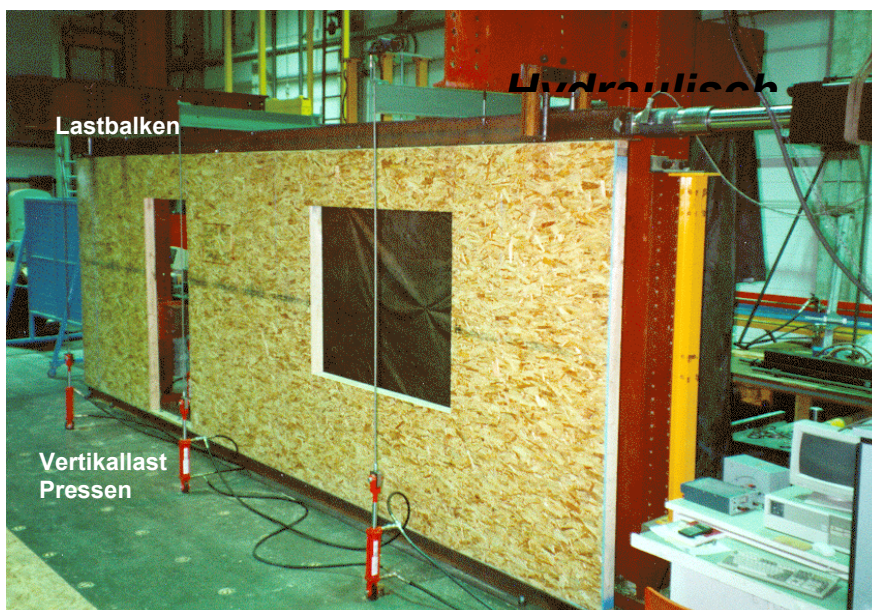


Bild 14:
Schubversuche an
mit übergroßen
OSB Platten
beplankten
Wandscheiben

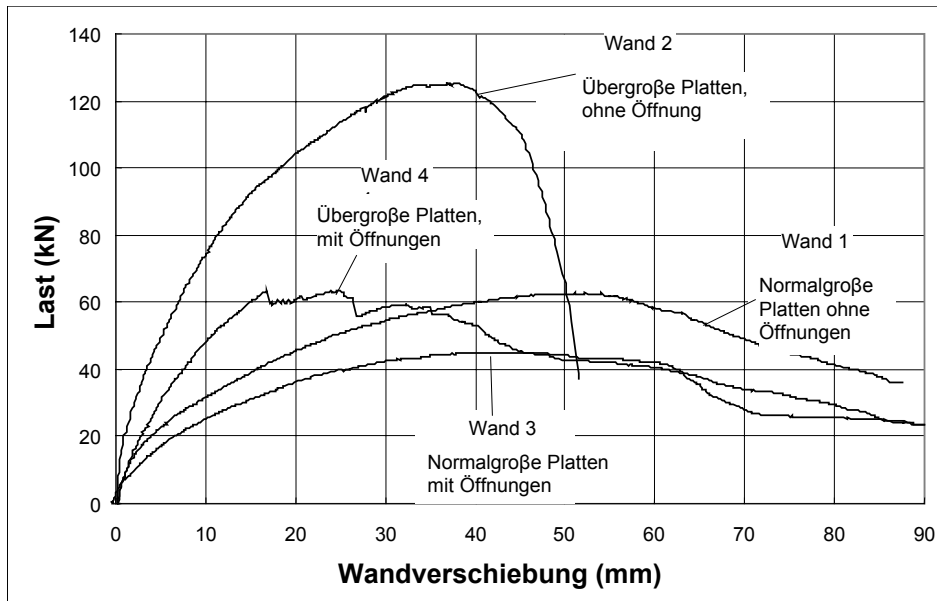


Bild 15:
Last-
Verschiebungskurven von
Wandscheiben
unter
Schubbelastung

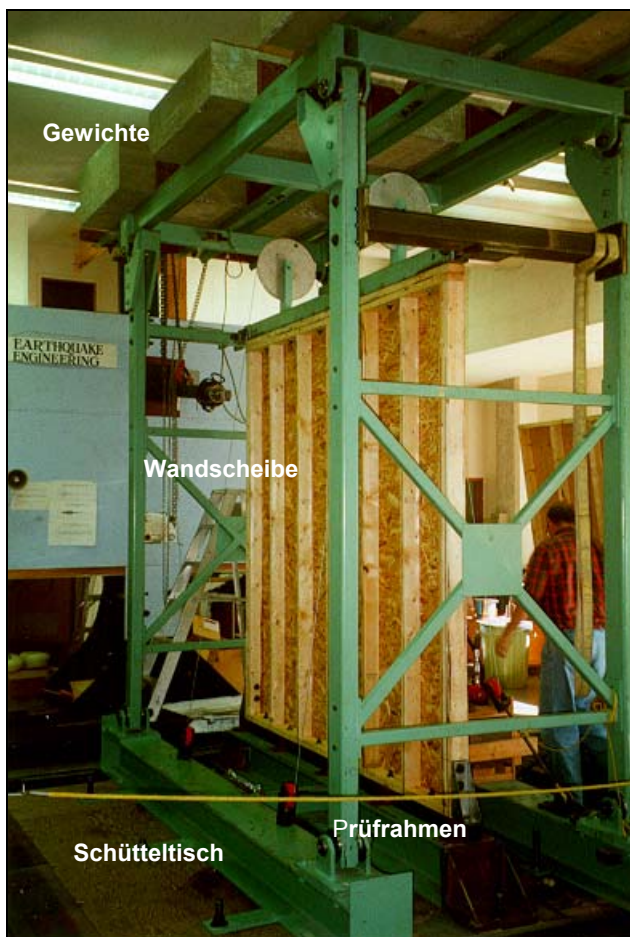


Bild 16: Wandplatte auf dem Schütteltisch
("shaking table") der UBC in Vancouver

Einige 2,4 x 2,4 m große Wandscheiben wurden Erdbebenerstürmungen ausgesetzt (Bild 16) wodurch ihr Erdbebenverhalten etabliert und Computerprogramme kalibriert werden konnten (Durham *et al*, 1999). Im Allgemeinen kann man den folgenden Vergleich aufstellen: Während kleinere Platten die Nagelkräfte besser verteilen und somit höhere Energiedissipationswerte erreichen, haben große Platten den Vorteil, daß Teilschäden an Gebäuden durch die höheren Steifigkeits- und Widerstandswerte erheblich verringert werden. Es muß jedoch auch in Betracht gezogen werden, daß ein steiferes System im Allgemeinen höhere Erdbebenkräfte anzieht. Darum ist es nicht unbedingt von Vorteil, die Steifigkeit bis auf das Maximum zu erhöhen.

Wichtig ist es, bei Holzleichtbauten den Systemeffekt zu erfassen, denn schlußendlich ist es die Kastenform, die weitgehend zur Einheit des Gebäudes beiträgt. Die nicht-strukturellen Elemente, wie Gipsplatten und -verputz, Außenhaut,

sowie Innen- und Querwände, tragen erheblich dazu bei, das Gebäude aufrecht zu halten und ebenfalls große Mengen an Energie durch Reibung aufzubrechen. Aus diesem Grunde hat man kürzlich an den Universitäten in Vancouver und San Diego maßstabsgetreue zweistöckige Wohnhäuser mit unterschiedlichen Wandsystemen und vollem Ausbau (Putz, Fenster, Türen, usw.) dynamisch getestet (Bild 17). Obwohl keines der Bauten

zusammenstürzte, warfen die großen Verschiebungen herkömmlicher Konstruktionssysteme starke Bedenken auf. Es erwies sich, daß ingenieurmäßig bemessene Wandscheiben mit Eckverankerung den meisten Erdbeben gewachsen sind, während sich spezielle Wandsysteme für schmale Wandsegmente besonders bewährten. An der Westküste Nordamerikas ist dies von großer Bedeutung, da die meisten Einfamilienhäuser bisher nicht für Erdbeben bemessen sind und zum großen Teil saniert werden müssen. Dies kann demzufolge in vielen Fällen mit einfachen und kostengünstigen Mitteln erreicht werden.



Bild 17: Zweistöckiges Haus auf dem Erdbebenprüfstand an der UBC in Vancouver

In Japan ist die traditionelle Holzrahmenbaumethode immer noch die beliebteste Bauart. In den letzten Jahrzehnten ist man jedoch allmählich von der traditionellen Bauweise, bei der nur Holzverbindungen zulässig waren, abgewichen und man findet häufig Metallverbinder in Kombination mit Zapfenverbindungen. Einige Versuche an solchen Rahmen haben jedoch wiederum bestätigt, daß die Knoten die Schwachpunkte in der Struktur bleiben. Es ist darum wichtig, kostengünstige und einfach zu installierende Verbindungsmittel zu entwickeln, die die traditionellen Zapfenverbindungen ersetzen können. Zu diesem Zweck hat man in Vancouver einige Versuche an

Holzrahmenwänden vorgenommen (Stefanescu, 1999) um unterschiedliche Rahmenaussteifungssysteme zu vergleichen (Bild 18). Querverstrebungen tragen erheblich zur Steifigkeit der Rahmen bei, der Bruch ist jedoch jedes Mal ein sprödes Versagen der Hauptknotenpunkte. Besonders günstig haben sich aufgenagelte OSB-Platten erwiesen. Ähnlich wie beim Holzwandscheibensystem tragen die Nagelverbindungen stark dazu bei, das Wandelement auszusteifen und gewährleisten so ein duktileres Versagensverhalten.

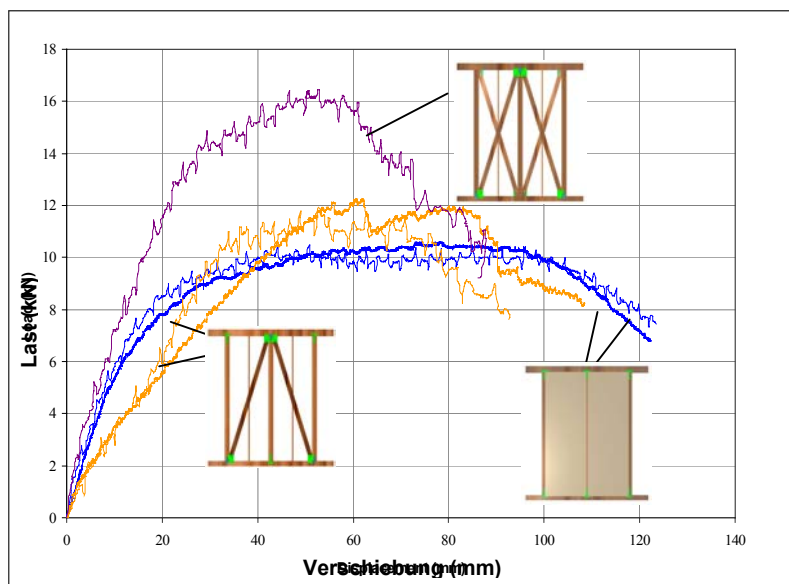


Bild 18:



Versuche an ausgesteiften Holzrahmenwänden; Versagen des Schwellenbalkens

Es ist klar, daß für Holzrahmenbauten die Verbindungen von besonderer Bedeutung sind. Mit einer Querverstärkung klassischer Verbindungen versucht man darum, das spröde Versagen in einen weicheren und energieabsorbierenden Mechanismus umzuwandeln.

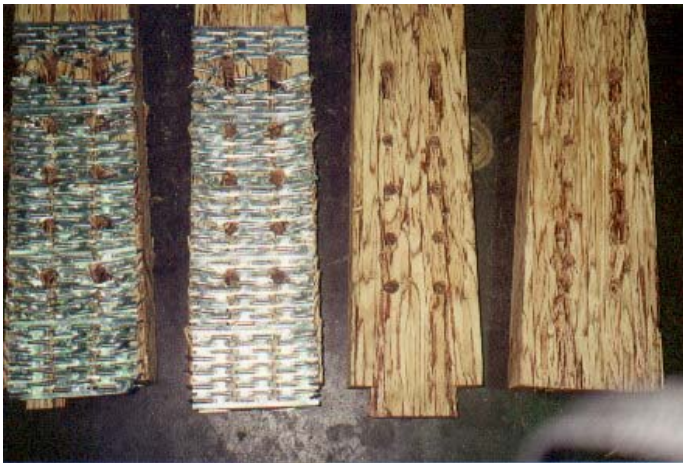


Bild 19: Mit Nagelplatten verstärkte Bolzenverbindungen in Parallam®

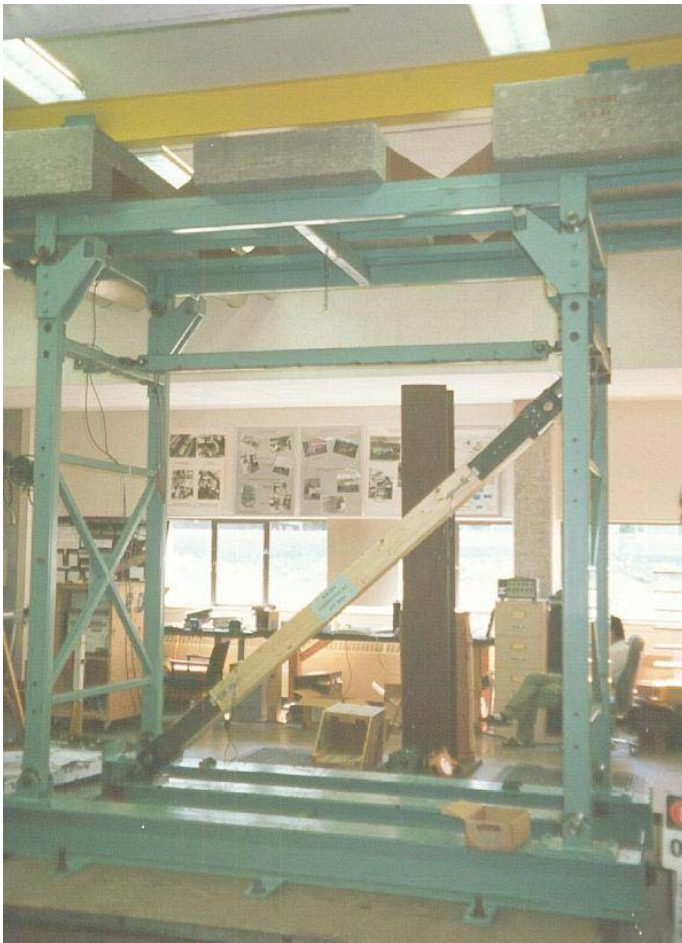


Bild 20: Rahmen mit Querverstrebungen im Prüfstand auf dem Schütteltisch der UBC, Vancouver

intensiv damit, zuverlässige Computerprogramme zu erstellen, die sich für die dynamische Analyse von Holzbauten eignen. Da Holz ein relativ kompliziertes Material ist, und Holzbauten vielfach recht komplex sind, ist dies keine einfache Aufgabe und derartige Programme sind darum oft sehr aufwendig. Im heutigen Computerzeitalter sollte die

Einige Versuchsprojekte haben sich damit befaßt, möglichst effiziente Verstärkungs-methoden zu entwickeln. Recht gute Erfolge wurden mit aufgeleimten verdichteten Sperrholzplatten und Nagelplatten erreicht (Blaß *et al.*, 2000, Hockey *et al.*, 1999)(Bild 19). Bei größeren Knotenpunkten reicht diese Oberflächenverstärkung jedoch nicht aus, und man muß tiefer ins Innere des Holzes eingreifen. Eingeschraubte Gewindestangen haben sich besonders bewährt, die Duktilität um ein mehrfaches zu erhöhen und somit spröde Brüche zu vermeiden. Die Bruchlast wird in den meisten Fällen jedoch kaum erhöht, denn diese ist bei ordnungsgemäßer Detaillierung prinzipiell von der Holzdruckfestigkeit und der Fließspannung des Dübel- oder Bolzenstahls abhängig. Unter einer ordnungsgemäßen Detaillierung versteht man, daß Rand- und Zwischenabstände nach den Normenregeln eingehalten werden. Ein umfassendes Forschungsprojekt an der UBC in Vancouver, in Zusammenarbeit mit dem Forschungsinstitut Forintek Canada Corp., hat sich damit befaßt, den Duktilitätsbeiwert ϕ für verstrebt Holzrahmen genauer abzuschätzen (Popovski *et al.*, 1998). Mit Versuchen an Verbindungsknoten unter zyklischen Belastungen, Schütteltischversuchen an Rahmenstrukturen und ausgiebigen Computeranalysen wurde dieser Wert für unterschiedliche Verbindungsmittel festgesetzt (Bild 20). Bei duktilen Verbindungen kann der Wert ϕ mitunter bis auf 0,24 herabgesetzt werden, während in vielen Fällen ein sprödes Versagen einen Wert von 0,4 oder höher erfordert.

An einigen Instituten befaßt man sich

Umsetzung jedoch nur eine Frage der Zeit sein und man wird bald auch Holzbauten für Erdbeben effizient rechnen und bemessen können.

Zusammenfassung

Dieses Referat sollte einen kurzen Überblick über das Thema "Erdbebensicherheit von Holzbauten" geben. Obwohl Holz ohne Zweifel einer der ältesten und meist verbreiteten Baustoffe ist, lernt man doch immer noch dazu, wie man dieses von der Natur geschaffene Material am effizientesten in der Bauindustrie anwenden kann. Vor allem bei großen Katastrophen drängt sich dieses Thema besonders in den Vordergrund, da oft große Verluste an Menschenleben und erhebliche Finanzschäden erlitten werden. Im Allgemeinen haben sich Holzkonstruktionen bei Erdbeben als besonders widerstandsfähig erwiesen und man ist vielfach dazu geneigt, dieses als selbstverständlich anzunehmen. Erhebliche Verluste bei Erdbeben in den letzten Jahren deuten jedoch darauf, daß sich nicht alle Holzkonstruktionsarten für Erdbebengebiete eignen. Man muß bedenken, daß Holz alleine nicht die Erdbebensicherheit gewährleistet und es muß besonders auf Verbindungsdetails geachtet werden, so daß es nicht zu Schäden oder sogar zu Zusammenstürzen kommt. Die besondere Eigenschaft des Holzes, beträchtliche Mengen an Energie bei großen Verschiebungen aufzunehmen muß mit Vorsicht betrachtet werden, denn Holz zeigt auch, unter gewissen Umständen, spröde Versagenserscheinungen.

Umfangreiche Forschungsprojekte befassen sich mit dem Thema „Erdbebensicherheit von Holzbauten“ und es ist zu erwarten, daß eine Vielzahl an Informationen über dieses Thema in den nächsten Jahren erscheinen wird.

Quellenverzeichnis

Blass, H.J., Schmid, M., Litze, H., Wagner, B., „Nail Plate Reinforced Joints with Dowel Type Fasteners“, Proc. World Conference on Timber Engineering, Whistler, BC, Canada, Paper No. 8.6.4., 2000.

Durham, J., Prion, H.G.L., Lam, F. and He, H., "Earthquake Resistance of Shearwalls with Oversize Sheathing Panels", Proc. 8th Canadian Conf. on Earthquake Engineering, Vancouver, BC, 13-16 June 1999, 161-166.

Hall, J.F. (Ed.), „Northridge Earthquake January 17, 1994. Preliminary Reconnaissance Report“, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California, USA, 104pp., 1994.

He, M., Magnusson, H., Lam, F., Prion, H.G.L., "Cyclic Performance of Perforated Wood Shear Walls With Oversize OSB Panels", *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 125(1), p. 10-18, 1999.

Hockey, B., Prion, H.G.L., Lam, F. and Popovski, M., "Ductile Timber Connections for Earthquake Resistant Design", Proc. 8th Canadian Conf. on Earthquake Engineering, Vancouver, BC, 13-16 June 1999, 143-148.

Lam, F., Prion, H.G.L., and He, M. "Lateral resistance of wood based shear walls with large sheathing panels." *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 123(12), USA, p.1666-1673, 1997.

NBCC95, National Research Council of Canada, *National Building Code of Canada*, Canadian Commission on Building and Fire Codes, 1995.

Popovski, M., Prion, H.G.L., Karacabeyli, E., "Influence of Connection Details on Seismic Performance of Braced Timber Frames", Eleventh European Conference on Earthquake Engineering, Paris, France, September 6-11, 1998, 12 pp

Prion, H.G.L. and Filiatrault, A.F. "Performance of Timber Structures during the Hyogo-Ken Nanbu Earthquake of 17 January, 1995", *Can. Journal of Civil Engineering*, Vol.23, No.3, 652-664, 1996.

Rainer, J.H., Karacabeyli, E., „Performance of Wood-frame Building Construction in Earthquakes“, Special Publication No. SP-40, Forintek Canada Corp. , Vancouver, BC, 1999.

Stefanescu, M., „ Lateral resistance of traditional Japanese post and beam frames“, M.A.Sc. Thesis, Department of Wood Science, University of British Columbia, Vancouver, Canada, 104 pp, 2000.

Danksagung

Den folgenden Personen sei gedankt für ihre Mitarbeit beim Verfassen dieses Referats: Alexander Schreyer, Mehdi Kharrazi