

„Das erdbebensichere Holzhaus“ – Forschungsbericht

Kamyar Tavoussi, Wolfgang Winter, Tamir Pixner

Zusammenfassung Der moderne Holzbau soll große Öffnungen in der Fassade ermöglichen. Die Optimierung einer erdbebentauglichen Tragstruktur unter Verwendung von einer geringen Anzahl von massiven aussteifenden Wänden und unkonventionellen hochleistungsfähigen Verankerungssystemen aus Stahl war das Ziel des Forschungsprojektes „das erdbebensichere Holzhaus“, welches in Kooperation mit einem Brettsperrholz(BSP)-Hersteller und der „Holzforschung Austria“ durchgeführt wurde.

Die Mehrschichtplatten aus Holz wurden in einer Vakuumpresse zusammengeleimt. Die Platten wurden durch die Anzahl der Schichten und deren Konfiguration optimiert.

Es wurden 17 Versuche mit unterschiedlichen Wandaufbauten gefahren.

Die Resultate zufolge hoher monotoner und zyklischer Horizontalbelastung waren sehr zufriedenstellend.

The earthquake resistant timber house

Abstract In modern timber buildings big openings in the façade are getting more common. The aim of the presented research project conducted together with a producer of CLT and the Austrian forest products laboratory (Holzforschung Austria) was to minimize the number and size of the shear walls provided to resist seismic loads by using stiff massive panels and non-conventional high performance anchorage systems in steel.

The panels out of several layers of boards were glued using vacuum pressing equipment. These elements were optimized by the variation of the number of layers and their geometry.

Several full size tests with different configuration of boards were carried out.

The tests showed good results even for high horizontal cyclic loadings.

1 Einleitung

Bauten mit und aus Holz im urbanen Raum haben eine lange Tradition in Europa. Im vergangenen Jahrhundert dominierten jedoch Ziegel- und Betonmassivbauten. Seit einigen Jahren bieten moderne Holzkonstruktionen aus Brettchichtholz und Brettsperrholz eine Alternative für mehrgeschossige Bauten.

BSP wurde vor ca. 15 Jahren in Europa entwickelt, wird mit Hydraulischen Pressen mit Drücken von 5-7kg/cm² produziert und kommt als Tragelement zum Einsatz.

Gemeinsam mit der Firma Mölltaler ÖkoHaus [1] wurde ein Forschungsprojekt initiiert, das eine innovative, erdbebensichere Holzbauweise mit möglichst offenen Grundrissen und Einsatz weniger, schlanker Scheiben zum Ziel hatte.

Mit der firmeneigenen Vakuumpresse der Firma ÖkoHaus wurden mehrschichtige Brettsperrwände hergestellt.

Bei dieser Methode werden die einzelnen Brettlagen mit einem Druck von 1-2 kg/cm² zusammengeleimt.

Der Wandaufbau stellte eine zentrale Rolle des Forschungsprojektes dar.



Abbildung 1: Vakuumpresse
Figure 1: Vacuum press

Der Entwurf eines 2-geschossigen Einfamilienhauses war wegen der asymmetrischen Anordnung der wenigen Aussteifungswänden und der relativ geringen Torsionssteifigkeit für die Erdbebenberechnung besonders interessant (Abb.2). Ein „Propellersystem“ aus horizontalen Deckenscheiben ist entwickelt worden, um die horizontalen Lasten zu den aussteifenden Wandscheiben zu übertragen (Abb.3). Die Deckenkonstruktion im übrigen Bereich sollte nach konventionellen Methoden konstruiert werden können.

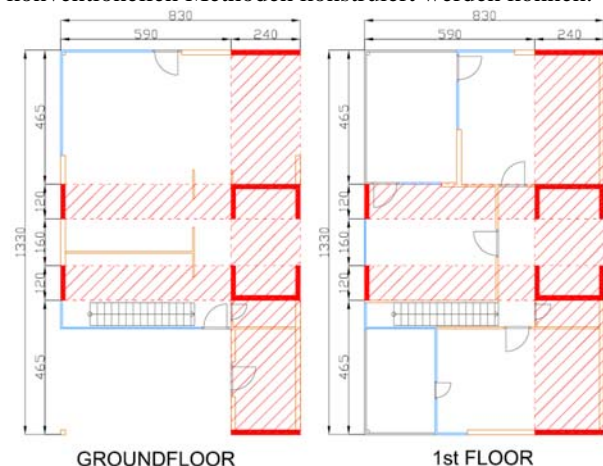


Abbildung 2: Grundrisse: Die roten Wände stellen die aussteifenden Wände dar. Die strichlierten roten Deckenelemente stellen die steifen Deckenelemente (Hauptstruktur) dar.

Figure 2: Plan view of ground floor and first floor

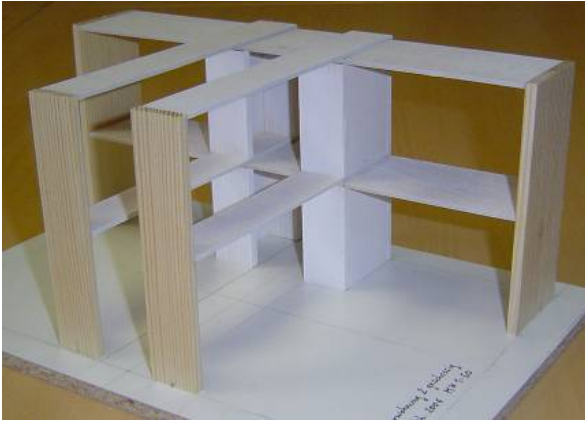


Abbildung 3: 3D-modell der aussteifenden Wände und des „Propellersystems“
 Figure 3: 3D-model of stiffening walls and “propeller-system”

2 Entwurfsgrundlagen

Für die Erdbebenberechnung wurde die Erdbebenzone 1 in Italien mit einer horizontalen Bodenbeschleunigung von 0,35g herangezogen.

Die Lastaufstellung für den Erdbebennachweis erfolgte nach EN 1990 [2].

Die Berechnungen nach italienischer Norm [3], welche im Wesentlichen auf dem Eurocode 8 [4] basiert, lieferten hohe horizontale Belastungen und Verankerungskräfte für die Wandscheiben. Diese Kräfte (ca. 400 kN Zug!) waren mit konventionellen Verankerungen nicht zu übernehmen. Dies hat eigens entwickelte Verankerungen erforderlich gemacht.

Für die statischen und dynamischen Berechnungen wurde für das „Wand-Flächenelement“ ein Ersatzstabmodell als Stabrost mit einzelnen quadratischen Elementen mit den Seitenlängen 60/60 cm generiert um ein gängiges Stabwerksprogramm (in dem Fall Programm R-Stab von Fa. Dlubal [5]) anwenden zu können; die Stäbe sind um jeweils 15 cm planexzentrisch an die vier Knotenpunkte angeschlossen. Mit diesem Programm wurde dann die Belastung des Gebäudes durch 7 künstlich generierten Beben (nach EC-8) im Zeitverlaufsverfahren simuliert.

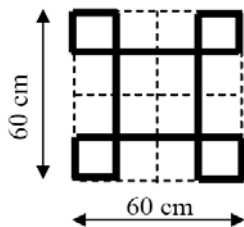


Abbildung 4: Quadratisches Element für das Ersatzstabmodell der Wände
 Figure 4: Quadratic frame

3 Entwicklung und monotone Versuche von 12 unterschiedlichen Wandtypen

3.1 Wandaufbauten

Es wurden verschiedene Wandaufbauten und Wandstärken angedacht und aufgrund der Firmenpräferenzen produziert

Diese unterschiedlichen Aufbauten bezogen sich auf die Ausrichtung und die Variation der Winkel der einzelnen Schichten. Die Geometrie aller Prüfkörper war 1200/2800 mm. Die Holzgüte der einzelnen Bretter war C24 (ausgenommen W5 und W6) nach EN 338 [6].

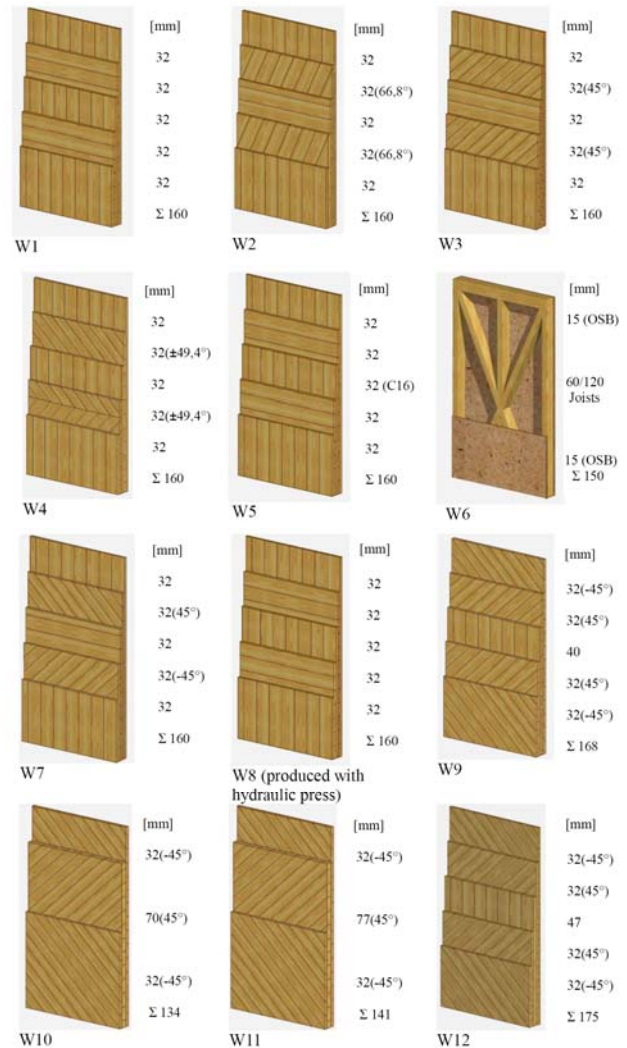


Abbildung 5: Wandaufbauten (Material, Dicken, Winkel der Brettlagen)
 Figure 5: Panel types with thickness and angle of inclined laminated boards

3.2 Versuchsaufbau

Die höchste ermittelte Horizontalbelastung für das maßgebende Wandelement aus der dynamischen Analyse war ca. 140 kN. Die üblichen Versuche an Schubwänden werden mit deutlich niedrigeren Belastungen (10 – 20 kN) durchgeführt. Der bestehende Prüfrahm (schwarz) wurde für die hohen, anzusetzenden Belastungen ergänzt (rot).

Die Kraft auf die Wandscheiben (braun) wurde durch eine zylindrische Presse (grün) am Scheibenkopf angebracht. Es konnte somit eine Druckbelastung von 200 kN und eine Zugbelastung von 150 kN aufgebracht werden.

Um die hohen Zugkräfte zu verankern, wurden bei der ersten Testreihe Gewindestangen (A=14cm²) (blau) mittels Stahlplatten am Scheibenkopf angebracht und auf den Rahmen befestigt.

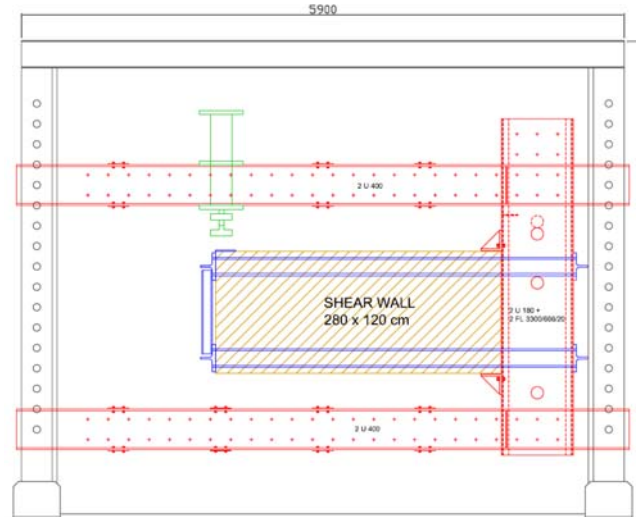


Abbildung 6: Versuchsrahmen
Figure 6: Testing apparatus

Die Vertikalverschiebung der Zylinderpresse setzt sich aus 3 Anteilen (Rahmenverformung, Stahldehnung und Holzverformung) zusammen.

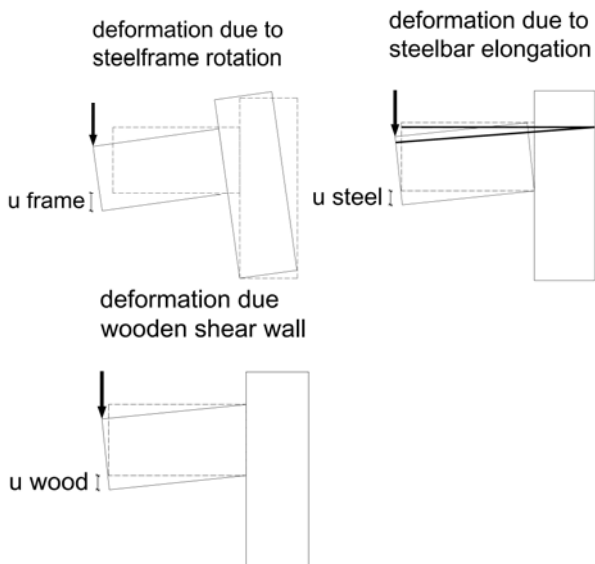


Abbildung 7: Anteile der gemessenen Vertikalverschiebung
 $u_{total} = u_{frame} + u_{steel} + u_{wood}$
Figure 7: Contributions to total measured displacement

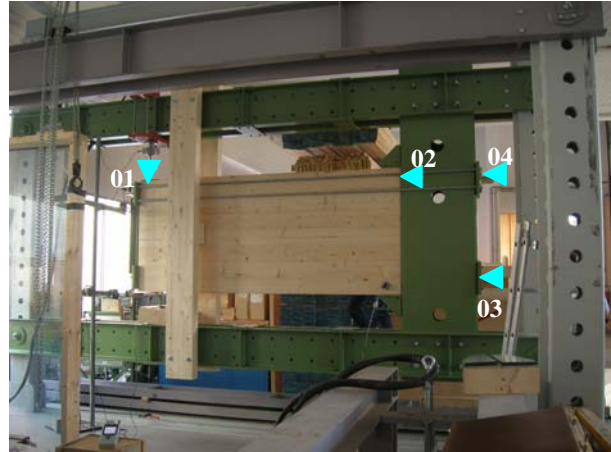


Abbildung 8: Messpunkte zur Bestimmung der:
• Vertikalverschiebung der Zylinderpresse (01)
• Stahldehnung (02)
• Rahmenverformung (03+04)

Figure 8: Points of measurement

3.3 Resultate

Die ersten Versuche wurden monoton und quasistatisch nach EN 594 [7] durchgeführt.

Das beste Ergebnis (Abb.9) lieferte Wand 2, mit 2 Diagonallagen unter 66 Grad. Die bessere Performance von Wand 2 gegenüber Wand 3 ist auf die effizientere Neigung der Schräglagen (Diagonallage, 66 Grad) zurückzuführen. (Der Vorteil war allerdings nicht wesentlich, sodass ab nun für den Einbau von Schräglagen die wirtschaftlichere Variante mit 45 Grad Neigung gewählt wurde.)

Wand 2 war allerdings asymmetrisch aufgebaut, und die getestete Seite war die Seite der Diagonallagen in Richtung der Druckdiagonale. Dies ließ die berechtigte Vermutung zu, dass die andere Richtung der Wand um einiges schwächer ausgebildet war.

Wand 1 hat de facto die gleichen Leistungsdaten beim monotonen Test erreicht wie ein am Markt befindliches Produkt eines bekannten Herstellers (Wand 8).

Die schlechten Resultate der Wände 10 und 11 verdeutlichten die Notwendigkeit einer Vertikallage.

Die Wände 9 und 12 mit schrägen Lagen in beide Richtungen erreichten keine besseren Resultate als herkömmliche Brettspertholzwände (90°). Es wurde angenommen, dass eine Wand mit schrägen Lagen, aber mit einem symmetrischen Aufbau der Lagen, ihre volle Wirkung erst bei zyklischer Belastung entfalten wird können.

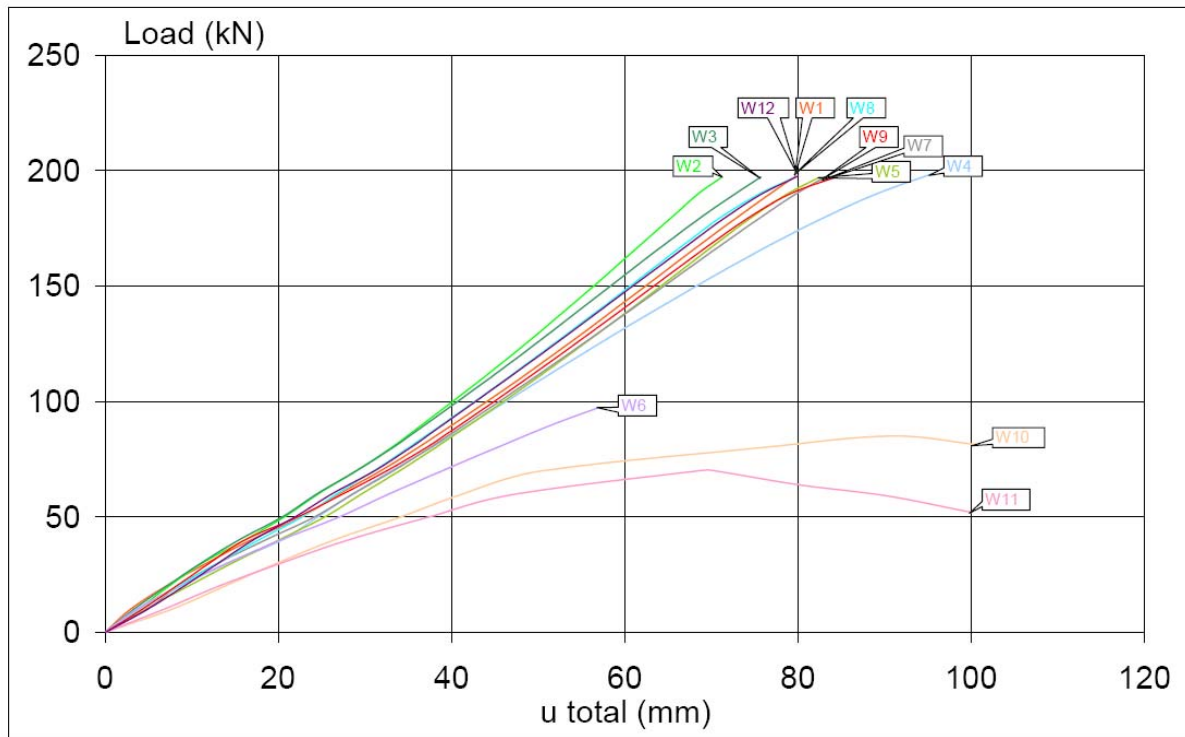


Abbildung 9: Kraft-Verschiebungs-Diagramm (vereinfacht, Entlastungsphase nicht angezeigt)
 Figure 9: "F - u total" Diagram (simplified, phase of decreasing loading not shown)

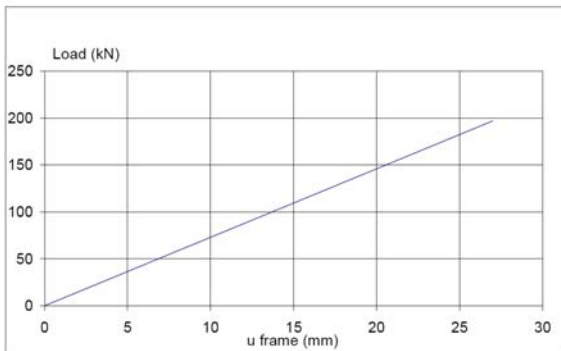


Abbildung 10a: Kraft-Rahmenverformung-Diagramm
 Figure 10a: "F - u frame" Diagram (deformation due to steel frame rotation, mean value)

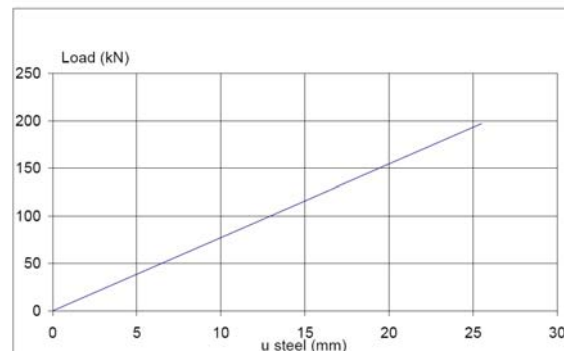


Abbildung 10b: Kraft-Stahldehnung-Diagramm
 Figure 10b: "F - u steel" Diagram (deformation due to steel bar elongation, mean value)

4 Zyklische Versuche

4.1 Wandaufbauten

2 Wandaufbauten wurden für weitere zyklische Versuche ausgewählt (Abb.11).

Der Aufbau der Wand 13 war wie der von Wand 1 mit einer verstärkten (40 mm statt 32 mm) vertikalen Mittellage.

Der Aufbau der Wände 14 und 15 war identisch mit dem Aufbau der Wand 9:

Die Geometrie aller Prüfkörper war 1200/2800 mm.



W13: (C24)16,8cm,

W14,15: (C24)

Abbildung 11: Wandaufbauten (Material, Dicken, Winkel der Brettlagen)

Figure 11: Panel types with thickness and angle of inclined laminated boards

4.2 Verankerungssystem

Es wurden 2 U-Elemente aus Stahl ($A=23\text{cm}^2$ jeweils) am Scheibenrand angeordnet. Die Zugkräfte werden durch diese Elemente nach „oben“ angebracht und dort am Scheibenkopf durch eine Stahlplatte verankert. Am unteren Ende erfolgt eine unlösliche Verbindung an einem Stahlschuh mittels eingeschossenen Hilti-Nägeln [8], siehe folgende Abbildungen.



Abbildung 12: Verankerungssystem
Figure 12: Anchorage system



Abbildung 13: Montage eines Stahlschuhes mittels Hilti-Schussnägeln
Figure 13: Assembly of the steelshoe with Hilti shooting nails



Abbildung 14: Stahlschuh
Figure 14: Steelshoe

4.3 Resultate

Die zyklischen Versuche wurden nach ISO 16670 [9] ausgeführt.



Abbildung 15: Wand 13
Figure 15: Wall 13

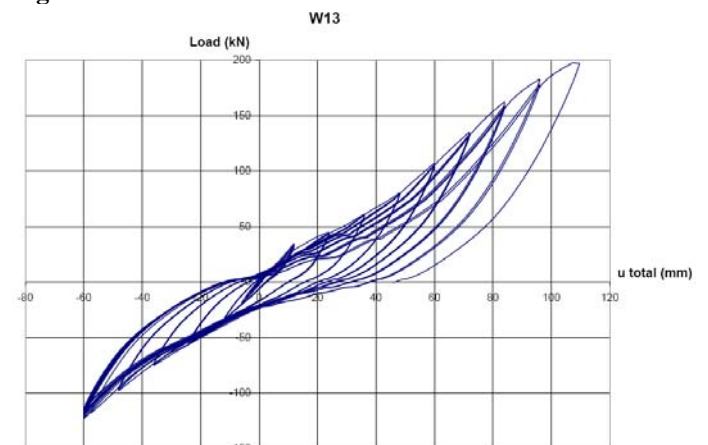


Abbildung 16: Kraft-Verschiebungs-Diagramm (Wand 13)
Figure 16: Wall 13 "F - u total" Diagram

Die Wände 14 und 15 wurden spiegelverkehrt eingebaut (Abb.17, 19).



Abbildung 17: Wand 14
Figure 17: Wall 14

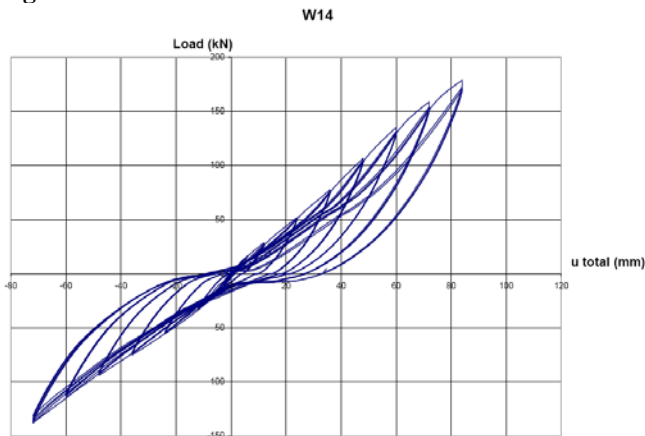


Abbildung 18: Kraft-Verschiebungs-Diagramm (Wand 14)
Figure 18: Wall 14 “F - u total” Diagram



Abbildung 19: W15
Figure 19: Wall 15

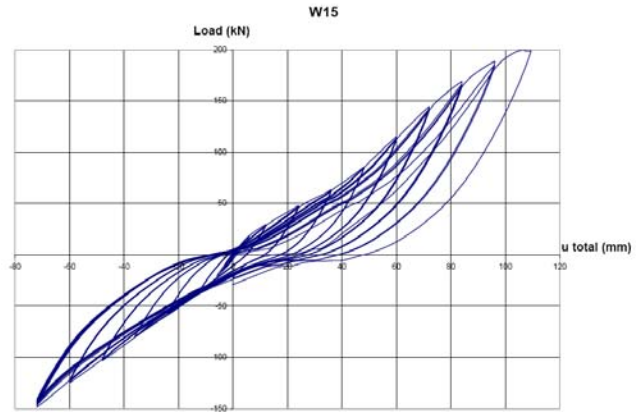


Abbildung 20: Kraft-Verschiebungs-Diagramm (Wand 15)
Figure 20: Wall 15 “F - u total” Diagram

Bei Wand 13 ist ein Abfall der Steifigkeit bei steigender zyklischer Belastung aus der Hysteresekurve erkennbar. Der Abfall der Steifigkeit war bei den Wänden 14 und 15 geringer.

5 Conclusio

5.1 BSP Scheibe

Die hohe Leistungsfähigkeit der getesteten Wände (hergestellt in Vakuumpressen) bei Beanspruchung in Scheibenrichtung wurde durch die Tests bestätigt.

Bei den getesteten BSP-Wänden wurde kein Bruch festgestellt.

Eine Vertikallage wird bei so hohen Kräften für die Tragfähigkeit notwendig sein.

Unter zyklischer Belastung nimmt die Steifigkeit von üblichen BSP-Wänden (90° verleimt) schneller ab als jene von diagonal verleimten BSP-Wänden.

4.1 Verankerungssystem

Die Versuche haben die Aufnahmefähigkeit der zu verankernden Zugkräfte für die entwickelte Verbindung bestätigt. Durch weitere Optimierung der Zugelemente und deren Anschlüsse, wie z.B. eine Reduzierung der angeordneten Hilti-nägeln, könnte eine gewünschte Duktilität erreicht werden.

Das Dämpfungsverhalten des gesamten Elementes wurde maßgeblich durch die Plastifizierung der Stahlplatten und der lokalen Plastifizierung vom Holz geprägt (Abb.21, 22).



Abbildung 21:Plastifizierung der Stahlplatte
Figure 21: Plastification of the steel plate



Abbildung 22:Plastifizierung der Stahlplatte
Figure 22: Plastification of the steel plate

6 Referenzen

- 1 Ökohaus Systembau GesmbH, Latzendorf 100, A - 9832 Stall
- 2 EN 1990. Eurocode – Basis of structural design, CEN, European Committee for Standardization, Brussels
- 3 Normativa sismica Edifici-bozza aggiornata al 25/03/03
- 4 EN 1998-1: EUROCODE 8 – Design of Structures for Earthquake Resistance, - Part 1: General Rules, seismic Action and Rules for Buildings, CEN, European Committee for Standardization, Brussels
- 5 Ing.-Software Dlubal GmbH, Am Zellweg 2, D-93464 Tiefenbach
- 6 EN 338: Structural timber–strength classes, CEN, European Committee for Standardization, Brussels
- 7 EN 594:1995 Timber Structures – Test Methods – Racking Strength and Stiffness of Timber Frame Wall Panels, CEN, European Committee for Standardization, Brussels
- 8 Hilti Austria Ges.m.b.H. Altmannsdorferstr. 165, Postfach 316, A-1231 Wien
- 9 ISO 16670:2003 International standard, timber structures – joints made with mechanical fasteners – quasi-static reversed-cyclic test method, first edition 2003-12-15.