

Systemverbinder zur Abtragung dynamischer Beanspruchungen

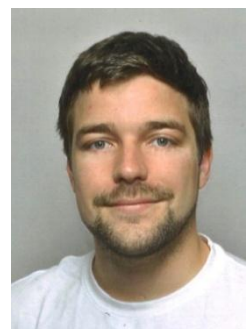
System connector for dynamic loads

Assemblages en système pour la descente de sollicitations dynamiques

Ursula Mahlkecht
holz.bau forschungs gmbh
AT-Graz



Raimund Sieder
holz.bau forschungs gmbh
AT-Graz



Systemverbinder zur Abtragung dynamischer Beanspruchungen

Bei einem Erdbeben übertragen sich die Erschütterungen bzw. Beschleunigungen des Bodens auf die Tragwerke. Es hängt von deren Ausführung ab, wie sie sich bei dieser i. Allg. großen dynamischen Belastung verhalten, wobei es gelingt mit einer erdbebengerechten Bauweise Schäden an Personen und Objekten zu minimieren. Die Bestimmung der auf die Gebäude einwirkenden Größen und die Planung erdbebengerechter Tragstrukturen stellen aus Sicht des Ingenieurs deshalb eine große Herausforderung dar, weil die Steifigkeits- und Dämpfungseigenschaften der Tragstruktur durch eine Vielzahl an wechselwirkenden Parametern beeinflusst wird. Da Holz bei den meisten Beanspruchungsarten, mit Ausnahme der Querdruckeigenschaften, ein sprödes Versagen zeigt, kann die für das Tragwerk geforderte Duktilität praktisch ausschließlich über die Planung gezielter Verformungen im Bereich der Verbindungen (z. B. Fließen der metallischen Verbindungsmittel) eingebracht werden.

Die Firma Vinzenz Harrer GmbH entwickelt seit 2002 in Zusammenarbeit mit der holz.bau forschung gmbh in Graz sowie dem Institut für Holzbau und Holztechnologie der Technischen Universität Graz das "SHERPA"-Steckverbinder-System. Das sind Steckverbinder aus zwei Aluminiumteilen mit einer kraftschlüssigen Schwalbenschwanzverbindung, die mittels Vollgewindeschrauben an den Holzbauteilen befestigt werden. Sie werden im Holzbau häufig für Haupt- und Nebenträgeranschlüsse eingesetzt und können Kräfte in/um alle räumlichen Richtungen übertragen.

Um den Herausforderungen der Verbindungen von Holztragwerken in Erdbebengebieten gerecht zu werden, wurden sog."SHERPA-EQ"-Prototypen entwickelt, die gegenüber der bisherigen Ausführung der SHERPA-Verbinder Einwirkungen aus dynamischen Beanspruchung besser abtragen können.

1. Erdbeben und seine Wirkung auf Gebäude

Bei einem Erdbeben werden die Erdmassen in Schwingungen versetzt, die sich in Form seismischer Wellen ausbreiten. Die Bewegung des Untergrundes überträgt sich auf die Gebäude in Form von horizontalen und vertikalen Beschleunigungen bzw. Schwingungen. Als Folge der übertragenen Beschleunigung und auf Gebäudemasse entsteht eine Krafteinwirkung auf das Tragwerk. Die Größe dieser Einwirkung hängt von der Erdbebenanregung selbst, den lokale Untergrundverhältnissen und den Gebäudeeigenschaften (Bauwerksmasse, Gebäudegeometrie, Aussteifung, Fähigkeit zur Energiedissipation u. a.) ab. Im Folgenden wird kurz auf wesentliche Parameter bei einer Erdbebenbeanspruchung eingegangen. Deren Berücksichtigung im Zuge der Tragwerksplanung bietet die Möglichkeit, die auf die Verbindungen einwirkenden Kräfte möglichst gering werden zu lassen.

1.1. Erdbebengerechte Konstruktion

Tragwerke müssen in der Lage sein, die zugeführte Schwingungsenergie abzuleiten oder in anderen Energieformen umzuwandeln. Ziel der erdbebengerechten Konstruktion ist es zunächst, einen wirtschaftlich vertretbaren und gleichzeitig bestmöglichen Schutz von Menschenleben zu gewährleisten. In weiterer Betrachtung ist eine Schadensbegrenzung erstrebenswert und zusätzlich soll sichergestellt werden, dass die öffentliche Sicherheit und Infrastruktur wichtiger Bauten funktionstüchtig bleiben. Mit Bedachtnahme auf diese Ziele kann das Verhalten eines Gebäudes bei dynamischer Beanspruchung über eine günstige Geometrie des Grund- und Aufrisses sowie eine hohe Duktilität und Energiedissipationsfähigkeit begünstigt werden.

Einige wesentliche, allgemein gültige Konstruktionsempfehlungen für eine günstige Konstruktion mit regelmäßigem Aufbau wird u.a. vom Bund deutscher Zimmermeister[3] mit Bezug auf die DIN 4149 [1] und der ÖNORM EN 1998-1 [10] wie folgt angegeben:

- Ein möglichst einfacher, kompakter Grundriss mit direkten Wegen für die Ableitung der Erdbebenlasten; dies kann auch über die Anordnung von Fugen bewerkstelligt werden (Abbildung 1).
- Die Durchgängigkeit tragender Bauteile sollte gegeben sein und Steifigkeitssprünge zwischen übereinanderliegenden Geschossen vermieden werden. Die Steifigkeit und die Gebäudemasse sollte nach oben hin kontinuierlich abnehmen (Abbildung 1 und Abbildung 2).

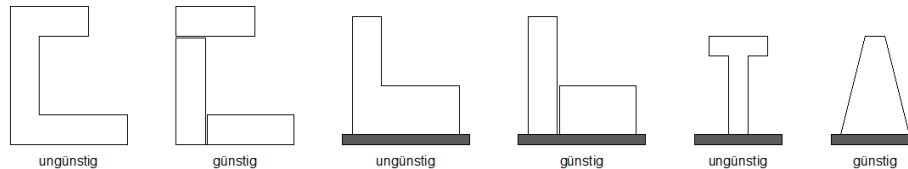


Abbildung 1: günstige und ungünstige Grund- und Aufrisse [12]

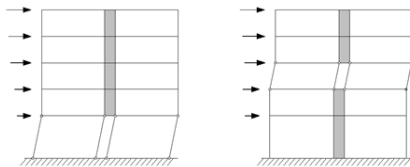


Abbildung 2: Steifigkeitssprünge aufgrund von aus Stützen bestehenden Geschossen[3]

- Eine gleichmäßige Verteilung der Masse und der aussteifenden Wände in jedem Geschoss erhöht die Torsionssteifigkeit und vermeidet schwer abschätzbare Torsionsschwingungen (Abbildung 3).

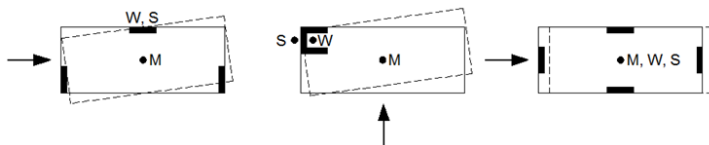


Abbildung 3: Bauwerkverdrehungen bei ungünstiger Verteilung der Masse und Wände[12]

- Die Gründung der Gebäude sollte möglichst auf gleichartigen Fundamenten, auf gleichartigem Baugrund und in einheitlicher Tiefe erfolgen.
- Decken sollen als Scheiben ausgebildet und mit den aussteifenden Wänden kraftschlüssig verbunden werden. Da horizontale Einwirkungen in beiden Richtungen (x- und y-Achse) auftreten können, soll eine bidirektionale Beanspruchbarkeit gegeben sein. Die Beanspruchbarkeit und die Steifigkeitseigenschaften sollen in beiden Richtungen ähnlich sein.

Durch eine erdbebengerechte Konstruktion kann das Verhalten der Gebäude im Erdbebenfall besser abgeschätzt werden.

1.2. Berechnungsverfahren für Bauten und Normative Regelungen

Nach ÖNORM EN 1998-1 [10] können vier verschiedene Nachweisverfahren für den Erdbebenfall herangezogen werden. Unter der Einhaltung von konstruktiven Eigenschaften des Bauwerkes dürfen folgende linear-elastische Berechnungsmethoden angewendet werden:

- **«vereinfachtes Antwortspektrenverfahren»**
Zusätzlich werden Bedingungen zu den Eigenschwingungsdauern des Gebäudes und zur Gebäudehöhe gestellt und die Vorgehensweise bei der Bestimmung der, auf das Bauwerk wirkenden, Kräfte vorgegeben.
- **«multimodales Antwortspektrenverfahren»**
Dieses kann für alle Arten von Hochbauten angewendet werden.

Alternativ kann der Nachweis auch über folgende, aufwändigere Berechnungsmethoden erfolgen:

- nicht-lineare statische Berechnung (engl.: *pushover*)
- nicht-lineare Zeitverlaufsrechnung (dynamisch)

Antwortspektrenverfahren

Die Erstellung des elastischen Antwortspektrums nach ÖNORM EN 1998-1 [10] wird im Folgenden kurz erklärt. Beim "Einmassenschwinger" ist eine Masse mit einer Feder und einer Dämpfung mit dem Untergrund verbunden. Beim Antwortspektrenverfahren wird eine Vielzahl an Einmassenschwingern mit unterschiedlichen Eigenfrequenzen, aber gleicher Dämpfung und auf verschiedenen Untergründen, mit einer wirklichkeitsnahen Erdbebeneinwirkung angeregt und deren maximale Beschleunigungsantwort ermittelt. Das elastische Antwortspektrum ist die Darstellung der Einhüllenden dieser maximalen Beschleunigungsantworten in einem Diagramm in Abhängigkeit der Schwingungsdauer T (Abbildung 5).

Beim vereinfachten Antwortspektrenverfahren wird das reale Bauwerk als Einmassenschwinger betrachtet (Abbildung 4). Die Masse m , die Systemsteifigkeit und das Dämpfungsvermögen müssen bestimmt werden. Daraus lässt sich seine Eigenperiode bzw. seine Schwingungsdauer T bestimmen.

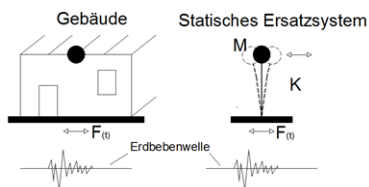


Abbildung 4: Idealisierung eines einstöckigen Gebäudes als Einmassenschwinger[4]

Mit der Eigenfrequenz des Gebäudes wird im Antwortspektrum die zugehörige Spektralbeschleunigung $S_e(T)$ abgelesen und daraus mit den im Folgenden aufgelisteten Parametern die **horizontale Beschleunigungsantwort** berechnet:

- Die Grundbeschleunigung α_g hängt von der Erdbebenzone ab, die in den Nationalen Anhängen der EN 1998 angegeben wird.
- Der Bodenparameter S ist abhängig von den Baugrundverhältnissen. Die Einteilung erfolgt in die fünf Baugrundklassen A bis E.
- Der Bedeutungsbeiwert γ_I hängt von der Nutzung des Gebäudes ab. Die Einteilung der Gebäude erfolgt in die Bedeutungskategorien I bis IV.
- Der Dämpfungs-Korrekturbeiwert η wird über eine Formel in Abhängigkeit der viskosen Dämpfungsverhältnisse des Bauwerks in Prozent berechnet.

Die Werte der Schwingungsdauer T_B , T_C und T_D des Antwortspektrums werden in Abhängigkeit der Baugrundklassen angegeben, Abbildung 5.

Die Abbildung 5 zeigt ein Beispiel für ein typisches Antwortspektrum und Schwingzeiten verschiedener Gebäude. Tragwerke mit einer geringen Systemsteifigkeit schwingen länger und entziehen sich dadurch den Erdbebenkräften. Dadurch ergibt sich im Allgemeinen eine geringere Beschleunigungsantwort.

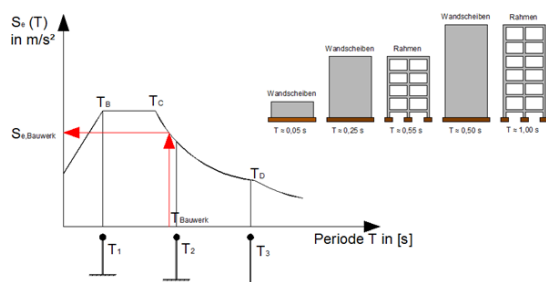


Abbildung 5: Typisches Antwortspektrum und Schwingzeit verschiedener Gebäude [12]

Ebenso ist nach ÖNORM EN 1998-1[10] eine Berechnung für eine vertikale Erdbebenbeanspruchung durch ein **vertikales Antwortspektrum** $S_{ve}(T)$ durchzuführen. Dies betrifft vor allem horizontale Bauteile, die auskragen, vorgespannt sind, große Spannweiten aufweisen oder Balken, die Stützen tragen.

Ermittlung der Einwirkungen im Erdbebenfall

Die Berechnung der Einwirkungen für den Erdbebenfall erfolgt nach den Kombinationsregeln der ÖNORM EN 1990 [8].

Beim vereinfachten Antwortspektrenverfahren darf die statische, horizontalen Ersatzlast für den Erdbebenfall F_b mit der ermittelten Bemessungsbeschleunigung $S_e(T)$ nach Glg. (1) bestimmt werden.

$$F_b = S_e(T) \cdot m \cdot \lambda \quad (1)$$

F_b ...	Erdbebeneratzkraft [N],
$S_e(T)$...	Bemessungsbeschleunigung [m/s ²]
m ...	mitschwingende Masse [kg]
λ ...	Korrekturbeiwert $\lambda = 0,85$ bei ≥ 3 Geschossen und $T_1 \leq 2 \cdot T_C$

Die Aufteilung der Erdbebeneratzkraft auf die Geschoße erfolgt im Verhältnis der Stockwerkmassen zu den Höhen, die die Massen über der Ebene, in der die Erdbeeinwirkung erfolgt, haben.

Beim modalen Antwortspektrumverfahren wird das Gebäude als Mehrmassenschwinger modelliert, wobei für jede Eigenfrequenz ein modaler Einmassenschwinger ermittelt wird. Mit der Antwortspektrenmethode kann dann die Belastung auf die einzelnen Stockwerke i bei der i -ten Eigenfrequenz berechnet und in einem weiteren Schritt die Kombination dieser Belastungen ermittelt werden.

Duktilitätsklassen und Duktilitätsbeiwert q

Durch die Erdbebenbeschleunigung wird Energie ins Tragwerk übertragen. Die eingeleitete Energie verrichtet im Tragwerk die mechanische Arbeit W , die sich aus dem Produkt der Gebäudemasse m , der Bauwerksbeschleunigung a und dem Weg s ergibt (Glg. (2)).

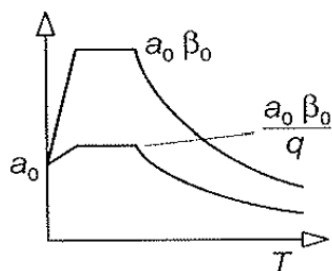
$$W = m \cdot a \cdot s = F \cdot s \quad (2)$$

m ...	Gebäudemasse
a ...	Beschleunigung
s ...	Weg

Ein Teil der auftretenden Erdbebenenergie kann durch plastische Verformung des Bauteiles und/oder der Verbindungen umgewandelt werden (Energiedissipation). Dafür ist eine hohe Duktilität der beanspruchten Elemente erforderlich. Abgesehen von den Querdruckeigenschaften, zeigen alle weiteren Holzeigenschaften nach dem linear-elastischen Verhalten ein sprödes Versagen. Im Holzbau kann die Duktilität somit nur durch die plastische Verformung der (metallischen) Verbindungen gesteuert werden. Durch die Erdbebenbeanspruchung ergeben sich bei der linear-elastischen Berechnung meist sehr hohe Kräfte in den Tragwerken. Je mehr Energie durch eine plastische Verformung dissipiert werden kann, desto geringer ist folglich die auf die Verbindung einwirkende Kraft. In der ÖNORM EN 1998-1 [10] erfolgt die Berücksichtigung des Energiedissipationsvermögen bzw. der Duktilität durch Einordnung von Tragsystemen mit ihren Verbindungstypen in Duktilitätsklassen.

- Duktilitätsklasse 1: DCL (*ductility class low*), niedriges Energiedissipationsvermögen
- Duktilitätsklasse 2: DCM (*ductility class medium*), mittleres Energiedissipationsvermögen
- Duktilitätsklasse 3: DCH (*ductility class high*), hohes Energiedissipationsvermögen

Den Tragsystemen der Duktilitätsklassen ist jeweils ein bestimmter **Verhaltensbeiwert q** zugeordnet, der das Verhältnis zwischen Beanspruchbarkeit eines elastischen Systems und jener eines elasto-plastischen (duktilen) Systems angibt. Mit dem Verhaltensbeiwert q darf das elastische Antwortspektrum abgemindert werden (Abbildung 6).

Abbildung 6: Abminderung des elastischen Antwortspektrums durch den Verhaltensbeiwert q [4]

Bei Tragstrukturen der Duktilitätsklasse 1 wird nichtlineares Baustoffverhalten nicht berücksichtigt, also keine nachgiebigen Verbindungen vorgesehen. Der Verhaltensbeiwert q darf nicht größer als 1,5 angenommen werden. Die ÖNORM EN 1998-1 [10] nennt als Beispiele Kragarmtragwerke und Zwei- oder Dreigelenkbögen (Abbildung 7).



Abbildung 7: Beispiele für Tragwerke der Duktilitätsklasse 1 [12]

Das Bemessungsspektrum für die lineare Bemessung darf mit einem Verhaltensbeiwert von $q > 1,5$ abgemindert werden, wenn in bestimmten Teilen des Tragwerks ein dissipatives Tragverhalten nachgewiesen werden kann. Gemäß ÖNORM EN 1998-1 [10] ist die Fähigkeit der Energiedissipation in den Verbindungen und mechanischen Verbindungsmitteln anzuordnen, während für die Holzbauteile selbst elastisches Verhalten vorzusehen ist, d.h. sie werden mit einer "Überfestigkeit" bemessen.

Beispiele für Tragwerke der Duktilitätsklasse 2 sind verklebte Wandscheiben mit verklebten Schubfeldern mit Nagel- oder Schraubenverbindungen, Fachwerke mit stiftförmigen oder Bolzenverbindungen ($q = 2$) und statisch überbestimmte Rahmen mit stiftförmigen oder Bolzenverbindungen ($q = 2,5$) (Abbildung 8).

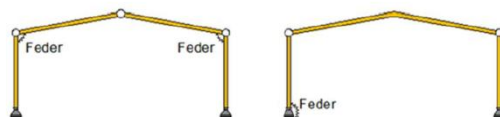


Abbildung 8: Beispiele für Tragwerke der Duktilitätsklasse 2 [12]

Beispiele für Tragwerke der Duktilitätsklasse 3 sind genagelte Wandscheiben mit verklebten Schubfeldern mit Nagel- oder Schraubenverbindungen, Fachwerke mit Nagelverbindungen ($q = 3$), statisch überbestimmte Rahmen mit stiftförmigen oder Bolzenverbindungen ($q = 4$) und genagelte Wandscheiben mit genagelten Schubfeldern mit Nagel- oder Schraubenverbindungen ($q = 5$), siehe auch Abbildung 9.

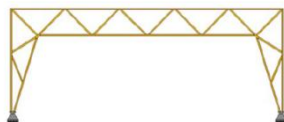


Abbildung 9: Beispiel für Tragwerke der Duktilitätsklasse 3 [12]

2. Entwicklung eines Systemverbinders zur Abtragung dynamischer Beanspruchungen [13]

Die «SHERPA»-Systemverbinderfamilie der Firma Vinzenz Harrer GmbH / Frohnleiten (A) wird häufig für Haupt- und Nebenträgeranschlüsse eingesetzt. Die SHERPA-Verbinder bestehen aus zwei, entsprechend gefrästen Aluminiumplatten, die mit einer Schwalbenschwanzverbindung kraftschlüssig zusammengefügt werden. Diese werden an den zu

verbindenden Holzbauteilen mit Vollgewindeschrauben befestigt und die Holzelemente werden im Zuge der Montage zusammengesteckt und gegebenenfalls mittels Sperrschrauben gesichert. Sie können Kräfte und Momente in, entgegen und quer zur Einschubrichtung, also Quer-, Normalkräfte und Momente übertragen.

Um den Herausforderungen des Holzbaus in erdbebengefährdeten Gebieten gerecht zu werden und einen Systemverbinder mit höheren Duktilitätseigenschaften anbieten zu können, wurde der SHERPA XL100 aus dem Standardsortiment zu drei Prototypen mit der Bezeichnung SHERPA XL100-EQ weiterentwickelt.

2.1. Entwicklung eines Verbinders, SHERPAXL100-EQ

Die Haupttragrichtung der SHERPA-Verbinder ist auf Grund des angewandten Prinzips in der Einschubrichtung gegeben. Gegenüber dem statischen Fall tritt bei einer dynamischen Einwirkung auch eine wechselnde Beanspruchung, also auch gegen die Einschubrichtung und eine Momentenbeanspruchung auf.

Gegenüber dem Standardprodukt SHERPA XL100 wurde bei den SHERPA XL100-EQ-Prototypen die Schraubenanzahl zur Befestigung der Nut- bzw. Federplatte an die Holzbauelemente erhöht. Entsprechend der Einwirkung wurde eine Hälfte der geneigt angeordneten Schrauben mit einem Winkel $\alpha = 45^\circ$ zwischen der Schraubenachse und der Nebenträgerlängsachse eingedreht, die andere Hälfte unter einem Winkel von $\alpha = -45^\circ$ angeordnet (Abbildung 10).

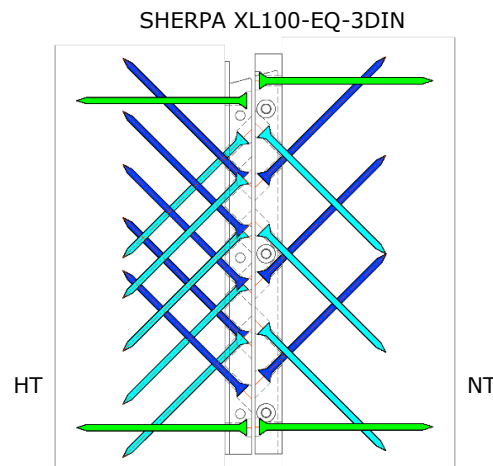


Abbildung 10: Schraubenbild des SHERPA XL100-EQ-3DIN und SHERPA XL100-EQ-4DIN [13]

Anstelle der Sperrschrauben zur Sicherung gegen Abheben der herkömmlichen SHERPA-Verbinder wurden bei den SHERPA XL100-EQ-Prototypen quer durch den Schwalbenschwanz verlaufende, sog. "Querbolzen" verwendet. Dies zum einen um die Tragfähigkeit in allen Richtungen zu ermöglichen, insbesondere aber auch, um damit die erforderliche Duktilität infolge der Nachgiebigkeit der Querbolzen bzw. des Grundmaterials in das Verbindungssystem zu bekommen. Auf Grund der Anordnung der Querbolzen wurde eine höhere Dicke des SHERPA XL100-EQ-Prototypen ($t_{\text{ges}} = 29 \text{ mm}$) erforderlich.

Bei zwei, der drei vorgeschlagen Ausführungsvarianten wurde die Anzahl der oben und unten angeordneten Momentenschrauben erhöht, um das aufnehmbare Moment zu steigern (horizontale Schrauben in Abbildung 10). Der Winkel zwischen der Schraubenachse und der Nebenträgerlängsachse liegt bei $\alpha = 0^\circ$ oder $\alpha = 15^\circ$. Tabelle 1 gibt eine Übersicht mit den wesentlichen Merkmalen der drei Variantender SHERPA XL100-EQ-Prototypen.

Tabelle 1: Übersicht der wesentlichen Merkmale der SHERPA XL100-EQ-Prototypen

Prototypen SHERPA XL100-EQ	Anzahl der geneigten Schrauben		Anzahl der Momentenschrauben		Querbolzen Typ / Anzahl / Durchmesser
	Nebenträger	Hauptträger			
SHERPA XL100-EQ-3DIN	12	10	4	4	DIN 7991/3/8 mm
SHERPA XL100-EQ-4DIN	12	10	8	6	DIN 7991 / 4 / 8 mm
SHERPA XL100-EQ-4EJO	12	10	8	6	EJOT JZ3 / 4 / 8 mm

2.2. Prüfprogramm SHERPA XL100-EQ-Prototypen

Die Quer- und Zugtragfähigkeit der SHERPA XL100-EQ-Prototypen wurde mittels statischer Prüfung, der Momentenwiderstand mittels dynamischer Prüfung bestimmt.

Bei den SHERPA-Verbindungen werden Druckkräfte über die Ankerplatten übertragen. Bei Zug werden die Schrauben beansprucht. Auf Herausziehen beanspruchte Schrauben weisen im Allgemeinen kein ausreichend duktiles Verhalten auf. Bei auf Abscheren beanspruchten stiftförmigen Verbindungsmitteln hingegen, kann durch ihre Fähigkeit zu Fließen ausreichend Duktilität geschaffen werden. Beim SHERPA XL100-EQ-Verbinder soll die Duktilität bei dynamischer Belastung über ein Fließen der Querbolzen erreicht werden.

Die SHERPA XL100-EQ-Prototypen wurden an Prüfkörpern aus Brettschichtholz der Festigkeitsklasse GL24h nach ÖNORM EN 14080 [6] und einer Holzfeuchte von rund $u = 11\%$ durchgeführt.

statische Prüfungen nach ÖNORM EN 26891 [11]

Bei der ersten Prüfserie wurden die SHERPA XL100-EQ-Prototypen mit einer Querkraft ohne Momentenbeanspruchung (Ausmittee = 0) untersucht. Dies wird mit Hilfe der Prüfung eines auf Rollen gelagerten Einfeldträgers erreicht (Abbildung 11). Fünf Stück des SHERPA XL100-EQ-4DIN und ein SHERPA XL100-EQ-4EJO wurden mit Querkraftbelastung in Einschubrichtung und weitere fünf Prüfkörper des SHERPA XL100-EQ-4DIN, sowie vier Stück des SHERPA XL100-EQ-4EJO entgegen der Einschubrichtung geprüft.

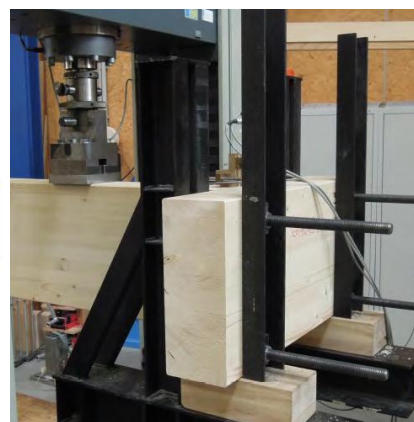
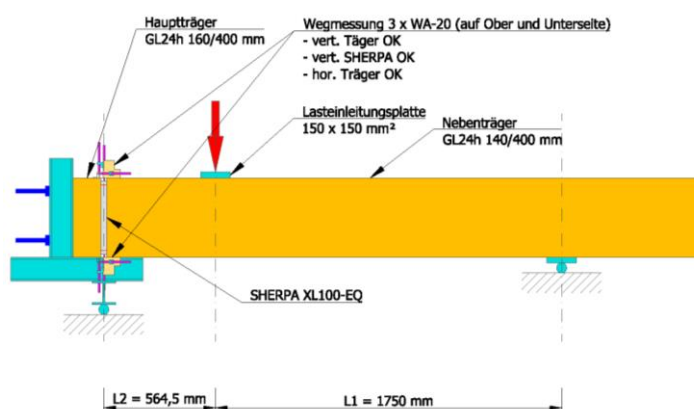


Abbildung 11: Prüfkonfiguration – statische Querkraftprüfung [13]

Bei der zweiten Prüfserie wurden die SHERPA XL100-EQ-Prototypen mit einer statischen Zugkraft in Richtung der Nebenträgerlängsachse beansprucht (Abbildung 12). Je fünf Prüfkörper des SHERPA XL100-EQ-4DIN und des SHERPA XL100-EQ-3DIN wurden auf ihre Zugtragfähigkeit hin geprüft.

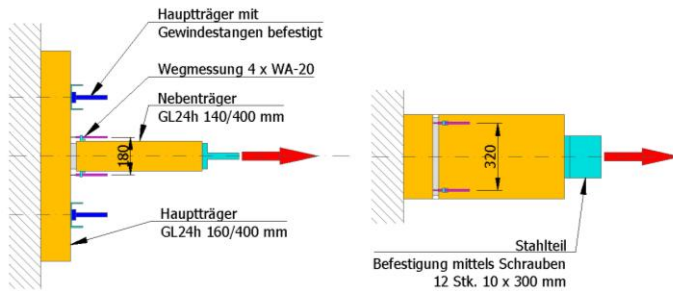


Abbildung 12: Prüfkonfiguration – statische Zugprüfung in Richtung der Nebenträgerlängsachse [13]

zyklische Prüfungen nach ÖNORM EN 12512 [5]

Bei dieser Serie wurden jeweils fünf Prüfkörper aller drei SHERPA XL100-EQ-Prototypen einer Prüfung mit zyklischer Beanspruchung unterzogen. Die Hauptträgerseite der Verbindung wurde fest an der Prüfmaschine verankert. Am auskragenden Nebenträger wurde im Abstand $e = 1014,5 \text{ mm}$ vom Verbinder die zyklische Kraft in Einschubrichtung aufgebracht. Dadurch ergab sich eine vorzeichenwechselnde Querkraft- und Momentenbeanspruchung im Verbinder (siehe Abbildung 13).

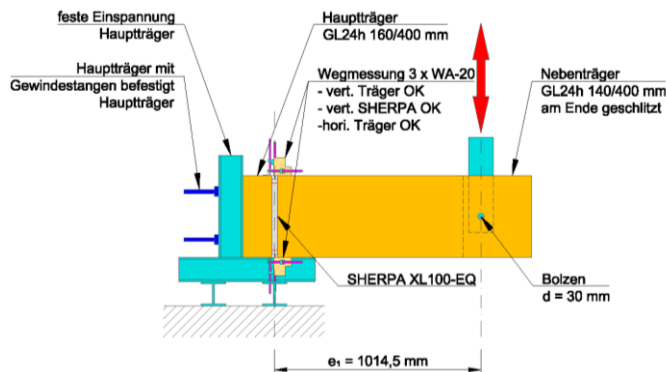


Abbildung 13: Prüfkonfiguration – dynamische Prüfung Moment und Querkraft [13]

2.3. Bestimmung der Duktilität von Verbindungsmitteln

Die Duktilität beschreibt allgemein das Verhältnis zwischen der maximalen Verformung im Bruchzustand und der elastischen Verformung bei Fließbeginn.

Nach ÖNORM EN 12512[5] liefert die umhüllende Kurve der zyklischen Prüfungen folgende Parameter zur Berechnung des Duktilitätsmaßes D :

- Der Fließpunkt ist der Schnittpunkt der Geraden durch die Punkte $0,1 \cdot F_{\max}$ und $0,4 \cdot F_{\max}$ der Umhüllenden mit der Tangente der Steigung $k_2 = 1/6 \cdot k_1$ an die Umhüllenden. Der Fließpunkt hat die Koordinaten Fließverschiebung v_y und Fließlast F_y
- Die Grenzverschiebung v_u ist jene Verschiebung, bei welcher der Verbinder versagt.

Die Abbildung 14 zeigt eine Hystereseschleife und die Umhüllende der durchgeführten Prüfungen.

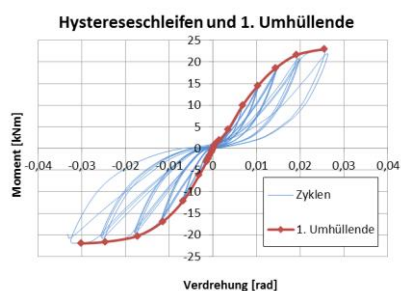


Abbildung 14: Hystereseschleifen und Umhüllende[13]

Das Duktilitätsmaß D wurde mittels Glg. (3) ermittelt.

$$D = \frac{v_u}{v_y} \quad (3)$$

D ... Duktilitätsmaß D [-]
 v_y ... Fließverschiebung [mm]
 v_u ... Grenzverschiebung [mm]

Verbindungsmittel müssen nach ÖNORM EN 1998-1 [10] folgende Mindestduktilitätsmaße D_{\min} aufweisen, um den Duktilitätsklassen gerecht zu werden (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Mindestduktilitätsmaß D_{\min} für die Duktilitätsklassen nach ÖNORM EN 1998-1 [10]

Duktilitätsklasse	Anforderung D_{\min}
DCL (niedriges Dissipationsvermögen)	< 4
DCM (mittleres Dissipationsvermögen)	≥ 4
DCH (hohes Dissipationsvermögen)	≥ 6

2.4. Ergebnisse

Die wesentlichen Ergebnisse der Untersuchungen zum Querkraftwiderstand der SHERPA XL100-EQ-Prototypen sind in Tabelle 3 zusammengestellt. Die Art der Versagensmechanismen wird angegeben. Bei der Ermittlung der Tragfähigkeit wurde eine Rohdichtekorrektur durchgeführt, um die Ergebnisse miteinander vergleichen zu können. Der Mittelwert der erreichten maximalen Querkraft der Prüfung $F_{\text{Mod,mean}}$ und der Mittelwert der Rohdichte $\rho_{12,\text{mean}}$ jenes Trägers wird angegeben, in dem das Versagen auftrat.

Tabelle 3: Prüfergebnisse der statischen Querkraftprüfungen in und entgegen der Einschubrichtung

Ergebnisse der Querkraftprüfungen	in Einschubrichtung							entgegen der Einschubrichtung							
	Versagen			Auswertung				Versagen				Auswertung			
	Schraubenauszug HT	Biegebruch NT	Querzug NT	$\rho_{12,\text{mean}}$ [kg/m ³] CoV jew. des versagten Trägers	$F_{\text{Mod,mean}}$ [kN] CoV	$F_{\text{Mod,k}}^{(2)}$ [kN]	$K_{\text{ser,mean}}^{(3)}$ [kN/mm] CoV	Schraubenauszug HT	Querzug HT	Querzug NT	Schub NT	$\rho_{12,\text{mean}}$ [kg/m ³] CoV jew. des versagten Trägers	$F_{\text{Mod,mean}}$ [kN] CoV	$F_{\text{Mod,k}}^{(2)}$ [kN]	$K_{\text{ser,mean}}^{(3)}$ [kN/mm] CoV
SHERPA XL100 EQ-4DIN	2+1 ¹⁾	1	1	454 7,53 %	134 9,75 %	93,3	85,4 21,1 %	2	-	3	-	426 3,02 %	144 8,72 %	106	54,6 22,5 %
SHERPA XL100 EQ-4EJO	-	-	1	484	133	-	112	-	1	1	2	442 1,62 %	138 9,89 %	96,1	41,9 31,2 %

¹⁾ Prüfung wurde aufgrund von Unregelmäßigkeiten bei der Messung nicht ausgewertet

²⁾ charakteristischer Wert bestimmt nach ÖNORM EN 14358 [7] und TR016 [2]

³⁾ Verschiebungsmodul K_{ser} bestimmt gemäß ÖNORM EN 26891 [11]

Die wesentlichen Ergebnisse der Prüfungen der Zugtragfähigkeit in Richtung der Nebenträgerlängsachse der SHERPA XL100-EQ-Prototypen sind der Tabelle 4 zu entnehmen.

Tabelle 4: Prüfergebnisse der statischen Zugkraftprüfungen

Ergebnisse der Zugkraftprüfungen	Versagen		Auswertung		
	Schraubenauszug NT	$\rho_{12,mean}$ [kg/m ³] CoV jew. des versagten Trägers	$F_{Mod,mean}$ [kN] CoV	$F_{Mod,k}^{1)}$ [kN]	$K_{ser,mean}^{2)}$ [kN/mm] CoV
SHERPA XL100-EQ-3DIN	5	439 2,92 %	177 5,38 %	136	75,0 6,73 %
SHERPA XL100-EQ-4DIN	5	452 4,76 %	186 10,5 %	130	86,8 16,1 %

¹⁾ charakteristischer Wert bestimmt nach ÖNORM EN 14358 [7] und TR016 [2]

²⁾ Verschiebungsmodul K_{ser} bestimmt gemäß ÖNORM EN 26891 [11]

Die Ergebnisse der zyklischen Prüfungen sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Angegeben wird der Mittelwert des positiven und negativen, Rohdichte korrigierten Momentes $M_{Max,mean}$ und die Verdrehsteifigkeit $K_{\phi,ser}$.

Tabelle 5: Prüfergebnisse der zyklischen Prüfungen

Ergebnisse der zyklischen Prüfungen	Versagen		Auswertung					
	Schraubenauszug HT	Schraubenauszug NT	$\rho_{12,mean}$ [kg/m ³] CoV jew. des versagten Trägers	positives $M_{Mod,mean}$ [kN] CoV	$K_{\phi,ser,mean}^{3)}$ [kN/mm] bei positivem Mo-	negatives $M_{Mod,mean}$ [kN] CoV	$K_{\phi,ser,mean}^{1)}$ [kN/mm] bei negativem Mo-	D [-] aus positiv/negativem Moment
SHERPA XL100-EQ-3DIN	4	-	485 7,53 %	-20,4 7,40 %	1558	20,6 11,1 %	1674	2,6/2,4
SHERPA XL100-EQ-4DIN	3	2	451 5,74 %	-23,0 6,70 %	1980	24,0 11,5 %	2179	2,9 / 2,3
SHERPA XL100-EQ-4EJO	3	2	470 6,23 %	-21,9 6,24 %	1890	22,4 12,4 %	1756	2,6 / 2,1

¹⁾ Verschiebungsmodul K_{ser} bestimmt gemäß ÖNORM EN 26891 [11]

Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse müssen alle SHERPA XL100-EQ Prototypen der Duktilitätsklasse DCL mit niedrigem Dissipationsvermögen zugeordnet werden. Die Duktilitätseigenschaften konnten zwar ermittelt werden, führten aber auf Grund des überraschend spröden Verhaltens des Aluminiums vorerst nicht zum gewünschten Resultat eines Verbinders mit hoher Duktilität und gleichzeitig entsprechender Tragfähigkeit.

2.5. Prüfung Querbolzen

Bei den Querbolzen der SHERPA XL100-EQ-Prototypen wurde keine oder nur geringe Neigung zum Fließen beobachtet. Deshalb wurden zusätzlich Materialprüfungen an Querbolzen durchgeführt. Um die Duktilitätseigenschaften des SHERPA-Verbinders über die Querbolzen steuern zu können, wurden die Bolzen durch unterschiedlich dicke Aluminiumplatten gesteckt und auf Abscheren geprüft. Dabei wurden zwei unterschiedliche Legierungen der Aluminiumplatten untersucht.

Bei der Prüfkongfiguration, siehe Abbildung 15, blieb der Einfluss der Schwalbenschwanzverbindung des SHERPA-Verbinders unberücksichtigt. Damit wurde das Optimum in Bezug auf die Duktilität der Verbindung gesucht.

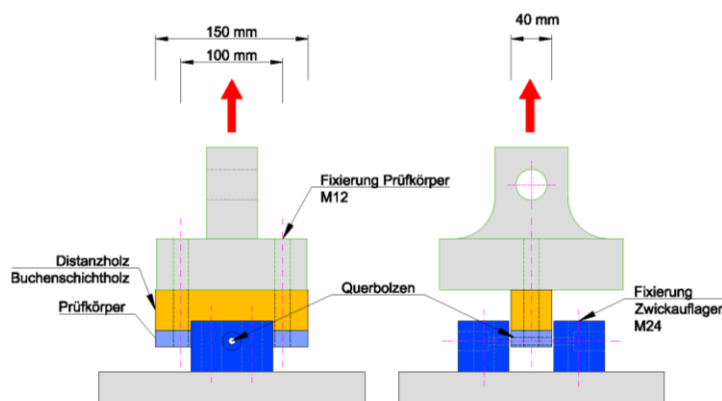


Abbildung 15: Prüfung der Querbolzen [13]

Vergleich des Grundmaterials der SHERPA-Verbinder

Für das Grundmaterial des Verbinders wurden zwei Aluminiumlegierungen (EN AW-5083 und EN AW-6082) untersucht. Bei der Auswertung des Grundmaterials wurden jene Prüfungen miteinander verglichen, die eine Dicke der Grundplatte von 20 mm und einen Bolzen vom Typ DIN7991 - 8.8 ($d = 6$ mm und 8 mm) oder vom Typ EJOT-JZ3 ($d = 6$ mm und 8 mm) aufwiesen. Bei den Prüfungen der Aluminiumlegierung AW-5083 wurde ein höheres statisches Duktilitätsmaß D und ein geringeres Verhältnis zwischen dem Fließpunkt und der maximalen Kraft (F_y / F_{max}) als bei der Legierung AW-6082 festgestellt.

Tabelle 6: Vergleich Grundmaterial des Verbinders

Bolzen	AW-5083		AW-6082	
	D [-]	F_y / F_{max} [-]	D [-]	F_y / F_{max} [-]
DIN7991, $d = 6$ mm ¹⁾	3,5	0,75	2,5	0,84
DIN7991, $d = 8$ mm ²⁾	2,7	0,84	1,8	0,91
EJOT-JZ3, $d = 6$ mm ¹⁾	1,8	0,88	1,4	0,93
EJOT-JZ3, $d = 8$ mm ¹⁾	2,1	0,89	1,7	0,97

¹⁾ Bruchursache: Abscheren der Bolzen

²⁾ Bruchursache: Ausziehen der Bolzen aus dem Grundmaterial

Vergleich des Materials der Querbolzen

Als Querbolzen wurden die Bolzen DIN7991 - 8.8, EJOT-JZ3 und die Aluminiumbolzen EN AW-6060 und EN AW-6082 untersucht. Bei der Auswertung der Querbolzen wurden jene Prüfungen miteinander verglichen, die eine Dicke der Grundplatte von 20 mm (AW-5083) hatten. Es wurden jeweils Prüfungen mit dem Durchmesser $d = 6$ mm und 8 mm durchgeführt.

Am DIN7991 - 8.8 Bolzen konnte das höchste statische Duktilitätsmaß D und geringste Verhältnis für F_y / F_{max} festgestellt werden.

Tabelle 7: Vergleich Material der Querbolzen

Bolzen	D [-]	F_y / F_{\max} [-]	Bruchursache
AW-6060, $d = 6$ mm	2,1	0,89	Abscheren der Querbolzen
AW-6082, $d = 6$ mm	1,9	0,9	
DIN7991, $d = 6$ mm	3,5	0,75	
EJOT-JZ3, $d = 6$ mm	1,8	0,88	
AW-6060, $d = 8$ mm	2,1	0,88	Abscheren der Querbolzen
AW-6082, $d = 8$ mm	1,7	0,92	
DIN7991, $d = 8$ mm	2,7	0,84	Ausziehen der Querbolzen
EJOT-JZ3, $d = 8$ mm	2,1	0,89	

2.6. Schlussfolgerungen aus den Prüfergebnissen

Im Zuge dieses Beitrages wurden Grundprinzipien für eine erdbebengerechte Planung von Holztragwerken angeführt. Besonders zu erwähnen ist dabei, dass das Versagen von Holzbauteilen im Allgemeinen spröde ist und somit die erforderliche Duktilität im Erdbebenfall über die Ausbildung entsprechender Verbindungen stammen muss.

Dazu wurden, aufbauend auf dem Standardprodukt SHERPA XL100, drei modifizierte Prototypen mit geänderter Schraubenanzahl und -orientierung, sowie geändertem Wirkprinzip infolge der Einführung eines Querbolzens entwickelt. Die Prototypen wurden auf Abscheren und Zug (statisch), sowie Momentenbeanspruchung (zyklisch) geprüft. Aus den Prüfungen konnten folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Werden die ermittelten Tragfähigkeiten der Querbolzen mit der entsprechenden Anzahl an Querbolzen in den SHERPA XL100-EQ-Verbindern multipliziert, können sie mit den Ergebnissen der Verbinderprüfungen verglichen werden.
- Bei der Belastungsart Zug in Nebenträgerlängsrichtung wurde die berechnete Tragfähigkeit der Querbolzen überschritten, aber kein Versagen der Querbolzen bei der Prototypenprüfung beobachtet. Ebenso ergab die berechnete Tragfähigkeit der Querbolzen einen geringeren Widerstand, als bei einigen Momentenprüfungen der Prototypen festgestellt wurde. Es ist anzumerken, dass der Einfluss der Schwalbenschwanzverbindung bei den Querbolzenprüfungen unberücksichtigt blieb.
- Bei den Prüfserien mit Beanspruchung entgegen der Einschubrichtung wurde die gesamte Last über die Querbolzen von einem SHERPA-Teil zum anderen übertragen. Betrachtet man die Ausnutzung der Fließgrenze bei der Verwendung der EJOT-JZ3 Bolzen liegt diese bei etwa 100 %. Dies deckt sich mit den vorhandenen Deformationen der Querbolzen bei der Prüfserie mit dem SHERPA XL100-EQ-4EJO.
- Für ein duktileres Verhalten eines SHERPA-Erdbebenverbinders muss das Versagen innerhalb des Verbinders stattfinden und nicht, wie bei den Prüfungen beobachtet, durch ein Ausziehen der Holzschrauben charakterisiert sein.
- Bedenkt man die statistischen Streuung (Verteilung) der zwei Versagensmechanismen Fließen der Querbolzen und Herausziehen der Schrauben und den nicht berücksichtigen Einfluss des Schwalbenschwanzes bei den Querbolzenprüfungen, so soll für den neuen überarbeiteten SHERPA-EQ-Prototyp die Bedingung nach Glg. (4) eingehalten werden.

$$\frac{F_{HS,k}}{F_{QB,95}} \text{ oder } \frac{M_{HS,k}}{M_{QB,95}} \geq 1,30 \quad (4)$$

$F_{HS,k}$... Kraft im Querbolzen bei Versagen der Holzschrauben (charakteristisches Niveau) [kN]

$F_{QB,95}$... Kraft im Querbolzen bei Versagen der Querbolzen (95 % Fraktile) [kN]

$M_{HS,k}$... Moment bei Versagen der Holzschrauben (charakteristisches Niveau) [kN]

$M_{QB,95}$... Moment bei Versagen der Querbolzen (95 % Fraktile) [kN]

Dafür eignet sich letztendlich der EJOT-JZ3 Bolzen mit dem Nenndurchmesser $d = 6$ mm, der ein hohes statisches Duktilitätsmaß ausweist.

3. Danksagung

Die Entwicklung des SHERPA-EQ-Verbinders wurden im Rahmen des FFG COMET K-Projektes «focus_sts» am Kompetenzzentrum holz.bau forschungs gmbh durchgeführt und in Kooperation mit dem Industriepartner Vinzenz Harrer GmbH, Frohnleiten bearbeitet. Das Projekt wird aus Mitteln des Bundesministeriums für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft, des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT), der Steirischen Wirtschaftsförderungsgesellschaft GmbH, des Landes Steiermark (A12), des Kärntner Wirtschaftsförderungs Fonds (KWF), des Landes Niederösterreich Abteilung Wirtschaft, Tourismus und Technologie und der Standortagentur Tirol gefördert.

4. Literatur

- [1] DIN 4149: 2005-04 Bauten in deutschen Erbebengebieten - Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten
- [2] EOTA, Technical Report TR 016: 2012-02 Method of testing Three-Dimensional Nailing Plates with examples
- [3] Holzbauten in Deutschen Erdbebengebieten, Regelungen nach DIN 4149:2005-04.Holzbau Deutschland, Bund deutscher Zimmermeister, Ausgabe September 2011
- [4] Krolak, M.: Nachweis der Erdbebensicherheit von Holzgebäuden, Ingenieurkammer-Bau NRW, Hamburg, Mai 2011
- [5] ÖNORM EN 12512: 2005-12-01 Holzbauwerke - Prüfverfahren - Zyklische Prüfungen von Anschlüssen mit mechanischen Verbindungsmitteln
- [6] ÖNORM EN 14080: 2013-08-01 Holzbauwerke - Brettschichtholz und Balkenschichtholz - Anforderungen
- [7] ÖNORM EN 14358: 2013-10-01 Holzbauwerke - Berechnung der charakteristischen 5%-Quantile und Mittelwerte für Erstprüfungen und werkseigene Produktionskontrolle
- [8] ÖNORM EN 1990: 2013-03-15 Eurocode - Grundlagen der Tragwerksplanung
- [9] ÖNORM B 1998-1:2011-06-15Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten - Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1998-1 und nationale Erläuterungen
- [10] ÖNORM EN 1998-1: 2013-06-15 Eurocode 5: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten
- [11] ÖNORM EN 26891: 1991-08-01 Holzbauwerke - Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln - Allgemeine Grundsätze für die Ermittlung der Tragfähigkeit und des Verformungsverhaltens
- [12] Schinner, H.; Brandner, R.: focus_sts 3.1.4_1 Analyse, Darstellung und Entwicklung von Systemverbindern für erdbebengerechte Anschlüsse. Forschungsbericht, holz.bau forschungs gmbh, Technische Universität Graz, 2013
- [13] Sieder, R.; Mahlknecht, U.: focus_sts 3.1.4_2_SF14 SHERPA EQ Verbinder. Forschungsbericht, holz.bau forschungs gmbh, Technische Universität Graz, 2015