

# **Energiedissipation und Festigkeit mechanischer Verbinder bei seismischer Einwirkung**

Experimental investigation of the mechanical properties  
of connectors under monotonic and cyclic loading

Dissipation d'énergie et durabilité des assemblages  
mécaniques en cas de séisme

Franco Moar  
ROTHOBLAAS GmbH  
Kurtasch, Bozen, Italien





# Energiedissipation und Festigkeit mechanischer Verbinder bei seismischer Einwirkung

## 1. Einführung

In den letzten Jahren hat der Marktanteil der Holzkonstruktionen auch in den südeuropäischen Ländern zunehmend an Bedeutung gewonnen. Im Gegensatz zu den nordeuropäischen Ländern, die oftmals eine jahrhundertelange Tradition im Holzbau vorweisen können, haben die meisten Länder im Mittelmeerbereich keine Tradition im Holzbau, obwohl sie in der Regel ein erhöhtes Erdbebenrisiko vorweisen. Aus diesem Grund muss, obgleich in der Vergangenheit bereits ähnliche Forschungsprojekte unternommen wurden [2] [4], besondere Aufmerksamkeit dem Thema der Erdbebensicherheit gewidmet werden [5].

Der herkömmliche Planungsansatz beruht auf die Energiedissipation, die an besonderen Punkten im Gebäude stattzufinden hat. Dabei werden diese «Knotenpunkte» so ausgelegt, dass sie über eine ausreichende Fähigkeit verfügen sich plastisch zu erformen ohne dabei einen exzessiven Steifheitsverlust zu erleiden. Ausgehend davon, dass das Material Holz sowohl bei Zug – als auch Biegebelastung sich spröde verhält, kann die Energiedissipation lediglich in den mechanischen Verbindungen stattfinden, dort wo man auf die plastischen Eigenschaften der eingebauten Metallelemente zurückgreifen kann.

Demzufolge hat man sich mit der hier vorgelegten Arbeit die experimentelle Erforschung einiger mechanischen Verbindungen, die besonders häufig in den erdbebengefährdeten Gebieten auftreten, zum Ziel gesetzt.

In den meisten Fällen sind nämlich alle Daten bezüglich der Steifheit dieser Produkte, die man in der Regel in deren Zulassungen finden kann, lediglich auf eine statische Belastung bezogen. Keine spezifischen Hinweise zu ihrer Steifheit und Duktilität in Bezug auf zyklische Belastungen werden dem Planer zur Verfügung gestellt. Nichtsdestotrotz kann eine korrekte und zeitgemäße Planung von Holzstrukturen auf diese Parameter nicht verzichten.

Das Hauptziel dieser Versuchskampagne war es deswegen die Steifheit, die Duktilität und die «Kapazität» dieser Verbindungen, sowie deren Verminderung unter zyklischen Belastungen zu ermitteln. Vor allem beabsichtigt man damit ein besseres Verständnis zu erlangen, ob diese Verbinder bzw. Verbindungen den Anforderungen der gegenwärtigen Vorschriften gerecht werden.

Die Steifheit ist diesbezüglich sicherlich einer der Schlüsselparameter für eine lineare Tragwerksanalyse, insbesondere wenn eine numerische Modellierung der Struktur zur Vorhersage der dynamischen Eigenschaften sich als notwendig erweist. Genauso sind Duktilität und der Verlust an Steifheit in Folge von zyklischen Belastungen die zwei wichtigsten Parameter für all jene Knotenpunkte, die zur Energiedissipation dienen.

Im Laufe der Versuche wurden unter anderem auch sechs Holzwände im echten Ausmaß sowohl monotonen als auch zyklischen Belastungen ausgesetzt. Dabei wurden massive CLT Holzwände und leichte in der Holzrahmenbauweise gefertigte Wände (LTF) untersucht. Die untersuchten Holzwände wurden dabei mit den zuvor untersuchten Verbindern zusammengestellt, sodass eine Beziehung zwischen den mechanischen Eigenschaften des Verbinders und des Verhaltens des gesamten Systems bestehend aus Verbinder und Wand ermittelt werden konnte.

## 2. Das X-REV Project

Alle Versuche wurden im Labor für Materialien und Strukturanalysen der Universität Trient durchgeführt, insbesondere das X-REV Projekt, das in Zusammenarbeit mit der Forschungsgruppe der Universität Trient, dem CNR IVALSa und der Rothoblaas GmbH zustande gekommen ist.

Diese Versuchskampagne wurde in drei unterschiedliche Phasen eingeteilt. Zuallererst wurden 40 Versuche mit Hoz-Holz, Holz-Stahl und «sheating to Timber» Verbindungen durchgeführt. In einer zweiten Phase wurden dann sowohl Zuganker, als auch Scherwinkel, die üblicherweise zum Verbinden von Massivholzwänden an das Fundament genutzt

werden, untersucht. Insgesamt wurden in dieser zweiten Phase 21 Versuche durchgeführt. Anschließend, in der letzten und dritten Phase, wurden 6 Holzwände in echter Größe getestet. Dabei wurden die zuvor untersuchten Verbindungen genutzt, um die Massivholzwände an das Versuchsgüst zu befestigen (Abbildung 1).

Die Versuche wurden gemäß den European Standards Versuchsprotokollen durchgeführt [3]. Während der monotonen Testreihen wurde eine konstante Verschiebung von 0.05 mm/s bis zum Versagen des Versuchselements angebracht. Im Gegensatz zu der monotonen Testreihe wurden für die Testreihen mit zyklischen Belastungen verschiedene Verschiebungen im Verhältnis zur Amplitude angebracht.

Die mechanischen Parameter der Versuchselemente wurden anschließend gemäß der EN 12512 [3] anhand der Kraft – Verschiebungskurven, die mit den monotonen Testreihen ermittelt wurden, bestimmt.

Im Laufe dieser Versuche wurden folgende Größen bestimmt: Die maximale angebrachte Belastung  $F_{max}$ , die maximale Verschiebung beim Versagen der Verbindung, die maximale Verschiebung beim Anbringen der maximalen Belastung, die elastische Steifigkeit  $K_{ser}$ , die Fließgrenze und die statische Duktilität.

Für die zyklischen Tests wurde zusätzlich der Festigkeitsverlust zwischen dem ersten und dem dritten Zyklus ermittelt. Dies hat sich aufgrund der Anforderungen, die in der EN 1998 enthalten sind, als notwendig erwiesen, da diesbezüglich gefordert wird, dass mechanische Verbindungen in der Lage sein müssen, sich bei zyklischen Belastungen mit einem Duktilitätsverhältnis von 4 und 6 plastisch zu verformen, ohne dabei zwischen dem ersten und dem dritten Zyklus einen Festigkeitsverlust von mehr als 20% vorzuweisen.

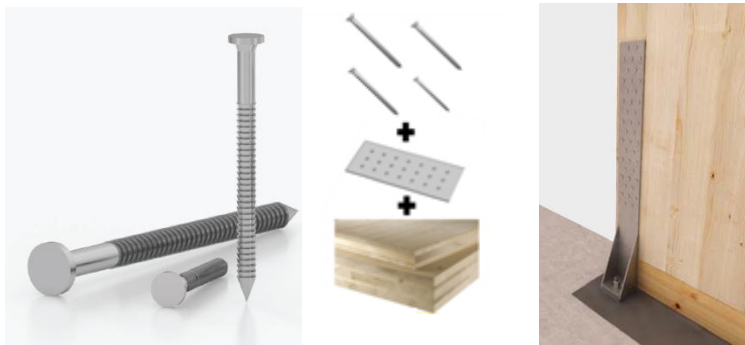


Abbildung 1: Verbinder, Verbindung und Verbindungssystem

### 3. Versuchsreihen

In diesem Abschnitt werden sowohl die Versuche der Holz-Holz als auch der Holz-Stahlverbindungen beschrieben sowie die Versuche mit den Wänden in Echtgröße.

In allen Versuchen wurde die Holzfaser parallel zur Krafrichtung verlegt. Sowohl monotone als auch zyklische Testreihen wurden durchgeführt.

Was die Verbinder betrifft wurden insgesamt zwei Typen an Holz-Holzverbindungen getestet. Die erste Versuchsreihe wurde mit einer «sheating to freaming» Konfiguration bestehend aus zwei 15 mm starken OSB Paneelen, die mit einem 160x80 mm starken Träger mittels 14 Verbinder verbunden wurden, durchgeführt (Abbildung 2). Dabei wurden sowohl 2,8x90 mm Ring Nägel sowie 4,5x45 mm HBS Schrauben und 5x50 mm LBS Schrauben getestet (Tabelle 1). Diese Tests wurden gemäß den hier angeführten Ergebnissen durchgeführt.

Die zweite Versuchsreihe wurde mittels zweier Glulam Paneele, die mittels waagrecht und im 45 Grad Winkel eingefügter HBS 160 mm langen Schrauben durchgeführt (Abbildung 3). Dazu wurden für die Versuchskonfigurationen mit waagrecht verlegten Schrauben Verbinder mit Durchmesser 6, 8 und 10 mm genutzt. Für jene Konfigurationen bei denen die Schrauben im 45 Grad Winkel verlegten wurden, sind stattdessen 9x280 mm VGZ Schrauben zum Einsatz gekommen (Tabelle 2).

Tabelle 1: Versuchsreihe in der «sheating-to-framing» Konfiguration.

| Versuchsnummer | # | Befestiger<br>[mm]      | Abstand<br>[mm] | Winkel. |
|----------------|---|-------------------------|-----------------|---------|
| OSB 2.8X80_M   | 1 | 14 Ring Nägel 2.8x80    | 50              | 90°     |
| OSB 2.8X80_C   | 2 | 14 Ring Nägel 2.8x80    | 50              | 90°     |
| OSB 4.0X45_M   | 1 | 4.0x45 14 HBS Schrauben | 50              | 90°     |
| OSB 2.8X80_C   | 2 | 14 HBS Schrauben 4.0x45 | 50              | 90°     |
| OSB 5.0X50_M   | 1 | 14 LBS Schrauben 4.0x45 | 50              | 90°     |

Tabelle 1: Versuchsreihe für Holz-Holz Verbindungen.

| Versuchsnummer | # | Schrauben<br>(mm) | Abstand<br>(mm) | Winkel |
|----------------|---|-------------------|-----------------|--------|
| HBS_6x160_M    | 2 | 6x160 - 5 HBS     | 90              | 90°    |
| HBS_6x160_C    | 2 | 6x160 - 5 HBS     | 90              | 90°    |
| HBS_8x160_M    | 1 | 8x160 - 3 HBS     | 140             | 90°    |
| HBS_8x160_C    | 2 | 8x160 - 3 HBS     | 140             | 90°    |
| HBS_10x160_M   | 1 | 10x160 - 3 HBS    | 140             | 90°    |
| HBS_10x160_C   | 2 | 10x160 - 3 HBS    | 140             | 90°    |
| VGZ_9x280_M    | 1 | 9x280 - 2 VGZ     | -               | +/-45° |
| VGZ_9x280_C    | 2 | 9x280 - 2 VGZ     | -               | +/-45° |
| VGZ_9x280_T_M  | 1 | 9x280 - 2 VGZ     | -               | +/-45° |

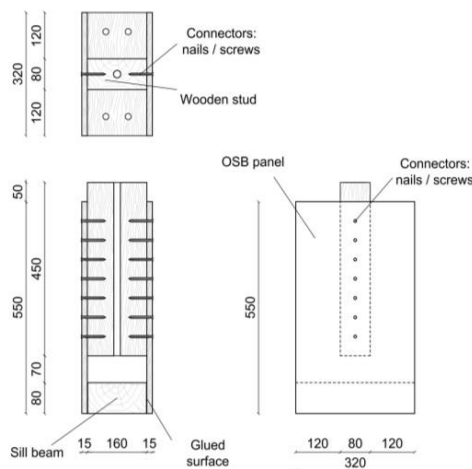


Abbildung 2: Versuchsaufbau in der «sheating to framing» Konfiguration.

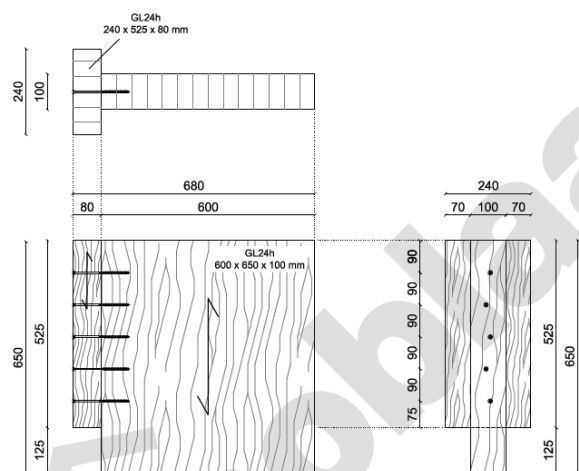


Abbildung 3: Versuchsaufbau für Holz-Holz Verbindungen mit Schrauben

Für alle Versuche wurde derselbe Versuchs Aufbau bestehend aus zwei HEM120 Stahlprofilen, die mittels einem UPN 40 Profil verbunden wurden, genutzt (Abbildung 5). Der Versuchs Aufbau wurde so ausgelegt, dass entlang der senkrechten Achse das Verhalten mit dem eines verschiebbaren Auflagers verglichen werden konnte.

Anschließend an die Versuchs Konfigurationen im Falle von Holz-Stahlverbindungen wurden Bleche mit verschiedenen Stärken untersucht (Abbildung 4). Dabei wurden die Bleche sowohl mittels Nägel vom Typ Anker 4x60 mm als auch Schrauben vom Typ LBS 5x50 mit einem Glulam Paneel fest verbunden (Tabelle 3).

Tabelle 3: Versuchsreihe für Holz-Stahl Verbindungen.

| Versuchsnummer | # | Verbinder                | Blechstärke |
|----------------|---|--------------------------|-------------|
| A4x60_1.5_M    | 1 | 4x60 mm<br>8 Anker nails | 1.5 mm      |
| A4x60_3_M      | 1 | 4x60 mm<br>8 Anker nails | 3 mm        |
| A4x60_3_C      | 2 | 4x60 mm<br>8 Anker nails | 3 mm        |
| A4x60_6_C      | 1 | 4x60 mm<br>8 Anker nails | 6 mm        |
| LBS5x50_1.5_M  | 1 | 5x50 mm<br>8 LBS screws  | 1.5 mm      |
| LBS5x50_3_M    | 1 | 5x50 mm<br>8 LBS screws  | 3 mm        |
| LBS5x50_3_C    | 2 | 5x50 mm<br>8 LBS screws  | 3 mm        |
| LBS5x50_6_C    | 1 | 5x50 mm<br>8 LBS screws  | 6 mm        |

Analog zu den vorherigen Testreihen wurde das mechanische Verhalten der Zuganker und der Scherwinkel sowohl für monotone als auch zyklische Testreihen ermittelt. Dabei wurden die Zuganker ausschließlich auf Zugkräfte getestet, während die Scherwinkel sowohl auf Zug- als auch Scherkräfte getestet wurden.

Drei Typen von Zuganker wurden im Laufe dieser Versuchsreihen getestet. Dabei wurden der WHT 340, der WHT 440 und der WHT 620, die mit jeweils 20, 30 und 55 Nägel befestigt wurden, untersucht. Zusätzlich wurde der WHT 640 Zuganker auch in einer teilausgenagelten Konfiguration mit nur 33 Nägeln getestet.

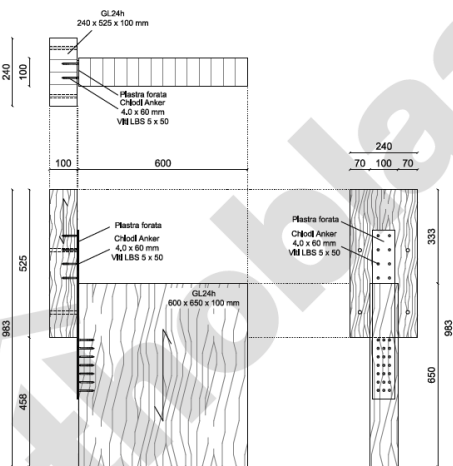


Abbildung 4: Versuchschaufbau für Holz-Stahl Verbindungen mit Schrauben- bzw. Nägel

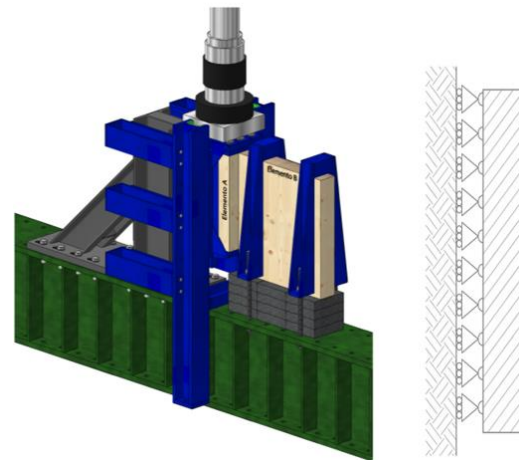


Abbildung 5: Versuchseinrichtung zum Testen von Verbindungen.

Die Scherwinkel TCF 200 und TTN 200 wurden unter Scherbelastungen getestet, während der Scherwinkel TCN 240 auch auf Zugbelastung getestet wurden (Tabelle 4).

Alle Scherwinkel wurden mittels 4x60 Anker Nägel befestigt.

Um die Wechselwirkung zwischen dem mechanischen Verhalten des einzelnen Verbinders und der Verbindung zu bestimmen, wurden 6 Holzwände in echter Größe getestet. Die Wände wurden dabei gleichzeitig einer Scher- und einer Druckbelastung von 20 kN je Laufmeter, die sowohl die Erdbebenbelastung als auch die Tragwerksbelastung darstellen sollte, ausgesetzt (Abbildung 6 und 7).

Tabelle 4: Versuchsreihe für Verbindungsmittel

| Versuchsnummer | # | Verbindungsmittel | Kraft      | Nägel |
|----------------|---|-------------------|------------|-------|
| TCF200_M       | 1 | TCF200            | Scherkraft | 30    |
| TCF200_C       | 2 | TCF200            | Scherkraft | 30    |
| TTF200_M       | 1 | TTF200            | Scherkraft | 30    |
| TTF200_C       | 2 | TTF200            | Scherkraft | 30    |
| TCN240_M       | 1 | TCN240            | Zugkraft   | 36    |
| TCN240_C       | 2 | TCN240            | Zugkraft   | 36    |
| WHT340_M       | 1 | WHT340            | Zugkraft   | 20    |
| WHT340_C       | 2 | WHT340            | Zugkraft   | 20    |
| WHT440_M       | 1 | WHT440            | Zugkraft   | 30    |
| WHT620_M       | 1 | WHT620            | Zugkraft   | 55    |
| WHT620_P_M     | 1 | WHT620            | Zugkraft   | 33    |
| WHT620_P_C     | 2 | WHT620            | Zugkraft   | 33    |

Alle im Laufe der Versuche genutzten Wände waren 2,5 Meter lang und 2,5 Meter hoch. Die «light Timber Frame» Wände, die mit OSB Paneele verkleidet wurden, wiesen eine Stärke von 190 mm vor, während die Massivholzwände aus CLT aus drei Schichten bestanden mit einer Gesamtstärke von 100 mm (Abbildung 8).



Abbildung 6: Versuchseinrichtung zum Testen von Holzwänden in Echtgröße.



Abbildung 7: Detailansicht der Verbindungsmittel TITAN

Das Gerüst der «Light Timber Frame» (LTF) Wände bestand aus Massivholz, wobei die zwei seitlichen Elemente einen Querschnitt von 100 x 160 mm aufwiesen, während die zwei Längselemente einen Querschnitt von 60 x 160 hatten.

Die OSB Paneele waren 1250 x 1250 mm groß mit einer Stärke von 15 mm. Insgesamt wurden je Seite 2 Paneele benötigt um die Wand zu verkleiden. Die Paneele wurden an das Gerüst mittels 2,8 x 80 mm Nägel befestigt, die in einem Abstand von je 100 mm entlang der Ecken und einem Abstand von 200 mm entlang der senkrechten Rahmenteile angebracht wurden.

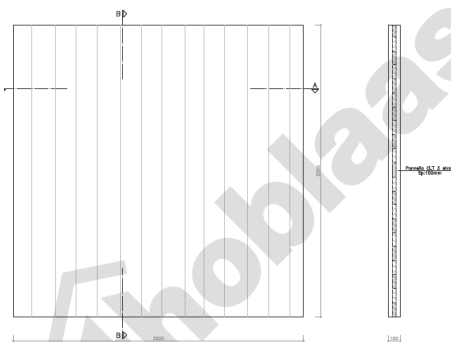


Abbildung 8: CLT Massivholzwand

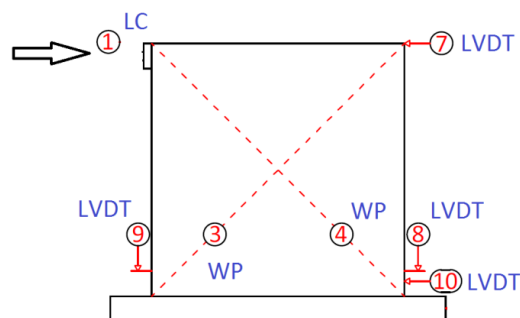


Abbildung 9: Schema zur Verlegung der Messvorrichtungen

Die Wände wurden mittels Zuganker vom Typ WHT 620 mit Teilausnagelung befestigt während für die Scherkräfte je 2 TCN 200 angebracht wurden. Diese Konfiguration wurde sowohl für die LTF Wände als auch für zwei der 4 CLT Wände genutzt (Tabelle 5). Für die übrigen zwei CLT Wände wurde stattdessen eine Konfiguration mit 4 TCN 240 mit Unterscheibe angewandt. Dabei wurden die Scherwinkel auch anstelle der Zuganker eingesetzt, indem die Scherwinkel an den Ecken der Wand angebracht wurden (Abbildung 9).

Tabelle 5: Versuchsreihe für Wände in Echtgröße

| Versuchsnummer | # | Zuganker (an jeder Ecke) | Scherwinkel |
|----------------|---|--------------------------|-------------|
| LTF_M          | 1 | WHT 620 Part.            | 2 TCF 200   |
| LTF_C          | 1 | WHT 620 Part.            | 2 TCF 200   |
| CLT_M          | 1 | WHT 620 Part.            | 2 TCF 200   |
| CLT_C          | 1 | WHT 620 Part.            | 2 TCF 200   |
| CLT_TITAN_M    | 1 | TCN 200                  | 2 TCN 200   |
| CLT_TITAN_C    | 1 | TCN 200                  | 2 TCN 200   |

## 4. Ergebnisse

So wie vorher erwähnt, wurde mittels der monotonen Testreihen die maximale angebrachte Belastung  $F_{max}$ , die maximale Verschiebung beim Versagen der Verbindung, die maximale Verschiebung beim Anbringen der maximalen Belastung, die elastische Steifigkeit  $K_{ser}$ , die Fließgrenze und die statische Duktilität ermittelt.

Tabelle 6: Versuchsergebnisse für die «sheating-to-framing» Konfiguration.

| Versuchsnummer | $F_{max}$<br>[kN] | $K_{ser}$<br>[N/mm] | $v_y$<br>[mm] | $v_u$<br>[mm] | $\mu$<br>[-] | DC<br>[-] |
|----------------|-------------------|---------------------|---------------|---------------|--------------|-----------|
| OSB 2.8X80     | 1.36              | 550                 | 1.28          | 27.51         | 21.5         | H         |
| OSB 4.0X45     | 1.67              | 500                 | 1.60          | 21.7          | 13.6         | M         |
| OSB 5.0X50     | 2.2               | 916                 | 0.80          | 21.2          | 26.5         | -         |

Die Duktilitätsklasse (DC) am Ende des dritten Zyklus von 4  $v_y$  bzw. 6  $v_y$  wurde sowohl für Verbindung als auch für die Verbinder für die jeweiligen zyklischen Testreihen in Betracht gezogen. Falls der Festigkeitsverlust bei einer Verformung von 4  $v_y$  geringer als 20% war, wurde die Verbindung in der mittleren Duktilitätsklasse eingestuft. Im Gegensatz bei einer Verformung von 6  $v_y$ , falls der Festigkeitsverlust geringer als 20% war, wurde die Verbindung in der hohen Duktilitätsklasse eingestuft.

Falls hingegen entweder die Verformung weniger als 4 $v_y$ , bzw. falls der Festigkeitsverlust mehr als 20% betrug, wurde die Verbindung als gering dissipativ eingestuft.

Tabelle 7: Holz-Holz Verbindungsergebnisse

| Versuchsnummer | $F_{max}$<br>[kN] | $K_{ser}$<br>[N/mm] | $v_y$<br>[mm] | $v_u$<br>[mm] | $\mu$<br>[-] | DC<br>[-] |
|----------------|-------------------|---------------------|---------------|---------------|--------------|-----------|
| HBS 6x160_M_1  | 5.6               | 753                 | 3.8           | 30            | 7.9          | L         |
| HBS 6x160_M_2  | 7.2               | 750                 | 5.2           | 29.6          | 5.7          | L         |
| HBS 8x160_M    | 6.2               | 1716                | 1.6           | 30            | 18.8         | H         |
| HBS 10x160_M   | 8.8               | 1150                | 2.8           | 30            | 10.7         | H         |
| VGZ 9x280_M_1  | 18.17             | 14365               | 1             | 2.8           | 2.8          | L         |
| VGZ 9x280_M_T  | 26.32             | 20929               | 1.2           | 5.0           | 4.33         | -         |

Tabelle 8: Holz-Stahl Verbindungsergebnisse

| Versuchsnummer | $F_{max}$<br>[kN] | $K_{ser}$<br>[N/mm] | $v_y$<br>[mm] | $v_u$<br>[mm] | $\mu$<br>[-] | DC<br>[-] |
|----------------|-------------------|---------------------|---------------|---------------|--------------|-----------|
| A4x60_1.5      | 3.04              | 678                 | 3.49          | 15.81         | 4.53         | -         |
| A4x60_3        | 3.49              | 853                 | 2.46          | 16.23         | 6.60         | H         |
| A4x60_6        | -                 | -                   | -             | -             | -            | H         |
| LBS5x50_1.5    | 4.75              | 325                 | 12.02         | 30            | 2.50         | -         |
| LBS5x50_3      | 3.25              | 1043                | 1.93          | 10.34         | 5.36         | H         |
| LBS5x50_6      | -                 | -                   | -             | -             | -            | H         |



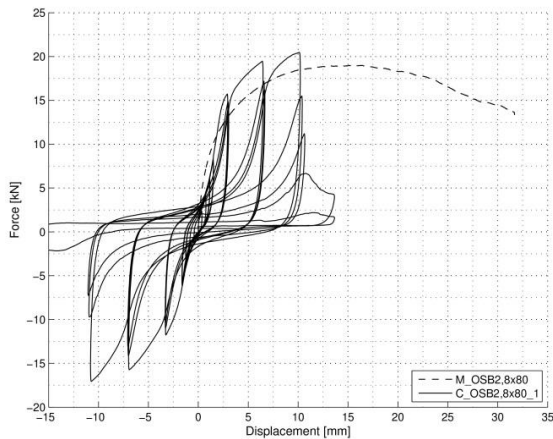


Abbildung 10: Kraft - Verschiebungskurven für OSB 2,8 x 80 Paneele

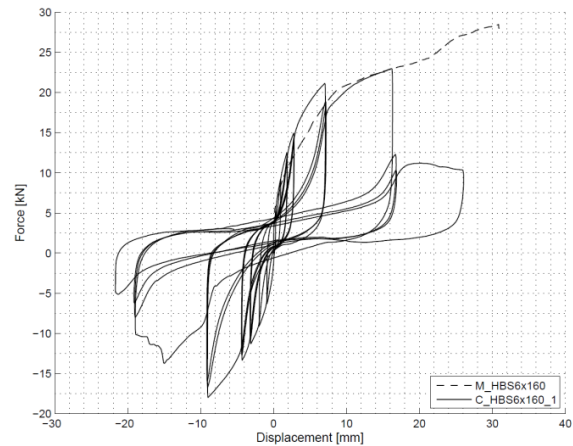


Abbildung 11: Kraft - Verschiebungskurven für HBS6 x 160 Schrauben

Die Testergebnisse für die Versuche mit der «sheating to framing» Konfiguration sind in der Tabelle 6 zusammengefasst. Genauso sind die Versuchsreihen für die Holz-Holzverbindungen sowie die Holz - Stahlverbindungen in den jeweiligen Tabellen 7 und 8 angeführt. Alle Proben haben im Laufe der monotonen Testreihe eine hohe Duktilität gezeigt. Genauso die Testreihen mit den 5 x 50 und 4 x 45 OSB Paneelen haben vergleichbare maximale Verschiebungen aufgewiesen, trotz einer eindeutig höheren Steifigkeit.

2,8 x 80 mm Ring Nägel (Abbildung 10) und 4,0 x 45 mm HBS Schrauben sind von ähnlichen mechanischen Eigenschaften charakterisiert, obgleich die Nägel eine eindeutig höhere Duktilität vorweisen und daher allen Anforderungen für Verbindungen in der hohen Duktilitätsklasse gerecht werden, während die HBS Schrauben lediglich die Anforderungen für Verbindungen in der mittleren Duktilitätsklasse erfüllen können.

Wie es leicht ersichtlich ist, wurden für senkrecht in der Holzfaser befestigte HBS Schrauben höhere Duktilitätswerte erreicht, als für jene Schrauben, die im 45 Grad Winkel befestigte wurden, obgleich bei den zweiten eindeutig höhere Steifheitswerte sowie eine höhere Festigkeit erzielt werden konnte.

Tabelle 9: Versuchsergebnisse für Winkelverbinder

| Versuchsnummer    | Fmax<br>[kN] | Kser<br>[N/mm] | vy<br>[mm] | vu<br>[mm] | μ<br>[-] |
|-------------------|--------------|----------------|------------|------------|----------|
| TCF_200           | 41.03        | 8479           | 4.23       | 7.40       | 1.75     |
| TTF_200           | 70.04        | 8945           | 6.45       | 26.07      | 4.04     |
| TCN_240 (Tensile) | 93.80        | 28455          | 2.30       | 18.40      | 8.00     |
| WHT340            | 60.19        | 5705           | 8.92       | 21.2       | 2.37     |
| WHT440            | 78.14        | 6609           | 9.28       | 28.47      | 3.07     |
| WHT620*           | 107.32       | 13247          | 6.38       | 20.7       | 3.24     |
| WHT620_P          | 100.08       | 9967           | 7.94       | 30.00      | 3.78     |

Die 8 und 10 mm HBS Schrauben erfüllen deswegen alle Anforderungen von Verbindungen in der hohen Duktilitätsklasse, im Gegensatz zu den 6 mm HBS Schrauben, die unter zyklischen Belastungen ein fragiles Verhalten aufgewiesen haben (Abbildung 11). Grund dafür ist die hohe Festigkeit und die damit verbundene hohe Fließgrenze des Materials. Dies hat zur Folge, dass eine eindeutige Reduktion sowohl der Festigkeit als auch eine rasche Materialermüdung bereits nach wenigen Belastungszyklen beobachtet werden konnte.

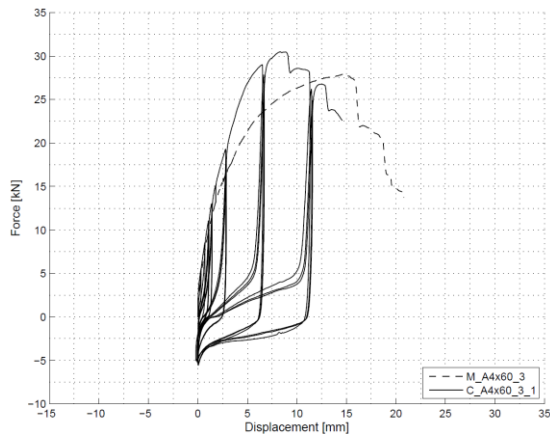


Abbildung 12: Kraft - Verschiebungskurven für monotone und zyklische Belastungen auf Anker Nägel 4x60 mit 3 mm dünnem Blech

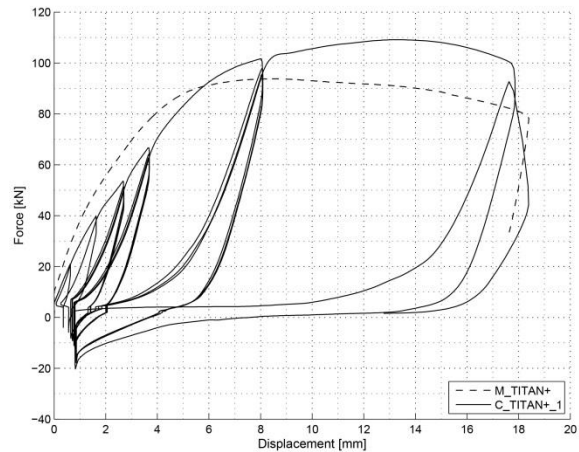


Abbildung 13: Kraft - Verschiebungskurven für monotone und zyklische Belastungen für TCN240 Scherwinkelverbinder

Gemäß des HDC Ansatzes (hohen Duktilitätsansatzes) können alle Verbindungen als dissipativ betrachtet werden. Im Falle von Holz-Stahlverbindungen (Abbildung 12) mit einem 3 mm starkem Blech haben LBS Schrauben sowohl eine höhere Festigkeit als auch eine höhere Steifheit als die LBA Nägel, die jedoch eine höhere Duktilität vorweisen konnten. Insbesondere aufgrund des Seileffekts wiesen die LBS Schrauben, die mit einem 1,5 starkem Blech zum Einsatz gekommen sind, im Laufe des Versuchs eine höhere Festigkeit aber eine eindeutig geringere Steifheit und Duktilität vor als jene, die mit einem 3 mm starkem Blech getestet wurden.

Niedrige und mittlere Duktilitätsklassen wurden für alle Verbindungen erreicht, mit der einzigen Ausnahme, der TCN 240 Scherwinkel unter Zugbelastung (Tabelle 9). Diese Verbindungen haben sowohl eine signifikante Rigidität, als auch eine hohe Steifheit, sodass sie als Alternative zu den herkömmlichen Verbindungen mit Zugankern in Betracht gezogen werden (Abbildung 13).

Tabelle 10: Versuchsergebnisse f99r Wände in Echtgröße.

| Versuchsnummer | Fmax<br>[kN] | Kser<br>[N/mm] | vy<br>[mm] | vu<br>[mm] | $\mu$<br>[-] |
|----------------|--------------|----------------|------------|------------|--------------|
| LTF            | 93.9         | 3454           | 18.9       | 71.89      | 3.80         |
| CLT            | 138.4        | 5796           | 19.46      | 37.15      | 1.91         |
| CLT_TITAN      | 149.3        | 9445           | 13.5       | 33.30      | 2.53         |

Die Teilausnagelung bei den WHT 620 Zuganker bewirkt eine eindeutige Verbesserung der Duktilität ohne dabei einen nennenswerten Festigkeitsverlust vorzuweisen. Das Versagen dieser Zuganker ist in der Regel von einem fragilen Mechanismus gekennzeichnet. Aus diesem Grund wird in erdbebengefährdeten Regionen der Gebrauch einer Teilausnagelung empfohlen.

CLT Wände haben im Laufe der Versuche eindeutig höhere Steifheit- als auch Festigkeitswerte gezeigt als Wände, die mit der LTF Methode gefertigt wurden (Tabelle 10). Nichtsdestotrotz waren die CLT Wände von einer geringeren Duktilität gekennzeichnet. In den CLT Wänden war das Versagen meist auf den Zugankern zurückzuführen, während bei den LTF Wänden hat sich die «sheating to freaming» Verbindung als die Schwachstelle herausgestellt (Abbildung 14).

Demzufolge, da die Verbindungen der LTF Wände so wie vorher erwähnt von einer höheren Duktilität gekennzeichnet sind, waren dementsprechend auch die LTF Wände im Gegensatz zu den CLT Wänden von einer höheren Duktilität geprägt. Insbesondere im Fall der CLT Wände wo der Scherverbinder TCN 200 zum Einsatz gekommen ist, konnte eine eindeutige Verbesserung sowohl hinsichtlich der Festigkeit, als auch der Duktilität der Wand erzielt werden.

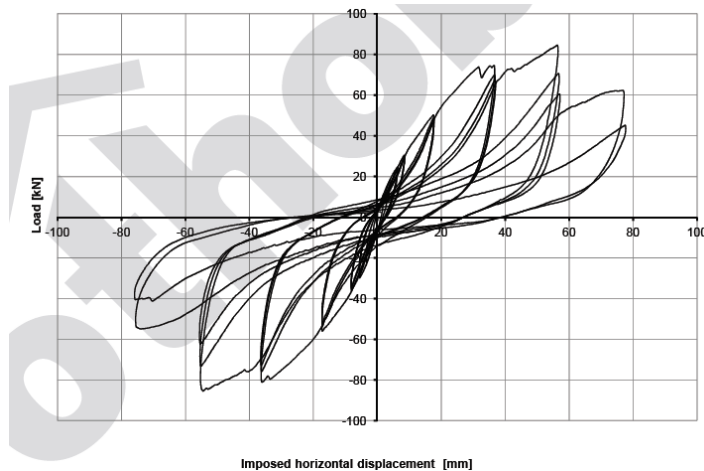


Abbildung 14: Kraft – Verschiebungskurven für LTF Wände bei zyklischen Belastungen.

## 5. Schlussfolgerungen

Im Laufe dieser Arbeit wurden alle herkömmlichen Verbindungsmethoden, die in Europa in den erdbebengefährdeten Gebieten zum Einsatz kommen, untersucht. Dabei wurden verschiedene Ergebnisse hinsichtlich der Duktilität, der Steifheit und der Festigkeit erhalten. Insbesondere haben dabei die Nägel vom Typ Anker überdurchschnittlich gute Eigenschaften in Bezug auf die Kurzzeitermüdung bewiesen. Von den Versuchsreihen mit den 6 mm Anker Nägeln ist stattdessen klar hervorgegangen, wie diese Verbinder trotz Einhaltung aller geometrischen Vorschriften bei Scherbelastung eine rasche Materialermüdung erleiden. Es folgt daraus, dass weitere Tests durchgeführt werden sollten um sicherzustellen, dass diese Systeme über eine ausreichende Energiedissipation verfügen.

Was hingegen die Scherwinkel TCN 240 betrifft hat diese Versuchskampagne klar hervorgehoben, wie diese Scherwinkel eine gültige Alternative zu den herkömmlichen Zugankern liefern.

Anschließend, was die Zuganker vom Typ 620 betrifft, ist hervorgegangen wie diese Verbindungen im Falle einer Teilausnagelung bei CLT Wänden gegenüber der herkömmlichen Vollaussnagelung eindeutig bevorzugt werden sollten.

Anhand der hier vorgestellten Ergebnisse, kann man davon ausgehen, dass diese Versuchskampagne nützliche Daten zur korrekten Einschätzung der Steifheit, Eigenperiode und Verformbarkeit von Holzstrukturen geliefert hat. Insbesondere haben die Versuchsreihen auf den Wänden in Echtgröße sowohl die zuvor ermittelten Werte für die Verbinder, sowie die numerischen Modelle, die zur Berechnung eingesetzt wurden, validiert [1].

## 6. Danksagung

Das hier vorgestellte Projekt wurde im Rahmen des X-REV Projekts, das von der Autonomen Provinz Bozen und von der Rothoblaas GmbH finanziert wurde, entwickelt. Ein besonderer Dank geht vor allem an das Labor für Materialien und Strukturen der Universität Trient, welches sich zum Durchführen der Versuchsreihen zur Verfügung gestellt hat.

## 7. Literatur

- [1] Casagrande D., Rossi S., Sartori T., Tomasi R., (2015) Proposal of an analytical procedure and a simplified numerical model for elastic response of single-storey timber shear -walls. In: Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Construction Materials
- [2] Ceccotti A., Sandhaas C., Okabe M., Yasumura M., Minowa C. and Kawai, N. (2013): SOFIE project – 3D shaking table test on a seven-storey full-scale cross-laminated timber building. Earthquake EngStruct. Dyn.,42: 2003-2021.
- [3] European Committee for Standardization (CEN) (2006) EN 12512 - Timber structures – Test methods – cyclic testing of joints made with mechanical fasteners. Brussels, Belgium
- [4] Tomasi R. and Sartori T., (2013) Mechanical behaviour of connections between wood framed shear walls and foundations under monotonic and cyclic load. Constr Build Mater 44:682–690
- [5] Casagrande D., Polastri A., Sartori T., Loss C., Chiodega M., (2016) Experimental Campaign for fort he mechanical characterization of connection systems in the seismic design of timber buildings