



*Prof. Alpo Ranta-Maunus
Wissenschaftlicher
Gruppenleiter,
VTT Technisches
Forschungszentrum
Espoo, FIN*

Starke, duktile Verbindungen für Holzkonstruktionen

Starke, duktile Verbindungen für Holzkonstruktionen

Einführung

Die Tragfähigkeit und die Steifigkeit von Verbindungen sind die größten Herausforderungen beim Entwurf von Holzkonstruktionen. Es ist normal, dass die Abmessungen der Holzteile von der Verbindungstechnologie bestimmt werden: um die benötigte Anzahl von Bolzen anbringen zu können, muss der Konstrukteur Holz mit größeren Abmessungen verwenden, als die Belastung der Holzteile dies erfordern würde. Häufig beträgt die Übertragungsfähigkeit für Kräfte der Verbindung etwa 50% der Tragfähigkeit des Holzteiles, das weiter von der Verbindung entfernt ist.

Nicht nur die Tragfähigkeit, sondern auch die Steifigkeit herkömmlicher Verbindungen in Holzkonstruktionen muss verbessert werden, weil flexible Verbindungen die Durchbiegung erhöhen, was häufig ein Problem für die Akzeptanz der Konstruktion ist. Wenn die Steifigkeit erhöht wird, besteht das Risiko, dass die Duktilität der Verbindung verloren geht und die Verbindung dadurch zu brüchig wird. Aus Gründen der öffentlichen Sicherheit sollte dies vermieden werden, daher muss, wenn Steifigkeit und Tragfähigkeit der Verbindung erhöht werden, eine adäquate Duktilität erhalten bleiben, wie dies in Abbildung 1 aufgezeigt wird.

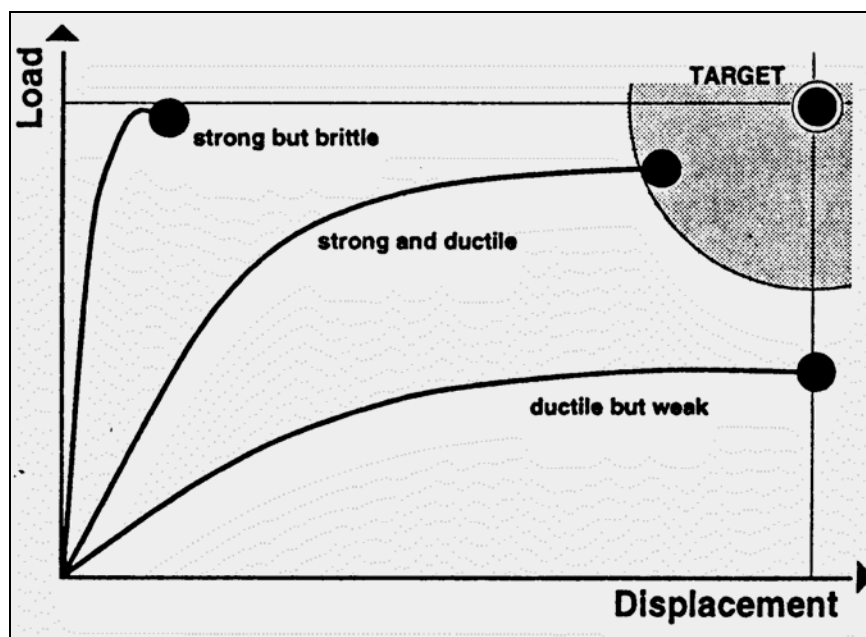


Abbildung 1: Ziel der Entwicklung von Verbindungen: stark und duktil

Quelle: P. Haller

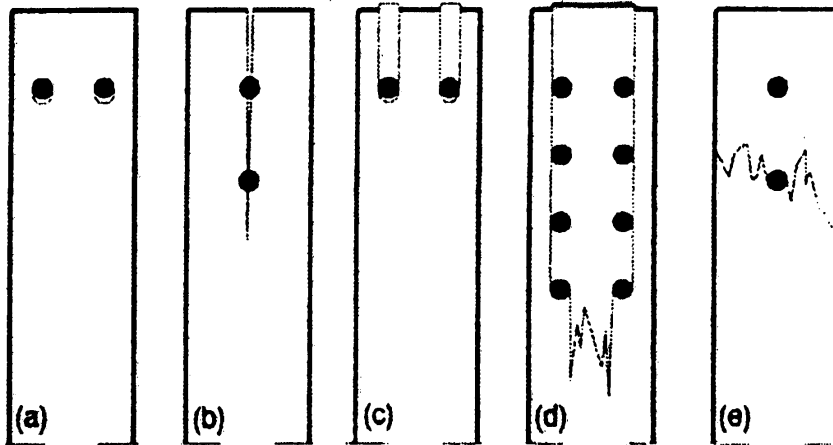


Abbildung 2: Versagensmechanismen von Holzverbindungen. Nur Fall (a) ist duktil

Der Sprödbbruch mechanischer Verbindungen kommt durch Abscheren des Holzes zum Ausdruck, welche die Folge von hohen lokalen Zug- und Scherspannungen im Holz sind. Das kann der Fall sein, wenn die Dichte der Verbindungsmittel maximiert wird, um die Lasten effektiv zu übertragen. Solche Versagen werden in Abbildung 2 aufgezeigt. Abbildung 3 stammt aus einem langfristigen Belastungstest. Eine lange Dauer der Belastung erhöht das Risiko des Holzbruchs im Verbindungsbereich. Diese Form des Versagens ist in der herkömmlichen Theorie, welche als Basis für die Konstruktion für Stiftverbindungen von Holz verwendet wird, nicht enthalten. Zurzeit werden erste Schritte zur Berücksichtigung von Aufspalten und Blockscherversagen bei Konstruktionsnormen getan, und die ganze Angelegenheit befindet sich im Forschungsstadium. Während die Entwicklung besserer Bruchkriterien anhält, ist es äußerst wichtig, Verbindungen zu verwenden, bei denen Versagen durch Holzbruch vermieden werden.

Diese Abhandlung fasst die Ergebnisse unserer Forschungs- und Entwicklungsarbeit zusammen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden mechanische Verbindungen von Holzkonstruktionen entwickelt, bei denen die Stärke und die Steifigkeit der Verbindungen erfolgreich verbessert wurden, während gleichzeitig ein hohes Maß an Duktilität erhalten blieb. Die Untersuchungen wurden in den letzten Jahren von VTT (Technisches Forschungszentrum von Finnland) in Zusammenarbeit mit unseren Kunden und der Technischen Universität Helsinki durchgeführt.



Abbildung 3: Blockscherbruch einer Testverbindung
Quelle: J. Vesa



Abbildung 5: Mit Nagelplatte verstärkte Bolzenverbindung nach einer Belastung bis zum Versagen

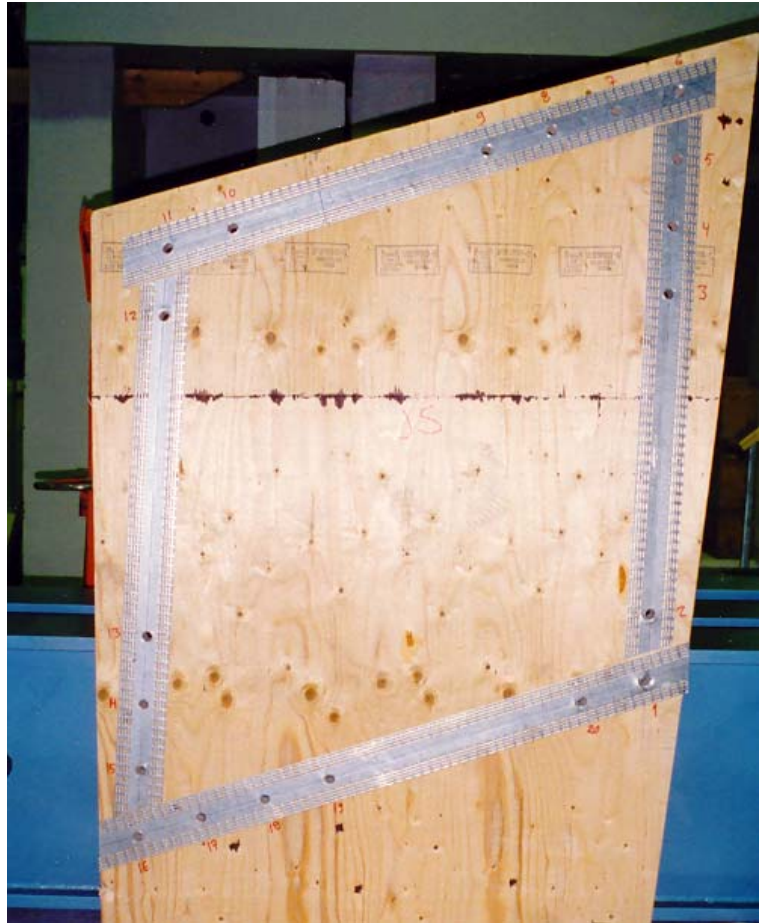


Abbildung 6: Kerto-FSH Rahmenteil, das zum Fügen mit Nagelplattenstreifen verstärkt wurde. Die Verstärkung verhindert eine Ausdehnung und Schrumpfung, was die Installation vor Ort vereinfacht

Montageverbindungen mit Kombi-Nagelplatten

Ziel dieser Forschung war die Entwicklung einer wirtschaftlichen Spleißverbindung, die im Hinblick auf die Stärke- und Steifigkeitseigenschaften mit einer gewöhnlichen Nagelplattenverbindung vergleichbar ist und die schnell und leicht auf der Baustelle montiert werden kann, ohne dass Spezialwerkzeuge benötigt werden. Das für die Untersuchung ausgewählte Basis-Verbindungssystem bestand aus einem an einem der Holzteile angebrachten so genannten Kombi-Nagelplatte und aus einem an dem anderen Holzteil angebrachten Verstärkungsnagelplatte. Die Hälfte der Länge der Kombi-Nagelplatte ist nicht perforiert und hat vorgebohrte Löcher für Befestigungselemente, die durch die Verstärkungsnagelplatte an das andere Holzteil genagelt, geschraubt oder genietet werden. Die Befestigungselemente, die für die Montage vor Ort verwendet wurden, waren Rillennägeln, selbstbohrende Schrauben und Pop-Nieten. Tests ergaben, dass diese verstärkten Verbindungen sehr duktil waren, und dass eine mit Spezialnagelplatten verstärkte Verbindung mehr als die doppelte Tragfähigkeit und mehr als die fünffache Steifigkeit im Vergleich zu gewöhnlichen Verbindungen mit genagelten Platten aufweist. Die wirtschaftlichste Lösung besteht jedoch darin, Schrauben zu verwenden: die Tragfähigkeit einer gewöhnlichen Nagelplatte-Spleißverbindung wurde mit nur wenigen selbstbohrenden Schrauben (4,8 x 19 mm) erreicht.



Abbildung 7: Selbstbohrende Schrauben können für die Vor-Ort-Verbindung von Holzteilen verwendet werden, und die vollständige Tragfähigkeit wird durch die Verwendung nur weniger Schrauben erreicht

Jedoch konnten die Steifigkeitseigenschaften einer Nagelplattenverbindung von keiner der untersuchten Verbindungen erreicht werden, wenn die Anzahl der Vor-Ort-Verbindungsmittel durch den Grenzzustand der Tragfähigkeit bestimmt wurde. Die Steifigkeit einer genietetten Verbindung, die durch eine Spezialnagelplatte verstärkt wurde, war die beste der untersuchten Verbindungen, aber selbst hier betrug die Steifigkeit nur ein Drittel der Verankerungssteifigkeit einer W-Nagelplattenverbindung mit der gleichen Tragfähigkeit. Jedoch könnte die schwache Scherkapazität der Niete und ihre langsame Montage ihre Verwendung bei Anwendungen einschränken, bei denen es auf eine glatte Oberfläche oder auf ein sauberes Aussehen ankommt.

Die Steifigkeiten der geschraubten und genagelten Verbindungen, die mit Spezialnagelplatten verstärkt wurden, betragen etwa $1/5$ und $1/6$ der Steifigkeit der Verbindung mit W-Nagelplatten. Trotzdem war ihre Steifigkeit rund fünfmal größer als die der nicht verstärkten genagelten Verbindungen mit der gleichen Tragfähigkeit.

Die M18H-Nagelplatte war für die Verstärkung genagelter und geschraubter Verbindungen anwendbar. Die gewöhnliche W-Nagelplatte war für die Verstärkung genagelter und geschraubter Verbindungen am wenigsten geeignet, weil die Löcher der Nagelplatte so groß sind, dass die Befestigungselemente keinerlei Verstärkungswirkung mehr unterliegen, wenn sie auf die Löcher treffen. Die typische Tragfähigkeit, die bei den Tests für die genagelten, mit einer W-Nagelplatte verstärkten Verbindung erreicht wurde, war nur 4% höher als die einer nicht verstärkten Verbindung, während die Verstärkung mit der M18H-Nagelplatte und der Spezialnagelplatte die Tragfähigkeit der genagelten Verbindung um 53% bzw. um 127% erhöhte. Das Verhältnis zwischen der Anzahl von Verbindungsmitteln, die für dieselben Tragfähigkeiten von vor Ort angebrachten Verbindungsmitteln entspricht, ist in etwa (s. Tabelle 1):

- 1 Schrauben verstärkt mit Spezialplatte =
- 1,5 Nägel verstärkt mit Spezialplatte =
- 1,6 Schrauben verstärkt mit M18H-Nagelplatte =
- 2,2 Nägel verstärkt mit M18H-Nagelplatte =
- 2,3 Pop-Nieten verstärkt mit Spezialplatte =
- 3,5 nicht verstärkte Nägel.

Die experimentelle Untersuchung zeigte, dass mit Nagelplatten verstärkte genagelte und geschraubte Verbindungen sich auch für Momentenverbindungen eignen. Bei Kombi-Spleißverbindungen kann der Holzkontakt mindestens auf gleiche Weise genutzt werden wie bei der Konstruktion der Nagelplatte-Spleißverbindungen. Außerdem kann die Theorie der Plastizität Gewinn bringend genutzt werden, wenn man die Scherkraft der Befestigungselemente berechnet, weil der Versagensmodus der verstärkten Verbindung duktil ist. Die Rotationssteifigkeit der verstärkten Kombiverbindung ist jedoch wesentlich schwächer als diejenige einer Nagelplatteverbindung mit der gleichen Tragfähigkeit: die gemessene Rotationssteifigkeit der Schraubengruppe betrug, je nach Verbindungsart, nur 1/15 – 1/30 der Rotationssteifigkeit des Nagelplattenteils der Kombiverbindung.

Verbindungsmittel	Verstärkung	R_k (N)	K_{ser} (N/mm)
Nagel 4,0x40	-	1730	600
Nagel 4,0x40	M18H Nagelplatte	2660	1000
Nagel 4,0x40	Spezial-Nagelplatte	3930	3200
Pop-Niete 4,0x9,5	Spezial-Nagelplatte	2640	4700
Schraube 4,8x19	M18H Nagelplatte	3840	2700
Schraube 4,8x19	Spezial-Nagelplatte	5980	6000

Tabelle 1: Das augenblickliche Verschiebungsmodul und die typischen Tragfähigkeiten pro Verbindungsmittel bei Kombiverbindungen

Brettschichtholzverbindungen auf der Basis von V-förmig eingeleimten Stahlstäben

Eingeleimte Stahlstäbe für die Übertragung von Kräften werden in mehreren Ländern in Brettschichtholzkonstruktionen verwendet. Normalerweise werden Rippenstahlstäbe parallel oder senkrecht zu dem Holzteil angebracht, wenn sie zu Verstärkungszwecken benutzt werden. Wir haben eine andere Idee aus Russland übernommen und daraus ein Verbindungskonzept auf der Basis von Stäbe entwickelt, die in einem Winkel von 30° bis 90° zu der Holzteilrichtung verleimt werden [Kangas1994, Kangas et al 2001]. Zu den vorgenommenen Untersuchungen gehören mechanische Tests von Verbindungen und mechanische Tests, bei denen die Verbindung Feuer ausgesetzt war. Als Beispiel wird auf Abbildung 8 eine Verbindung zwischen Stützen und Fundament gezeigt. Das gleiche Prinzip kann bei einer Verbindung zwischen Träger und Stützen oder allen anderen Brettschichtholzverbindungen angewandt werden, bei denen es auf eine hohe Momentkapazität und Rotationssteifigkeit ankommt.

Die Nutzung von Stäbe in einem Schrägwinkel zu der Stützen-/Trägerrichtung hat folgende grundsätzliche Vorteile:

1. Das Reißen des Holzes wird verhindert, wenn die Stäbe die gesamte Tiefe des Trägers durchdringen, was nicht der Fall ist, wenn die Stäbe parallel zum Träger verlaufen.
2. Bei kraftübertragenden Verbindungen kann die vollständige Tragfähigkeit des Trägers erreicht werden.
3. Die Verbindung ist in gebrauchstauglichem Zustand steif. Jedoch macht das Fließen beim Stahl das Bruchverhalten duktil und die Berechnung einfach.

Dieses Konzept wurde in den achtziger Jahren in mehreren Gebäuden in Russland angewendet. Kürzlich wurden in Finnland standardisierte Stahlkomponenten für diese Technologie entwickelt, siehe Abbildung 8. Auch sind die Berechnungsregeln der Konstruktion in den nationalen Baunormen enthalten. Die ersten industriellen Gebäude wurden bereits gebaut, und die Technologie ist jetzt im Handel erhältlich.

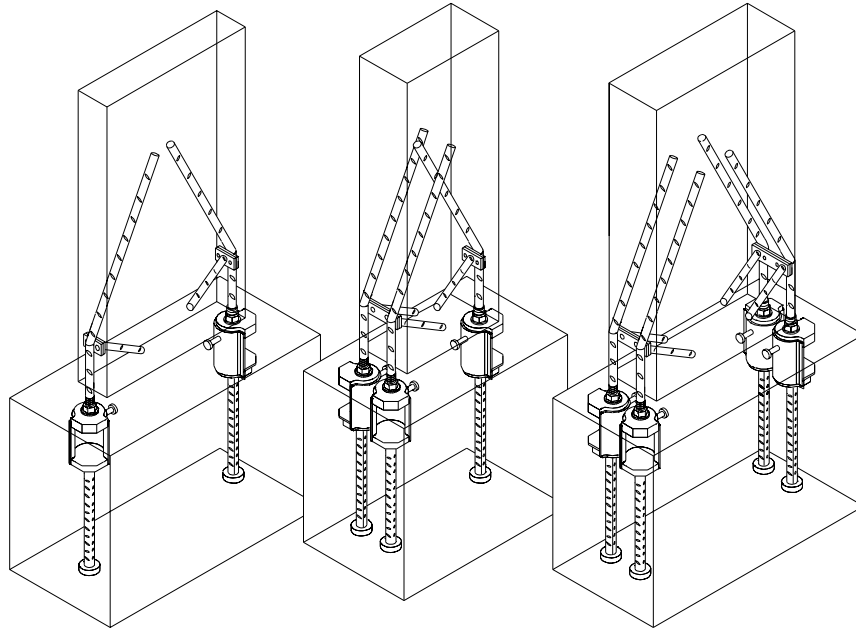


Abbildung 8: Verbindung zwischen Stützenfuß und Betonfundament mit eingeleimten Stahlstäben. Standardisierte Stahlkomponenten werden im Werk mit dem Holz verleimt, und bekannte Stahlkonstruktionstechnologien werden vor Ort für die Verbindungen verwendet

Verbindungen mit Schrägschrauben

Die schrägen selbstbohrenden Schrauben können effektiv zur Befestigung bei Holz-Holz-Verbindungen benutzt werden, weil die Schrauben besonders widerstandsfähig gegen Herausziehen oder Eindrücken sind (Blass und Bejtka 2001). Die Steifigkeit dieser Verbindungen kann bis zu 15 Mal höher sein als der Wert von Schrauben, die senkrecht zur Achse des Verbindungsmittels belastet werden.

Diese Abhandlung fasst einen Teil der Ergebnisse einer Untersuchung von geschraubten Verbindungen mit schrägem Schraubwinkel bei Schnittholz und Kerto-Furnierschichtholz zusammen. Das Ziel bestand darin, Konstruktionsgleichungen für Verbindungen mit hoher Steifigkeit unter Verwendung von Schrauben mit einem Lastwinkel von 45° zu entwickeln. Zwei Arten von einschnittigen Verbindungen wurden untersucht: eine Kreuzschraubenverbindung und eine Zugschraubenverbindung. Die Kreuzschraubenverbindung besteht aus einem symmetrischen Schraubenpaar, bei dem die eine Schraube unter Druck und die andere unter Zug steht. Wenn die Verbindung nur aus Schrauben unter Zug besteht, ist ein Kontakt zwischen den Holzteilen erforderlich. Man ging davon aus, dass die Steifigkeit der Kreuzschraubenverbindung besser ist, weil kleine Lücken zwischen den Holzteilen keine Auswirkung auf die anfängliche Steifigkeit der Verbindung hätten.

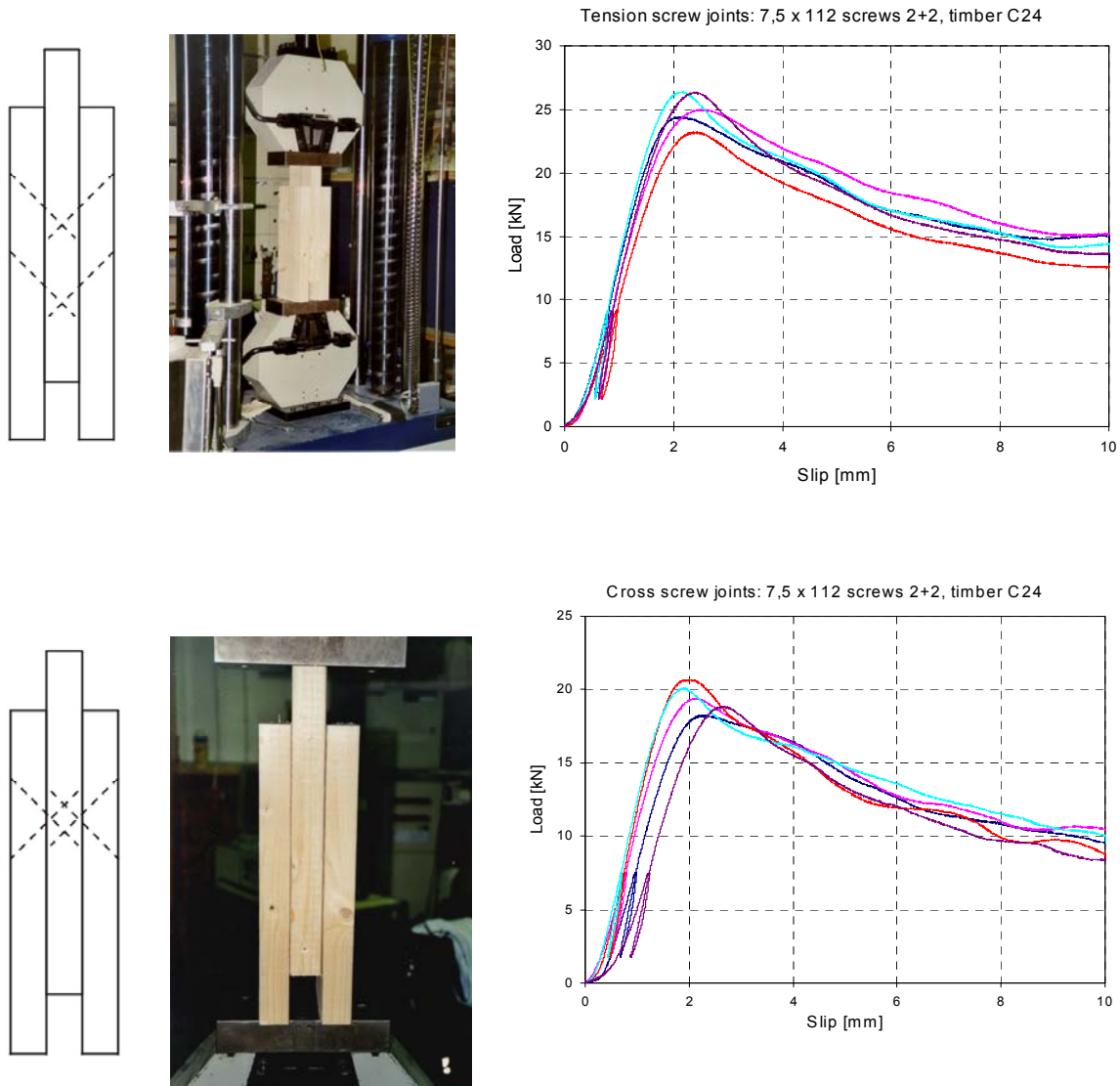


Abbildung 9: Kreuzschrauben- und Zugschrauben-Testaufbau und Lastverschiebungskurven. Die Verschiebung wurde als Bewegung des Lastzylinders gemessen, der die anfängliche Verdrängung der Kurven mit Lastwerten von < 2 kN verursacht hat

Die Scherkraft und die Steifigkeit von insgesamt 145 Verbindungsexemplaren mit Schrägschrauben wurden an der Technischen Universität Helsinki (HUT 2002) getestet. Der Winkel zwischen der Schraubenachse und der Krafrichtung betrug 45° , und der Test enthielt die folgenden Variablen: Holzmaterial (Massivhobelware C24, Kerto-S oder Kerto-Q), Schrauben- und Verbindungstyp, Dicke der Holzteile, Anzahl der Schrauben, Endabstände, Schraubenabstände und Feuchtigkeitsveränderungen. Im Allgemeinen wurden in jeder Testserie fünf parallele Exemplare getestet.

Die Versagenursache aller Testexemplare war das Ausziehen der Schrauben. Die maximale Belastung wurde mit einer kleinen Verschiebung erreicht: typischerweise 1-2 mm zwischen den Holzteilen. Nachdem die maximale Belastung erreicht war, war die Tragfähigkeit der Holzteile aufgrund der entwickelten Dübelwirkung immer noch ziemlich groß. Die Belastung wurde fortgesetzt, bis eine Verschiebung von 15 mm erreicht war, wobei die Belastung meist immer noch etwa 50% der maximalen Belastung betrug. Typische Beispiele des Verschiebung-Last-Verhaltens der beiden Testserien werden in Abbildung 9 dargestellt. Die Zugschraubenverbindungen hatten im Allgemeinen eine 25-30% höhere Tragfähigkeit pro Schraube als die Kreuzschraubenverbindungen, was auf die zwischen den Holzteilen auftretende Reibung zurückzuführen war, die nur bei den Zugschraubenverbindungen entstand.

Die Zusammenfassung der Testergebnisse der Kreuzschraubenverbindungen wird in Tabelle 2 zusammen mit den errechneten Werten aufgeführt. Es wurden die folgenden Symbole verwendet:

F_{\max} ist der Mittelwert der Traglaste, der um die Dichte reduziert wird $= F_{\text{mean}}(\rho_k/\rho_{\text{test}})^{1,5}$,

var ist der Koeffizient der Variation der Traglaste (= Standardabweichung/ F_{mean}),

$F_{k,\text{test}}$ ist die charakteristische, bei dem Test festgestellte Tragfähigkeit

F_k ist die errechnete charakteristische Tragfähigkeit

$k_{s,\text{test}}$ ist der Mittelwert der bei dem Test festgestellten Verschiebungsmoduln und

nK_s ist der errechnete Verschiebungsmodul der Verbindung.

Schrauben		F_{\max} kN	var %	$F_{k,\text{test}}$ kN	$F_{k,\text{test}}/F_k$	$k_{s,\text{test}}$ kN/mm	$k_{s,\text{test}}/nK_s$	Zu beachten!
$d \times L$	n							
6x100	2+2	10,51	5,4 %	7,88	1,09	9,40	1,21	Schnelle Belastung Lastzyklen, 3 Versuche
6x100	2+2	11,11	9,1 %	8,33	1,15	12,91	1,66	
6x100	2+2	10,33	7,2 %	7,75	1,07	9,11	1,17	
7,5x112	2+2	17,65	5,0 %	13,24	1,07	12,83	1,02	Lastzyklen, 3 Versuche
7,5x112	2+2	16,64	13,6 %	10,97	0,89	13,59	1,08	
7,5x112	4+4	33,25	5,4 %	24,94	1,01	23,34	0,93	4+4 Schrauben reduz. Endabstand reduz. Abstände zwischen Schrauben
7,5x112	4+4	30,94	10,0 %	23,21	0,94	23,60	0,94	
7,5x112	4+4	32,09	8,8 %	24,07	0,97	23,22	0,92	
7,5x112	8+8	58,97	10,2 %	43,91	0,89	46,50	0,92	8+8 Schrauben reduz. Abstände zwischen Schrauben
7,5x112	8+8	57,88	3,7 %	43,41	0,88	46,79	0,93	
7,5x112	2+2	16,32	8,1 %	12,24	0,99	11,04	0,88	nasses Holz, RH90 trockenes Holz, RH30
7,5x112	2+2	18,92	9,1 %	14,19	1,15	12,91	1,02	
Mittelwert:			8,2 %		0,98		0,96	

Tabelle 2: Testergebnisse von Kreuzschraubenverbindungen von Vollholz

Die Analyse der Verbindungstestergebnisse zeigte, dass die Tragfähigkeit und Steifigkeit von einschnittigen Schrägschraubenverbindungen allein nach dem Modell der Axialkräfte der Schrauben errechnet werden kann, wenn der Winkel zwischen der Schraubenachse und der Krafrichtung 45° beträgt. Jedoch muss die Auswirkung der Durchdringungslänge und der Holzdicke auf die Auszugskraft und die Steifigkeit berücksichtigt werden, und die Auswirkung des Schraubenkopfes und der Reibung zwischen den Holzteilen kann genutzt werden. Die Verschiebung bei der maximalen Belastung der Schrägschraubenverbindung mit einem Schraubenwinkel von 45° ist so klein (1-2 mm), dass der Dübeleffekt bei der Berechnung der Tragfähigkeit der Verbindung nicht berücksichtigt zu werden braucht.

Die errechneten Tragfähigkeiten und Steifigkeiten stimmen ziemlich genau mit den Testergebnissen überein. Das Analysemodell basiert auf der Summe der Kosinuskomponenten der axialen Ausziehfähigkeit und der Steifigkeit der Schrauben. Die Berechnungsmethode und weitere Einzelheiten des Tests werden in der Abhandlung von Kevarinmäki 2002 beschrieben.

Die Nutzung der axialen Ausziehfähigkeit und der Steifigkeit der Schrauben führt zu erhöhter Tragfähigkeit und Steifigkeit. Die extrem hohe Steifigkeit der Schrägschraubenverbindungen kann beispielsweise bei mechanisch miteinander verbundenen Träger und Stützen genutzt werden. Zwar ist das Ausziehversagen brüchig, aber dennoch haben die Schrägschraubenverbindungen aufgrund des Dübeleffektes der Schrauben eine ziemlich hohe Tragfähigkeit mit einer langen Verschiebungsfähigkeit, nachdem die äußerste Belastung überschritten wurde. Dadurch wird die Sicherheit des Konstruktionssystems verbessert.

Referenzen

- Blass, H.J. & Bejtka, I. 2001. Screws with Continuous Threads in Timber Connection. Proceedings PRO 22: International RILEM Symposium on Joints in Timber Structures. Stuttgart, Deutschland. Seite 193-201.
- European Commission, 1999, COST C1 - Control of the semi-rigid behaviour of civil engineering structural connections. Proceedings of the international conference Liege, 17. bis 19. September 1998 ed. P. Haller.
- Kangas, Jorma. 1994. Joints of glulam structures based on glued-in ribbed steel rods. VTT Publications 196. Espoo. 61 S. + ca. 20 S.
- Kangas, Jorma, Kevarinmäki, Ari, Lumiaho, Aki. 2001. Timber structures with connections based on in V-form glued-in rods. - IABSE Reports, Vol. 85. IABSE Conference Innovative Wooden Structures and Bridges. Lahti 29.- 30. August 2001. IABSE AIPC-IVBH (2001)
- Kevarinmäki, A. 1998. Reinforcement of timber joints using nail plate connections. Proceedings of COST C1 Final Conference. Liege, 17 - 19 Sept. 1998. 11 S.
- Kevarinmäki, A. 2000. Nail plate reinforced metal plate-to-timber joints made with nail, screw or pop rivet fasteners. - Proceedings. World Conference on Timber Engineering 2000. Whistler, British Columbia, Kanada, 31. Juli - 3. August 2000. (2000), s. 4.4.2-1-10.
- Kevarinmäki, A. 2002. Joints with inclined screws. CIB W18 meeting 35, Kyoto, Japan, Paper 35-7-4.
- Vesa, J. 2001. Duration of load effect on mechanical timber joints - comparison between joint and timber tests. Technische Universität Helsinki, Labor für Bautechnik und Bauphysik, Veröffentlichung 114.
- Vesa, Janne, Kevarinmäki, Ari. 2001. Long-term capacity of bolted joints loaded perpendicular to grain. - Rilem Proceedings PRO 22. Joint in Timber Structures. Proceedings of the International RILEM Symposium. Stuttgart, DE, 12. - 14. Sept. 2001. Aicher, S. & Reinhardt, H. RILEM Publications.