

Entwicklung eines erdbeben- und sturmsicheren Wandelementes

**Dipl.-Ing.
Patrick Schädle**

**Univ.-Prof. Dr.-Ing.
Hans Joachim Blaß**

**Lehrstuhl für
Ingenieurholzbau und
Baukonstruktionen
Universität Karlsruhe**

Schaedle@holz.uka.de



Zusammenfassung

Die Forschungsarbeit zur Weiterentwicklung eines Holzbausystems wird vorgestellt. Das System, mit dem Wandscheiben einfach und kostengünstig errichtet werden können, soll großen Horizontalkräften, wie Sie bei Sturm- und Erdbebenlasten auf Bauwerke wirken, sicher widerstehen können. Die Neuentwicklung einer Prüfapparatur, mit der gleichzeitig vertikale sowie horizontale Lasten auf die Wandscheiben aufgebracht werden können, wird präsentiert und die Verwendung der Apparatur bei der Erzeugung verschiedener Versuchsbedingungen gezeigt. Bauteilversuche zur Ermittlung der Eigenschaften der einzelnen Bausteine des Holzbausystems und der Wände werden präsentiert und ein Ausblick auf das weitere Vorgehen gegeben.

1 Einleitung



Abb. 1: Vorgefertigter Wandbaustein, Detail überstehende Stege

Das System aus vorgefertigten Wandbausteinen des Herstellers HIB („Holz-Isolier-Bau“) GmbH soll im Rahmen des Forschungsvorhabens überarbeitet und weiterentwickelt werden. Die vorgefertigten Holzelemente bestehen aus zwei parallelen Platten, in deren Mitte vertikale Stege angebracht sind. Die Wandbausteine werden auf der Baustelle ineinander gesteckt und mit Klammern verbunden. In den Hohlräumen zwischen den Stegen können sowohl die Dämmung als auch Installationen untergebracht werden. Das Grundelement mit der Länge $\ell=1,0$ m und der Höhe $h=0,5$ m ist in Wanddicken von $b=160$ mm, $b=240$ mm oder $b=300$ mm erhältlich. Die vertikal im Abstand von 250 mm angeordneten Stege

sind mit Schwalbenschwanznuten versehen, in welche schadstofffreie Livingboardplatten (ein der OSB – Platte ähnlicher Holzwerkstoff) beidseitig eingeschoben werden. Die Stege stehen oben 4 cm aus dem Element heraus, dieser Überstand greift beim zusammenstecken in das Element der nächsten Lage ein, ein erster Verbund der Elemente in horizontaler Richtung entsteht. Zusätzlich ist auf der späteren Innenseite des Gebäudes eine zweite Livingboardplatte mit einem Versatz von 3 cm angeordnet. Dieser Versatz dient zur Aufnahme von Verbindungsmitteln in der Lagerfuge. Auf der Außenseite ist eine Bretterlage angebracht, an die die Unterkonstruktion für die Fassade angeschlossen wird. Die einzelnen Elemente der Wandscheibe werden im Läuferverband angeordnet, für den unteren und oberen Abschluss der Wände sind Schwellen bzw. Einbinder im System enthalten. In einem maximalen Abstand von 3,0 m sind in jede Wand zusätzlich vertikale Stiele („Zugstützen“) einzubringen. Durch die Vorfertigung und die einfache Montage der Elemente wird eine schnelle und damit wirtschaftliche Bauausführung erreicht, bei der die Bauherren einen hohen Anteil Eigenleistung erbringen können.

Eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für die Verwendung des Systems bei bis zu dreigeschossigen Wohngebäuden und vergleichbar genutzten Gebäuden wurde im September 2007



Abb. 2: Wohngebäude aus vorgefertigten Wandelementen im Rohbau

erteilt. Für Bauten in Erdbebengebieten wird die Wand nun auf ihre Eigenschaften unter horizontalen Lasten geprüft. Im Hinblick auf eine Markteinführung in Nordamerika soll die Wand nach ihrer Weiterentwicklung im Rahmen dieses Projektes die dortigen Anforderungen an Wandbauteile erfüllen können. Ein grundsätzlicher Vorteil von Holzhäusern unter Erdbebenbelastung liegt im geringen Gewicht des Werkstoffes Holz. Die sog. „seismische Masse“, welche bei einem Erdbeben zur Bewegung angeregt wird, ist gering. Weiterhin wird im Holzbau eine Vielzahl mechanischer Verbindungsmittel eingesetzt, deren Verhalten im Zusammenspiel mit den Eigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen eine Vielzahl von positiven Aspekten mit sich bringt.

2 Prüfung von Holzbauteilen auf Erdbeben- und Sturmlasten

Die auf ein Gebäude einwirkenden Belastungen wie Eigengewicht, Verkehrslasten und auch Schnee wirken in erster Linie vertikal auf die Konstruktion ein. Beim Angriff einer horizontalen Last aus Wind bzw. Sturm oder Erdbeben werden die horizontalen Lasten von den Geschößdecken zu den aussteifenden Wänden weitergeleitet. Die Aussteifung eines Gebäudes wird im Allgemeinen durch rechtwinklig angeordnete Innen- und Außenwände übernommen. Die Wände leiten die horizontale Belastung in die darunter liegenden Decken und schließlich in den Baugrund weiter. Die Anordnung der Wandtafel innerhalb des Gebäudes bestimmt hierbei ihren Anteil an der Abtragung der horizontalen Lasten.

Im Gegensatz zu Lasten aus Eigengewicht und Verkehr sind Sturm- und Erdbebenlasten keine statisch aufgebrachten Lasten, sondern a) verändern sich die Größe und beim Erdbeben auch die Richtung der aufgebrachten Last und b) greifen die Kräfte mit hohen Geschwindigkeiten an. Diese Eigenarten führen dazu, dass ein aussteifendes Bauteil für Belastungen in Richtung parallel zu seiner Ebene ausgelegt werden muss und die durch ruckartige Einwirkungen eingeleitete Energie ohne schwerwiegende Folgen für das Gebäude und die Bewohner bleiben muss. Die eingeleitete Energie sollte zu möglichst großen Teilen in der Konstruktion „vernichtet“ werden, man spricht hierbei von „Energiedissipation“.

Während bei kleineren Verschiebungen sowohl der Baustoff Holz als auch die Verbindungsmittel linear – elastisches Verhalten zeigen, stellen sich bei größeren Verschiebungen plastische Verformungen im Holz und in den Verbindungsmitteln ein. Dieses plastische Verhalten wird auch als „Zähigkeit“ oder „Duktilität“ bezeichnet. Duktilität ist die Eigenschaft eines Werkstoffes, vor seinem Versagen bleibende Verformungen ertragen zu können. Das Versagen eines duktilen Bauteils wird also nicht schlagartig, sondern langsam und unter „Ankündigung“ (große Verformungen) erfolgen. Holzbauteile sind durch das Zusammenwirken von Werkstoff und mechanischen Verbindungsmitteln sehr duktil. Sowohl das Lochleibungsversagen als auch das Verhalten der Verbindungsmittel unter Biegebeanspruchung sind durch große plastische Verformungen gekennzeichnet und kommen dem gewünschten, zähen Versagen zugute.

Holzbauwerke in erdbebengefährdeten Gebieten müssen in der Lage sein, Beanspruchungen mit wechselnden Richtungen zu ertragen. Um vergleichbare Versuchsergebnisse zu erhalten, haben sich bei der Prüfung von Anschlüssen mit mechanischen Verbindungsmitteln Verfahren mit zyklischer Lastaufbringung bewährt. Hierbei werden Belastungen mit wechselnden Richtungen aufgebracht. Die Verfahren der zyklischen Lastaufbringung dienen der Vereinfachung des komplexen Belastungsmusters realer Beanspruchungen aus Erdbebenlasten. Die vergleichsweise langsamen Prüfgeschwindigkeiten der zyklischen Lastaufbringung wurden gewählt, um mit üblichen Prüfmaschinen Untersuchungen durchführen zu können und deren Ergebnisse auf einen vergleichbaren Nenner bringen zu können.

Bei der Verschiebung einer Verbindung über die Elastizitätsgrenze hinaus wird das Holz unter dem Verbindungsmittel plastisch verformt, ebenso erreicht das Verbindungsmittel sein Fließmoment

und wird in der Richtung der Belastung verformt. Beim Durchlauf einer wiederholten Belastung schließt die Kurve („Hysterese“) eine Fläche ein, der Inhalt dieser Fläche ist das Maß für die dissipierte Energie. Abb. 3 ist zu entnehmen, dass die plastische Verformbarkeit des Stahls in der Verbindung

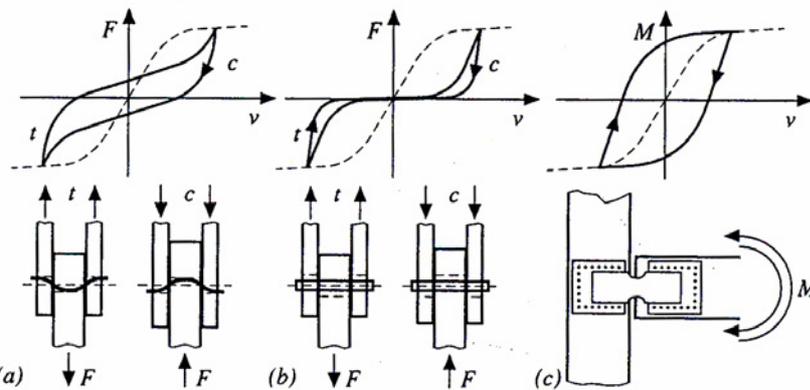


Abb. 3: Verbindungen unter zyklischer Last: a) dünner Stabdübel
b) gedrungener Stabdübel c) Stahlblech - Holz [1]

die Form der Hystereseschleife und ihren Flächeninhalt wesentlich beeinflusst. Schlanke Verbindungsmittel, wie in Abb. 3(a) zu sehen, sind leicht verformbar und können bei wiederholter Belastung durch ihre Kragarmwirkung Energie dissipieren. Gedrungene Verbindungsmittel, wie in Abb. 3(b) zu sehen, werden unter zyklischen Belastungen nur wenig oder gar nicht verformt, daher ist ihre Energiedissipation gering. Abb. 3(c) zeigt nahezu ideal-plastisches Verhalten eines

Stahlbleches in einer Verbindung zur Übertragung eines Moments. Die gesamte Dissipation einer Wand setzt sich aus der Energiedissipation der einzelnen stiftförmigen Verbindungsmittel zusammen. Hinzu kommen Reibungseinflüsse, z.B. Reibung der Beplankung auf den Stielen oder Reibung der Füllung in den Wänden. Bei der Wand aus den vorgefertigten Elementen sind mehrere Teilbereiche zur Energiedissipation geeignet. Der Überstand der Stege greift in das nächste Element ein, hier wird eine plastische Verformung des Holzes stattfinden, weiterhin sind in den Lagerfugen im Abstand von 5 cm Klammern eingebracht, die aufgrund ihrer schlanken Geometrie und ihrer hohen Anzahl einen großen Beitrag zur Energiedissipation leisten.

3 Entwicklung einer Prüfapparatur für kombinierte Belastungen

Im Hinblick auf die Beurteilung der Stabilität und des Erdbebenverhaltens von Wänden in Holzbauweise ist die Durchführung und Bewertung von geeigneten Bauteilversuchen nötig. Momentan gibt es jedoch weder in Europa noch in Nordamerika ein einheitliches Prüfverfahren zur Durchführung derartiger Versuche an Wandscheiben. Üblicherweise werden Wände in einen Prüfraumen eingespannt und kontrolliert eine Horizontallast entweder monoton oder zyklisch aufgebracht, welche bis zum Versagen der Wand gesteigert wird. Problematisch ist die „richtige“ Einspannung der Wand in der Prüfapparatur, also die Erzeugung von Lagerungsbedingungen, wie sie auch beim realen Bauwerk anzutreffen sind und eine wirklichkeitsnahe Verformung der Wand zulassen.

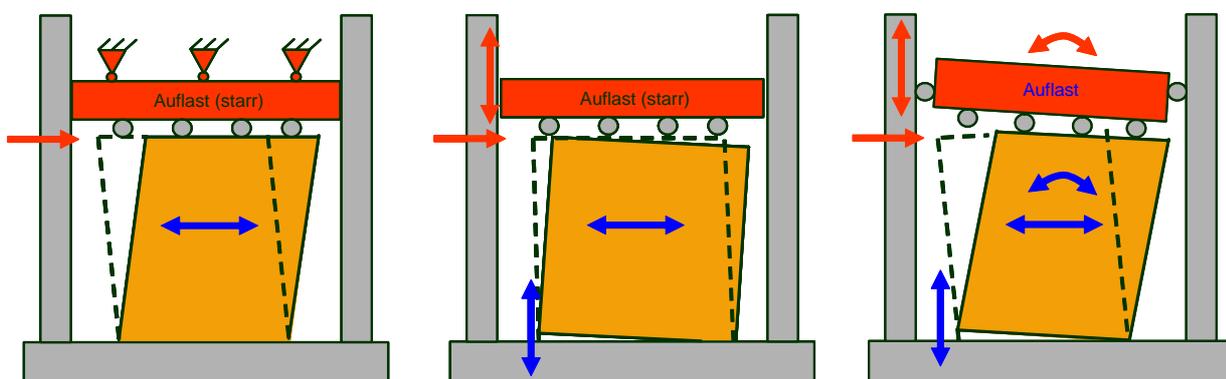


Abb. 4: Lagerungsbedingungen nach [2], a) Shear Wall Mechanism, b) Restricted Rocking Mechanism, c) Rocking Mechanism

Bei vielen Prüfvorrichtungen ist es nicht möglich, große Belastungen oder große Verformungen aufzubringen, ohne dass sich die Randbedingungen der Prüfung, z.B. durch Verkanten der Wand ändern. Die Kritik an den gültigen Normen entspringt vor allem den unzureichenden Angaben über die Lagerung der Wände beim Versuch. In [2] führten Dujic et al. zur Klärung der „richtigen“

Lagerung der Wandscheiben bei Versuchen umfangreiche Untersuchungen von Wandscheiben mit horizontaler Last durch. Hierbei wurden verschiedene Arten der Einspannung erzeugt (s. Abb. 4a): Auflast ohne Möglichkeit der vertikalen Verschiebung und ohne Möglichkeit der Rotation (=starre Einspannung, „Shear Wall Mechanism“ (Schermechanismus), z.B. bei Ausfachung eines Rahmens). Die abhebenden Kräfte an der Wand werden bei einer horizontalen Verschiebung vom Rahmen abgefangen, durch die starre Einspannung der Wand in der Prüfapparatur werden unrealistisch hohe Traglasten in horizontaler Richtung erzeugt. In einigen Normen ist diese Art der Lastaufbringung durch Abspannen der Wand auf den Boden vorgegeben. Abb. 4b): Auflast mit Möglichkeit der vertikalen Verschiebung aber ohne Möglichkeit der Rotation (=starre Auflast, „Eingeschränkter Kipp – Mechanismus“ (Restricted Rocking Mechanism). Bei einer Kipp – Bewegung der Wand können die abhebenden Kräfte die Auflast nach oben drücken, dies kann bei geringen Auflasten, z.B. bei Erdgeschoßwänden von einstöckigen Wohngebäuden der Fall sein. Kipp – Bewegungen

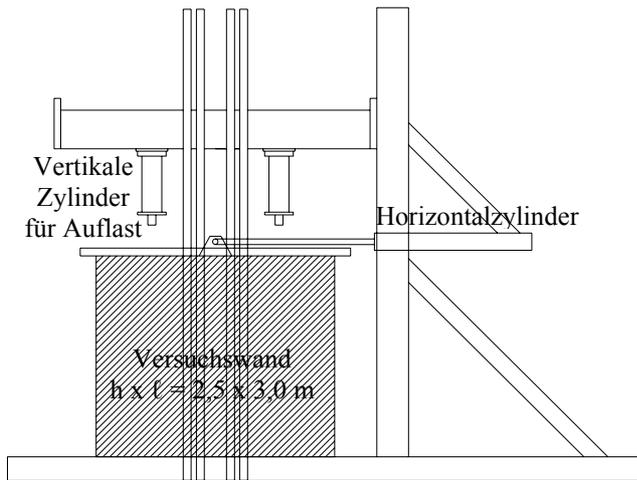


Abb. 5: Grundlegender Aufbau der neuen Prüfapparatur an der Universität Karlsruhe

der Wand können auch bei unzureichender Bodenverankerung der Wand auftreten, wenn die Schubtragfähigkeit also größer ist als die Tragfähigkeit der Verbindung von Wand zu Fundament. Abb. 4c): Auflast mit Möglichkeit der vertikalen Verschiebung und mit Möglichkeit der Rotation (=bewegliche Auflast, „Kipp – Mechanismus“ (Rocking Mechanism). Dieser Mechanismus tritt in der Natur z.B. dort auf, wo leichte Dachaufbauten die Wand belasten. Leichte Dächer werden bei der Bewegung der Wand die Rotation kaum einschränken, die Vertikalkräfte bleiben konstant. Bei der Versuchsdurchführung ergeben sich für den Kipp – Mechanismus (c) die geringsten Traglasten. Diese Art der Lagerung wird daher für die Durchführung von Versuchen empfohlen: Sie stellt die konservative Annahme für die Tragfähigkeit dar und ist in der Realität eine häufig anzutreffende Randbedingung. Alle genannten Lagerungsbedingungen können am neuen Prüfrahmens der Universität Karlsruhe durch das kraft- bzw. weggesteuerte Ansteuern der vertikalen Zylinder erzeugt werden.

4 Versuche am System aus vorgefertigten Wandelementen

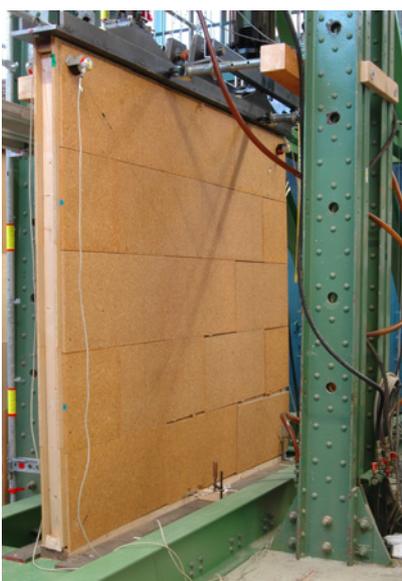


Abb. 6: Wandscheibe in der Versuchsapparatur

Im Rahmen einer früheren Untersuchung am System aus vorgefertigten Wandelementen konnten große Verschiebungen im Bereich der horizontalen Fugen zwischen den Elementen festgestellt werden. In vorab durchgeführten Versuchen wurden daher die Eigenschaften der Elementfuge genauer untersucht. Jeweils drei Elemente wurden zu einem Scherkörper zusammengesetzt, die Fuge zwischen den Elementen mit verschiedenen Anordnungen der Verbindungsmittel geprüft und der Betrag der Auflast variiert, um deren Einfluss sichtbar zu machen. Die Versuche zur Ermittlung der Steifigkeiten und der aufnehmbaren Höchstlast von ganzen Wandscheiben sollen mit den Randbedingungen des oben erwähnten „Rocking Mechanism“ (c), also mit der Möglichkeit der vertikalen Verschiebung sowie der Rotation der Auflast erfolgen. Die Versuche werden mit verschiedenen Auflasten durchgeführt, um den positiven Einfluss hoher Auflasten herauszustellen. Zu Beginn der Versuchsreihe werden Versuche mit monotoner Lastaufbringung durchgeführt (Abb. 7), hierbei wird die Last in einer Richtung bis zum Erreichen der Höchstlast gesteigert. Bei diesen sog. „Push – Over - Versuchen“ werden zwei Vorlastzyklen zur Ermittlung der Steifigkeit der Wand durchgeführt. Weiterhin liefern diese Versuche Eingangsdaten für die spätere Durchführung von zyklischen Ver-

suchen (Abb. 8). Bei den Push - Over - Versuchen wurden Auflasten von 1,33 kN/m, 10 kN/m sowie 20 kN/m auf die Versuchskörper aufgebracht. Es zeigte sich, dass die Versuchsanlage die gewünschten Randbedingungen erzeugen kann und sich sowohl die vertikale Verschiebung der Auflast als auch die Rotation der Wandscheibe einstellen. Bei den Versuchen konnten bereits Verbesserungen am System vorgeschlagen werden, an deren Umsetzung in Zusammenarbeit mit dem Hersteller gearbeitet wird. Nach der Überarbeitung von weiteren Details, die bei den Versuchen

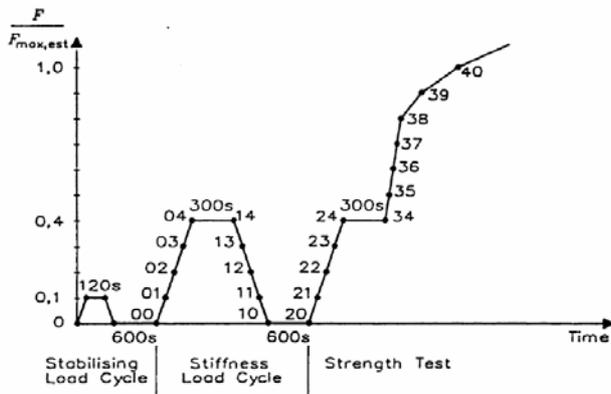


Abb. 7: Verfahren der monotonen Lastaufbringung [3]

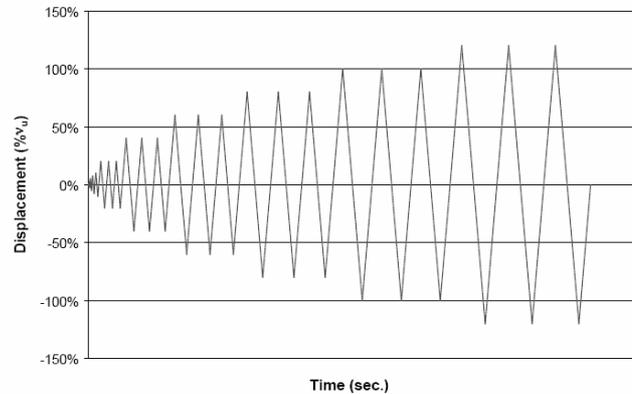


Abb. 8: Verfahren mit zyklischer Lastaufbringung [3]

mit monotoner Lastaufbringung zu erkennen sind, werden zyklische Versuche am System durchgeführt. Durch die vielen dissipativen Bereiche im System werden hier gute Ergebnisse erwartet. Anschließende Untersuchungen sollen sich mit dem Einfluss von Füllungen in den Wänden (z.B. Kies) befassen. Die Kiesfüllung bringt zusätzliche Masse in die Wände ein, welche dem Abheben entgegenwirkt und als zusätzlicher Wärmespeicher dient. Zudem stellt die Schicht aus Kieselsteinen bei schweren Stürmen einen Schutz gegen das Durchschlagen der Wand durch umher fliegende Teile dar. Durch die Reibung der Kieselsteine aneinander wird ein weiterer Mechanismus zur Energiedissipation aktiviert.

5 Weiteres Vorgehen bei den Untersuchungen

Im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens soll die Wandscheibe durch ein FiniteElemente-Modell abgebildet werden. Die numerische Modellierung der Push – Over – Versuche soll die Kräfteverteilung in der Wandscheibe wiedergeben, um auch bei anderen Bauteilabmessungen sowie beim Einbau von Öffnungen eine Berechnungsmöglichkeit für die Wandscheiben zu erhalten.

Das Finite – Elemente - Modell soll so weiterentwickelt werden, dass auch die zyklischen Untersuchungen abgebildet werden können. Aufbauend auf der korrekten Modellierung der zyklischen Versuche, können die Weg – Zeit – Verläufe von realen Erdbeben auf das Modell übertragen werden, um das Verhalten unter realen Belastungen zu beschreiben. Die Beschreibung von hysteretischer Dämpfung und viskoser Dämpfung sowie der linearen Rückstellkraft der Wand bilden hierbei wiederum Eingangsgrößen für eine weitergehende Modellierung, z.B. von vollständigen Wohngebäuden.

6 Literatur

- [1] Ceccotti, A. (1995): Holzverbindungen unter Erdbebenbeanspruchungen. *Holzbauwerke STEP 1 – Bemessung und Baustoffe*. Hrsg.: Blaß, H.J., Görlacher, R., Steck, G., Fachverlag Holz, Düsseldorf.
- [2] Dujic, B.; Aicher, S.; Zarnic, R. (2005): Investigations on in-plane loaded wooden elements – influence of loading and boundary conditions. *Otto-Graf-Journal Vol. 16, 2005*
- [3] Committee Draft ISO/CD 21581 (2007) – Timber Structures – Static and cyclic lateral test method for shear walls