

H.J. Blaß · Pforzheimer Straße 15b · 76227 Karlsruhe

Firma

sblumer ZT GmbH

Wienerstraße 253

8051 Graz

Österreich

14.11.2012

997\_BSB

## **Gutachtliche Stellungnahme**

### **Trag- und Verformungsverhalten der BSB-Verbindung von Brettschichtholz mit innen liegenden Stahlblechen durch Stahlstifte**

#### **1 Allgemeines**

BSB-Verbindungen von Brettschichtholz mit innen liegenden Stahlblechen durch Stahlstifte waren mit Bescheid des DIBt vom 29. März 1999 unter der Nummer Z-9.1-208 bis zum 31. März 2004 allgemein bauaufsichtlich zugelassen. Mit der Einführung der DIN 1052:2004-08 war eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung nicht mehr erforderlich, da die BSB-Verbindung mit den Regeln der DIN 1052-2004-08 bemessen werden konnte. Dies gilt unverändert auch seit der Einführung der EN 1995-1-1 (Eurocode 5). Die Firma sblumer ZT GmbH hat mich beauftragt, eine Gutachtliche Stellungnahme zu verschiedenen Punkten auszuarbeiten, die Abweichungen von oder Klarstellungen zu den eingeführten technischen Baubestimmungen betreffen. Die folgenden Punkte werden in dieser Gutachtlichen Stellungnahme beurteilt:

- Abstand der Stabdübel zum beanspruchten Hirnholzende,
- Abstand der Stabdübel untereinander in Faserrichtung,
- Duktilität der Verbindung bei der Bemessung für Erdbebeneinwirkungen,
- Lochleibungsfestigkeit in Abhängigkeit vom Kraft-Faser-Winkel,
- Nachweis der Zugspannungen im Nettoquerschnitt des Bauteils,
- Nachweis der Biegebeanspruchungen in den Seitenhölzern.

Als Grundlage für Vorschläge für die Bemessung von BSB-Verbindungen liegen Tragfähigkeitsversuche der ETH Zürich vor (Mischler, A.: Bedeutung der Duktilität für das Tragverhalten von Stahl-Holz-Bolzenverbindungen, Dissertation Nr. 12561; Fontana, M.: Brandsicherheit und mehrgeschossiger Holzbau, Verbindungen der Feuerwiderstandsklassen 30 und 60, Zwischenbericht Experimentelle Untersuchungen des Instituts für Baustatik und Konstruktion vom März 2003; Indermühle, D.: Diplomarbeit K/4/D/130/96//0 an der Fachhochschule Biel vom März 1996).

Im Folgenden werden aus den Ergebnissen der Tragfähigkeitsversuche und auf der Grundlage theoretischer Betrachtungen Vorschläge für Bemessung von BSB-Verbindungen abgeleitet.

## 2 Versuchsergebnisse der Tragfähigkeitsversuche an der ETH Zürich

Sämtliche im Folgenden dargestellten Ergebnisse von Tragfähigkeitsversuchen – auch die in der Diplomarbeit Indermühle dokumentierten Versuche – wurden an der ETH Zürich nach EN 26891 durchgeführt. Es werden hier nur diejenigen Versuchsergebnisse wiedergegeben, die mit einem Mittenabstand der Schlitzte untereinander von mindestens 60 mm durchgeführt wurden. Dieser Blechabstand entspricht dem Mindestblechabstand in BSB-Verbindungen. Der Abstand  $a_{3,t}$  unterschreitet bei 139 von 180 geprüften Verbindungen den Mindestwert von 80 mm nach DIN 1052 bzw. Eurocode 5. Mit den Versuchsergebnissen soll überprüft werden, ob auch ein Mindestabstand  $a_{3,t} = 45 \text{ mm} = 7,1 d$  – nach Eurocode 5 beträgt der Mindestwert 80 mm – eine ausreichende Tragfähigkeit gewährleistet.

Zur Ermittlung des Tragverhaltens von BSB-Verbindungen wurden 180 Versuche mit einer Beanspruchung parallel zur Faserrichtung ausgewertet. Folgende Parameter wurden in den Versuchen variiert:

- Anzahl  $n$  der in Kraft- und Faserrichtung hintereinander liegenden Stabdübel zwischen  $n = 1$  und  $n = 6$ ,
- Anzahl der rechtwinklig zur Kraft- und Faserrichtung nebeneinander liegenden Stabdübel zwischen zwei und neun,
- Mittelholzdicke zwischen 54 und 61 mm,
- Seitenholzdicke zwischen 30 und 77 mm,
- Hirnholzabstand zwischen 20 und 120 mm,
- Rohdichte des verwendeten Brettschichtholzes aus Fichte oder Douglasie zwischen  $333 \text{ kg/m}^3$  und  $578 \text{ kg/m}^3$ .

Sämtliche Verbindungen wurden mit drei Stahlblechen, d.h. mit sechsschnittig beanspruchten Stabdübeln des Durchmessers 6,3 mm hergestellt und geprüft. Jeder Versuchskörper enthielt zwei zugbeanspruchte Verbindungen, so dass insgesamt 360 Verbindungen für die Auswertung zur Verfügung standen. In jedem Prüfkörper versagte die schwächere der beiden Verbindungen.

Tabelle 1 enthält für die verschiedenen Verbindungen die mittlere Höchstlast pro Scherfuge und Stabdübel  $F_{v,\text{test}}$  aus jedem Versuch, die Rohdichte  $\rho_{12}$  des Brettschichtholzes, die Zugfestigkeit  $f_u$  des Stahls sowie den Hirnholzabstand  $a_{3,t}d$  und die Anzahl  $n$  der in Kraft- und Faserrichtung hintereinander liegenden Stabdübel. Aus der Geometrie der Verbindung, der Lochleibungsfestigkeit und der Zugfestigkeit des Stahls wurden Erwartungswert  $F_{v,\text{exp}}$  und charakteristischer Wert  $F_{v,\text{Rk}}$  der Tragfähigkeit nach Eurocode 5 berechnet (siehe Abschnitt 3) und für jeden Versuch mit der Versuchshöchstlast verglichen.

Das Tragverhalten der Verbindungen kann als duktil bezeichnet werden, die Verschiebungen beim Bruch betragen in der Regel zwischen 7 und 10 mm, die nach EN 26891 vorgesehene Höchstverschiebung von 15 mm wurde in den meisten Fällen allerdings nicht erreicht. Das Tragverhalten war entweder durch Erreichen der Lochleibungsfestigkeit in den Seiten- und Mittelhölzern zusammen mit einer plasti-

schen Verformung der Stabdübel oder durch Aufspalten oder Abscheren des Holzes gekennzeichnet. In den beiden Seitenhölzern wurde ein Fließgelenk pro Scherfuge (Versagensmechanismus 2 nach Johansen), in den Mittelhölzern zwei Fließgelenke pro Scherfuge (Versagensmechanismus 3 nach Johansen) beobachtet.

**Tabelle 1:** Tragfähigkeit pro Stabdübel und Scherfuge der BSB-Verbindungen

Versuch	n	$F_{v,test}$ [kN]	$\rho_{12}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$f_u$ [MPa]	$F_{v,exp}$ [kN]	$F_{v,test}/$ $F_{v,exp}$	$\rho_k$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$f_{u,k}$ [MPa]	$F_{v,Rk}$ [kN]	$F_{v,test}/$ $F_{v,Rk}$	$\alpha_{3,t/d}$
1L-A-1	1	4,63	409	640	4,56	1,01	380	570	4,17	1,11	6,35
1L-A-2	1	4,74	411	640	4,58	1,04	380	570	4,17	1,14	6,35
1L-A-3	1	4,70	410	640	4,57	1,03	380	570	4,17	1,13	6,35
1L-A-4	1	4,81	400	640	4,51	1,07	380	570	4,17	1,15	6,35
1L-A-5	1	4,87	405	640	4,54	1,07	380	570	4,17	1,17	6,35
1S-A-1	1	5,15	487	640	5,06	1,02	450	570	4,60	1,12	6,35
1S-A-2	1	5,19	472	640	4,96	1,05	450	570	4,60	1,13	6,35
1S-A-3	1	5,44	467	640	4,93	1,10	450	570	4,60	1,18	6,35
1S-A-4	1	5,69	493	640	5,09	1,12	450	570	4,60	1,24	6,35
1S-A-5	1	5,52	465	640	4,92	1,12	450	570	4,60	1,20	6,35
1L-H-1	1	5,22	395	640	4,47	1,17	380	570	4,17	1,25	6,35
1L-H-2	1	4,59	395	640	4,47	1,03	380	570	4,17	1,10	6,35
1L-H-3	1	5,15	415	640	4,60	1,12	380	570	4,17	1,24	6,35
1L-H-4	1	4,56	413	640	4,59	0,99	380	570	4,17	1,09	6,35
1L-H-5	1	4,87	398	640	4,49	1,08	380	570	4,17	1,17	6,35
2L-A-3	2	4,00	410	640	3,57	1,12	380	570	3,25	1,23	6,35
2L-A-4	2	4,10	405	640	3,54	1,16	380	570	3,25	1,26	6,35
2L-A-5	2	4,00	409	640	3,56	1,12	380	570	3,25	1,23	6,35
2L-A-6	2	4,04	401	640	3,52	1,15	380	570	3,25	1,24	6,35
2L-A-7	2	4,02	410	640	3,57	1,13	380	570	3,25	1,24	6,35
2S-A-1	2	4,41	489	640	3,95	1,12	450	570	3,59	1,23	6,35
2S-A-2	2	4,56	476	640	3,89	1,17	450	570	3,59	1,27	6,35
2S-A-3	2	4,76	472	640	3,87	1,23	450	570	3,59	1,33	6,35
2S-A-4	2	4,58	493	640	3,97	1,15	450	570	3,59	1,28	6,35
2S-A-5	2	4,41	469	640	3,86	1,14	450	570	3,59	1,23	6,35
3L-A-3	3	3,78	416	640	3,45	1,09	380	570	3,12	1,21	6,35
3L-A-4	3	3,85	416	640	3,45	1,12	380	570	3,12	1,23	6,35
3L-A-5	3	3,86	409	640	3,42	1,13	380	570	3,12	1,24	6,35
3L-A-6	3	3,53	408	640	3,41	1,03	380	570	3,12	1,13	6,35
3L-A-7	3	3,51	415	640	3,45	1,02	380	570	3,12	1,12	6,35
3S-A-1	3	3,96	479	640	3,75	1,06	450	570	3,45	1,15	6,35
3S-A-2	3	4,03	471	640	3,71	1,09	450	570	3,45	1,17	6,35
3S-A-4	3	3,93	485	640	3,78	1,04	450	570	3,45	1,14	6,35
3S-A-5	3	4,44	488	640	3,79	1,17	450	570	3,45	1,29	6,35
3S-A-6	3	3,25	476	640	3,74	0,87	450	570	3,45	0,94	6,35
3S-A-1a	3	4,21	482	640	3,76	1,12	450	570	3,45	1,22	6,35
3S-A-2a	3	4,46	478	640	3,75	1,19	450	570	3,45	1,29	6,35
3S-A-3a	3	4,56	478	640	3,75	1,22	450	570	3,45	1,32	6,35
3S-A-4a	3	4,74	483	640	3,77	1,26	450	570	3,45	1,37	6,35
3S-A-5a	3	4,54	483	640	3,77	1,20	450	570	3,45	1,32	6,35
3L-B-1	3	4,31	405	640	3,40	1,27	380	570	3,12	1,38	12,7
3L-B-2	3	4,58	405	640	3,40	1,35	380	570	3,12	1,47	12,7
3L-B-3	3	4,18	413	640	3,44	1,22	380	570	3,12	1,34	12,7
3L-B-4	3	3,93	402	640	3,38	1,16	380	570	3,12	1,26	12,7
3L-B-5	3	4,36	409	640	3,42	1,28	380	570	3,12	1,40	12,7
3S-B-1	3	4,85	486	640	3,78	1,28	450	570	3,45	1,41	12,7
3S-B-2	3	4,49	484	640	3,77	1,19	450	570	3,45	1,30	12,7
3S-B-3	3	4,14	474	640	3,73	1,11	450	570	3,45	1,20	12,7
3S-B-4	3	4,29	482	640	3,76	1,14	450	570	3,45	1,24	12,7
3S-B-5	3	4,79	476	640	3,74	1,28	450	570	3,45	1,39	12,7

Versuch	n	F <sub>v,test</sub> [kN]	ρ <sub>12</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	f <sub>u</sub> [MPa]	F <sub>v,exp</sub> [kN]	F <sub>v,test</sub> / F <sub>v,exp</sub>	ρ <sub>k</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	f <sub>u,k</sub> [MPa]	F <sub>v,Rk</sub> [kN]	F <sub>v,test</sub> / F <sub>v,Rk</sub>	α <sub>3,t/d</sub>
4L-A-1	4	3,04	400	640	3,28	0,93	380	570	3,03	1,00	6,35
4L-A-2	4	3,29	410	640	3,33	0,99	380	570	3,03	1,08	6,35
4L-A-3	4	4,25	404	640	3,30	1,29	380	570	3,03	1,40	6,35
4L-A-4	4	3,92	407	640	3,31	1,18	380	570	3,03	1,29	6,35
4L-A-5	4	3,94	407	640	3,31	1,19	380	570	3,03	1,30	6,35
4S-A-1	4	4,43	479	640	3,64	1,22	450	570	3,35	1,32	6,35
4S-A-2	4	4,30	475	640	3,63	1,19	450	570	3,35	1,28	6,35
4S-A-3	4	4,82	477	640	3,64	1,33	450	570	3,35	1,44	6,35
4S-A-4	4	4,42	488	640	3,68	1,20	450	570	3,35	1,32	6,35
4S-A-5	4	4,43	479	640	3,64	1,22	450	570	3,35	1,32	6,35
6L-A-1	6	3,53	408	640	3,19	1,11	380	570	2,91	1,21	6,35
6L-A-2	6	4,22	406	640	3,18	1,33	380	570	2,91	1,45	6,35
6L-A-3	6	3,35	410	640	3,19	1,05	380	570	2,91	1,15	6,35
6L-A-4	6	3,26	408	640	3,19	1,02	380	570	2,91	1,12	6,35
6L-A-5	6	3,97	402	640	3,16	1,26	380	570	2,91	1,36	6,35
6L-S-1	6	4,06	474	640	3,48	1,17	450	570	3,22	1,26	6,35
6L-S-2	6	4,21	483	640	3,52	1,20	450	570	3,22	1,31	6,35
6L-S-3	6	4,28	485	640	3,53	1,21	450	570	3,22	1,33	6,35
6L-S-4	6	4,27	472	640	3,47	1,23	450	570	3,22	1,33	6,35
6L-S-5	6	3,96	484	640	3,52	1,12	450	570	3,22	1,23	6,35
3U-P-1	3	3,19	398	392	2,76	1,16	380	570	2,58	1,24	6,35
3U-P-2	3	3,75	413	392	2,82	1,33	380	570	2,58	1,45	6,35
3U-P-3	3	3,25	432	392	2,90	1,12	380	570	2,58	1,26	6,35
3U-P-4	3	3,44	420	392	2,85	1,21	380	570	2,58	1,33	6,35
3U-P-5	3	3,79	427	392	2,88	1,32	380	570	2,58	1,47	6,35
3U-P-6	3	3,60	401	392	2,77	1,30	380	570	2,58	1,39	6,35
3U-S-1	3	3,20	409	392	2,81	1,14	380	570	2,58	1,24	6,35
3U-S-2	3	3,44	427	392	2,88	1,19	380	570	2,58	1,33	6,35
3U-S-3	3	3,48	426	392	2,88	1,21	380	570	2,58	1,35	6,35
3U-S-4	3	2,85	405	392	2,79	1,02	380	570	2,58	1,10	6,35
3U-S-5	3	3,33	419	392	2,85	1,17	380	570	2,58	1,29	6,35
3U-S-6	3	3,01	426	392	2,88	1,05	380	570	2,58	1,17	6,35
3P-A-1	3	4,59	476	640	3,74	1,23	450	570	3,45	1,33	6,35
3P-A-2	3	4,19	458	640	3,65	1,15	450	570	3,45	1,22	6,35
3P-A-3	3	3,72	470	640	3,71	1,00	450	570	3,45	1,08	6,35
3P-A-4	3	3,95	467	640	3,70	1,07	450	570	3,45	1,15	6,35
3P-A-5	3	4,40	483	640	3,77	1,17	450	570	3,45	1,28	6,35
3P-B-1	3	4,46	494	640	3,82	1,17	450	570	3,45	1,29	12,7
3P-B-2	3	4,14	463	640	3,68	1,13	450	570	3,45	1,20	12,7
3P-B-3	3	4,55	498	640	3,84	1,19	450	570	3,45	1,32	12,7
3P-B-4	3	4,69	476	640	3,74	1,26	450	570	3,45	1,36	12,7
3P-B-5	3	4,23	464	640	3,68	1,15	450	570	3,45	1,23	12,7
3P-C-1	3	4,30	493	640	4,03	1,07	450	570	3,65	1,18	7,94
3P-C-2	3	4,50	470	640	3,92	1,15	450	570	3,65	1,23	7,94
3P-C-3	3	3,75	475	640	3,95	0,95	450	570	3,65	1,03	7,94
3P-C-4	3	4,48	471	640	3,93	1,14	450	570	3,65	1,23	7,94
3P-C-5	3	4,11	487	640	4,01	1,03	450	570	3,65	1,13	7,94
3P-C-6	3	4,36	493	640	4,03	1,08	450	570	3,65	1,20	7,94
3P-C-7	3	4,59	497	640	4,05	1,13	450	570	3,65	1,26	7,94
6P-A-1	6	4,43	474	640	3,48	1,27	450	570	3,22	1,38	6,35
6P-A-2	6	4,24	475	640	3,48	1,22	450	570	3,22	1,32	6,35
6P-A-3	6	4,19	502	640	3,60	1,16	450	570	3,22	1,30	6,35
6P-A-4	6	4,44	476	640	3,49	1,27	450	570	3,22	1,38	6,35
D01.1 k1	2	4,51	437	598	3,66	1,23	380	355	3,31	1,36	6,83
D01.1 k2	2	4,69	410	598	3,53	1,33	380	355	3,31	1,42	6,83
D01.1 k3	2	4,83	434	598	3,65	1,32	380	355	3,31	1,46	6,83
D01.1 k4	2	3,91	445	598	3,70	1,05	380	355	3,31	1,18	6,83
D01.1 k5	2	4,38	460	598	3,78	1,16	380	355	3,31	1,32	6,83

Versuch	n	F <sub>v,test</sub> [kN]	ρ <sub>12</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	f <sub>u</sub> [MPa]	F <sub>v,exp</sub> [kN]	F <sub>v,test</sub> / F <sub>v,exp</sub>	ρ <sub>k</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	f <sub>u,k</sub> [MPa]	F <sub>v,Rk</sub> [kN]	F <sub>v,test</sub> / F <sub>v,Rk</sub>	α <sub>3,t/d</sub>
D02.1 k1	3	4,02	451	598	3,58	1,12	380	355	3,18	1,26	6,83
D02.1 k2	3	3,52	458	598	3,62	0,97	380	355	3,18	1,11	6,83
D02.1 k3	3	3,67	440	598	3,53	1,04	380	355	3,18	1,16	6,83
D02.1 k4	3	4,12	443	598	3,55	1,16	380	355	3,18	1,30	6,83
D02.1 k5	3	4,01	438	598	3,52	1,14	380	355	3,18	1,26	6,83
D03.1 k1	3	4,20	461	598	3,63	1,16	380	355	3,18	1,32	6,83
D03.1 k2	3	4,07	441	598	3,54	1,15	380	355	3,18	1,28	6,83
D03.1 k3	3	4,44	461	598	3,63	1,22	380	355	3,18	1,40	6,83
D03.1 k4	3	4,35	460	598	3,63	1,20	380	355	3,18	1,37	6,83
D03.1 k5	3	4,26	456	598	3,61	1,18	380	355	3,18	1,34	6,83
D01.2 k1	2	5,10	484	598	4,10	1,24	450	355	3,86	1,32	13,2
D01.2 k2	2	5,41	486	598	4,11	1,32	450	355	3,86	1,40	13,2
D01.2 k3	2	5,26	488	598	4,12	1,28	450	355	3,86	1,36	13,2
D01.2 k4	2	5,65	477	598	4,07	1,39	450	355	3,86	1,46	13,2
D01.2 k5	2	5,34	486	598	4,11	1,30	450	355	3,86	1,38	13,2
3B-60P-1	3	3,89	381	640	3,28	1,19	380	570	3,12	1,25	6,35
3B-60P-2	3	4,44	474	640	3,73	1,19	450	570	3,45	1,29	6,35
3B-60P-3	3	4,41	465	640	3,69	1,20	450	570	3,45	1,28	6,35
3B-67P-1	3	4,02	468	640	3,58	1,12	450	570	3,33	1,21	6,35
3B-67P-2	3	3,56	451	640	3,51	1,02	450	570	3,33	1,07	6,35
3B-67P-3	3	4,64	460	640	3,55	1,31	450	570	3,33	1,39	6,35
3B-67P-4	3	3,94	399	640	3,27	1,20	380	570	3,03	1,30	6,35
3B-67P-5	3	3,86	389	640	3,23	1,20	380	570	3,03	1,27	6,35
3B-67P-6	3	3,81	333	640	2,96	1,29	380	570	3,03	1,26	6,35
3B-67S-1	3	4,38	454	640	3,52	1,24	380	570	3,03	1,45	6,35
3B-67S-2	3	4,14	431	640	3,42	1,21	380	570	3,03	1,37	6,35
3B-67S-3	3	3,70	430	640	3,41	1,08	380	570	3,03	1,22	6,35
3B-67S-4	3	3,89	417	640	3,36	1,16	380	570	3,03	1,28	6,35
3B-67S-5	3	3,81	416	640	3,35	1,14	380	570	3,03	1,26	6,35
3B-67S-6	3	3,62	394	640	3,25	1,11	380	570	3,03	1,20	6,35
3B-67P-D	3	3,78	423	640	3,38	1,12	380	570	3,03	1,25	6,35
3B-67P-E	3	3,18	427	640	3,40	0,93	380	570	3,03	1,05	6,35
3B-67P-F	3	3,48	352	640	3,05	1,14	380	570	3,03	1,15	6,35
3B-67P-G	3	3,95	422	640	3,38	1,17	380	570	3,03	1,30	6,35
3B-67P-H	3	3,70	427	640	3,40	1,09	380	570	3,03	1,22	6,35
3B-67P-I	3	4,01	428	640	3,41	1,18	380	570	3,03	1,33	6,35
3R-020-1	3	3,60	434	640	3,43	1,05	380	570	3,03	1,19	3,17
3R-020-2	3	3,78	428	640	3,41	1,11	380	570	3,03	1,25	3,17
3R-040-1	3	3,73	421	640	3,37	1,11	380	570	3,03	1,23	6,35
3R-040-2	3	3,62	399	640	3,27	1,11	380	570	3,03	1,20	6,35
3R-040-3	3	3,14	394	640	3,25	0,96	380	570	3,03	1,04	6,35
3R-040-4	3	3,33	369	640	3,14	1,06	380	570	3,03	1,10	6,35
3R-060-1	3	3,78	438	640	3,45	1,10	380	570	3,03	1,25	9,52
3R-060-2	3	3,94	433	640	3,43	1,15	380	570	3,03	1,30	9,52
3R-080-1	3	3,55	404	640	3,30	1,08	380	570	3,03	1,17	12,7
3R-080-2	3	3,73	412	640	3,33	1,12	380	570	3,03	1,23	12,7
3R-100-1	3	3,49	392	640	3,24	1,08	380	570	3,03	1,15	15,9
3R-100-2	3	3,75	393	640	3,25	1,16	380	570	3,03	1,24	15,9
3R-120-1	3	3,53	398	640	3,27	1,08	380	570	3,03	1,17	19,0
3R-120-2	3	3,50	388	640	3,22	1,09	380	570	3,03	1,16	19,0
3R-020-A	3	4,50	545	640	3,91	1,15	450	570	3,33	1,35	3,17
3R-020-B	3	4,72	562	640	3,98	1,19	450	570	3,33	1,42	3,17
3R-040-A	3	4,28	488	640	3,67	1,17	450	570	3,33	1,29	6,35
3R-040-B	3	5,01	578	640	4,04	1,24	450	570	3,33	1,50	19,0
3R-040-C	3	4,19	505	640	3,74	1,12	450	570	3,33	1,26	19,0
3R-040-D	3	4,36	489	640	3,67	1,19	450	570	3,33	1,31	19,0
3R-060-A	3	4,76	549	640	3,92	1,21	450	570	3,33	1,43	9,52
3R-060-B	3	5,08	539	640	3,88	1,31	450	570	3,33	1,53	9,52

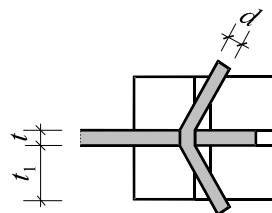
Versuch	n	F <sub>v,test</sub> [kN]	ρ <sub>12</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	f <sub>u</sub> [MPa]	F <sub>v,exp</sub> [kN]	F <sub>v,test</sub> / F <sub>v,exp</sub>	ρ <sub>k</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	f <sub>u,k</sub> [MPa]	F <sub>v,Rk</sub> [kN]	F <sub>v,test</sub> / F <sub>v,Rk</sub>	α <sub>3,t/d</sub>
3R-080-A	3	4,37	515	640	3,78	1,16	450	570	3,33	1,31	12,7
3R-080-B	3	4,57	484	640	3,65	1,25	450	570	3,33	1,37	12,7
3R-100-A	3	4,85	537	640	3,87	1,25	450	570	3,33	1,45	15,9
3R-100-B	3	4,86	515	640	3,78	1,28	450	570	3,33	1,46	15,9
3R-120-A	3	4,54	512	640	3,77	1,20	450	570	3,33	1,36	19,0
3R-120-B	3	4,80	506	640	3,74	1,28	450	570	3,33	1,44	19,0
4R-040-1	4	3,32	399	640	3,18	1,04	380	570	2,94	1,13	6,35
4R-040-2	4	2,94	408	640	3,22	0,91	380	570	2,94	1,00	6,35
4R-080-1	4	3,49	388	640	3,14	1,11	380	570	2,94	1,19	12,7
4R-080-2	4	3,38	403	640	3,22	1,05	380	570	2,94	1,15	12,7
4R-040-A	4	4,21	496	640	3,65	1,16	450	570	3,24	1,30	12,7
4R-040-B	4	4,29	503	640	3,70	1,16	450	570	3,24	1,33	12,7
4R-080-A	4	4,40	530	640	3,83	1,15	450	570	3,24	1,36	12,7
4R-080-B	4	4,25	510	640	3,76	1,13	450	570	3,24	1,31	12,7

Der Mittelwert der Rohdichte derjenigen Prüfkörper, für die eine charakteristische Rohdichte von 380 kg/m<sup>3</sup> angenommen wurde, beträgt 414 kg/m<sup>3</sup>, das 5%-Quantil unter Annahme einer Normalverteilung beträgt 378 kg/m<sup>3</sup>. Die entsprechenden Werte der Prüfkörper mit höheren Rohdichten (charakteristische Rohdichte von 450 kg/m<sup>3</sup>) betragen 487 kg/m<sup>3</sup> und 450 kg/m<sup>3</sup>.

### 3 Rechenmodell

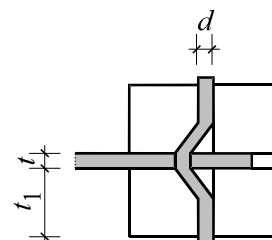
Als Rechenmodell zur Bestimmung der Tragfähigkeit von BSB-Verbindungen wird EN 1995-1-1:2004-08 (Eurocode 5) herangezogen. Gleichung (8.11) in Abschnitt 8.2.3 enthält die charakteristischen Werte der Tragfähigkeit von Stahlblech-Holz-Verbindungen mit innen liegenden Stahlblechen. Mit den Parametern aus den Versuchen ist für die Tragfähigkeit in den Mittelhölzern stets Versagensmechanismus (h), in den beiden Seitenhölzern entweder Versagensmechanismus (g) oder (h) maßgebend.

$$F_{v,Rk} = f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d \cdot \left[ \sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - 1 \right]$$



(8.11) (g)

$$F_{v,Rk} = 2,3 \cdot \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d}$$



(8.11) (h)

Der Einfluss der Anzahl in Kraft- und Faserrichtung hintereinander angeordneter Stabdübel wird mit Gleichung (8.34) des Eurocode 5 berücksichtigt:

$$n_{ef} = \min \left\{ n; n^{0,9} \cdot \sqrt[4]{\frac{\alpha_1}{13 \cdot d}} \right\}$$

(8.34)

Werden die in Tabelle 1 angegebenen Versuchsergebnisse  $F_{V,test}$  mit dem angegebenen Rechenmodell überprüft, folgen die angegebenen, mittleren rechnerischen Werte der Tragfähigkeit pro Stabdübel und Scherfuge. Diese mittleren Werte der Tragfähigkeit wurden für die sechsschnittig beanspruchten Stabdübel als Summe der Tragfähigkeit der zwei Scherfugen im Seitenholz und der vier Scherfugen im Mittelholz berechnet.

Die Fließmomente  $M_y$  wurden nach Gleichung (8.30) mit der Zugfestigkeit  $f_u$  bzw.  $f_{u,k}$  der Stabdübel berechnet, die Lochleibungsfestigkeit nach Gleichung (8.32) mit der Rohdichte  $\rho_u$  bzw.  $\rho_k$  der Prüfkörper. Für die hochfesten Stabdübel wurde ebenfalls eine Zugfestigkeit von  $640 \text{ N/mm}^2$  zugrunde gelegt.

Der Mittelwert des Verhältnisses  $F_{V,test}/F_{V,exp}$  beträgt 1,15. Damit führt das vorgeschlagene Rechenmodell zu einer konservativen Vorhersage der mittleren Tragfähigkeitswerte in den Versuchen.

Wird der charakteristische Wert der Tragfähigkeit  $F_{V,Rk,CdI}$  mit den charakteristischen Werten des Fließmoments  $M_{y,Rk}$  mit  $f_{u,k} = 570 \text{ N/mm}^2$  (Mindestwert nach Zulassung Nr. Z-9.1-208 „BSB-Verbindung von Brettschichtholz mit innenliegenden Stahlblechen durch Stahlstifte“) bzw.  $355 \text{ N/mm}^2$  für ausgeglühte Stabdübel und dem charakteristischen Wert der Rohdichte  $\rho_k = 380 \text{ kg/m}^3$  bzw.  $450 \text{ kg/m}^3$  aus den Versuchen berechnet und mit dem Verhältniswert  $n_{ef}/n$  modifiziert, beträgt der Verhältniswert  $F_{V,test}/F_{V,exp}$  für die 180 Versuche zwischen 0,943 und 1,52 mit einem Mittelwert von 1,26 und einem charakteristischen Wert nach EN 14358 von 1,08 und führt damit zu charakteristischen Werten, die konservativ durch die Versuchsergebnisse bestätigt werden. Da die überwiegende Anzahl der Prüfkörper (128 von 180) mit einem Abstand vom beanspruchten Hirnholzende von weniger als 45 mm hergestellt und geprüft wurden, bestehen gegen die Ausführung der Verbindung mit einem Mindestwert des beanspruchten Hirnholzendes von 45 mm keine Bedenken.

Werden die Stabdübel im sogenannten BSB Kreisdübelbild angeordnet, weisen zweimal zwei Stabdübel einen Abstand untereinander in Faserrichtung  $a_1 = 30 \text{ mm}$  auf. Dieser Wert ist nur unwesentlich kleiner als der nach Eurocode 5 erforderliche Abstand  $a_1 = 5d = 31,5 \text{ mm}$ . Da die übrigen Stabdübel im Kreisdübelbild größere Abstände  $a_1$  als  $5d$  aufweisen, werden die formal zu geringen Abstände der vier Stabdübel damit kompensiert und es bestehen keine Bedenken gegen eine weitere Verwendung des BSB Kreisdübelbilds auch bei einer Bemessung der Verbindung nach Eurocode 5.

#### 4 Beurteilung der Duktilität der BSB-Verbindung im Lastfall Erdbeben

Für den Nachweis von Tragwerken im Lastfall Erdbeben gilt in Deutschland die DIN 4149 „Bauten in deutschen Erdbebengebieten - Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten“. Diese Norm wird in absehbarer Zeit durch EN 1998 „Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten; Deutsche Fassung EN 1998-1:2004 + AC:2009“ zusammen mit dem deutschen Nationalen Anhang „Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbau“ ersetzt werden. Aus diesem Grund wird in dieser Gutachtlichen

Stellungnahme die Einteilung von Fachwerkstrukturen mit BSB-Verbindungen in Duktilitätsklassen nach beiden Regelwerken beurteilt.

Die in der Bemessung vorwiegend zu berücksichtigende Erdebeneinwirkung ist die horizontale Erdebeneinwirkung, die Beanspruchungen der aussteifenden Bauteile eines Tragwerks bewirkt. Energiedissipation findet vorwiegend in den aussteifenden Bauteilen wie Wandscheiben oder Rahmenecken statt, Dach- oder Deckenscheiben werden in der Regel als starr angenommen und dienen im Erdbebenfall der Verteilung der Erdebeneinwirkungen auf die aussteifenden Bauteile.

Bauteile mit BSB-Verbindungen können daher nur in denjenigen Fällen signifikant zur Energiedissipation im Lastfall Erdbeben beitragen, wenn sie Teil der Aussteifungskonstruktion eines Gebäudes sind, z.B. als fachwerkartiger Rahmenriegel. Fachwerkträger aus BS-Holz mit BSB-Verbindungen, die gelenkig z.B. auf eingespannten Stützen gelagert sind, werden kaum zur Energiedissipation beitragen können. Eine allgemeine Aussage zum Verhaltensbeiwert  $q$  für Tragwerke mit BSB-Verbindungen ist daher nicht möglich, entscheidend ist die Tatsache, ob die aussteifenden Bauteile des betrachteten Tragwerks BSB-Verbindungen enthalten und diese sich unter Erdebeneinwirkung duktil verhalten. Hallentragwerke mit eingespannten Beton- oder Stahlstützen und gelenkig aufgelegten Fachwerkträgern mit BSB-Verbindungen werden daher nach den besonderen Regeln für Beton- oder Stahlbauten in eine Duktilitätsklasse eingestuft.

DIN 4149 enthält für Holzbauten in deutschen Erdbebengebieten drei Duktilitätsklassen 1 bis 3, denen entsprechende Verhaltensbeiwerte  $q$  zwischen  $q = 1,5$  und  $q = 4,0$  zugeordnet sind.

Der Duktilitätsklasse 3 dürfen Tragwerke zugeordnet werden, die viele dissipative Bereiche mit stiftförmigen Verbindungsmitteln besitzen. Dazu zählen Rahmen und Stützen-Binder-Tragwerke mit Stabdübelverbindungen zwischen allen Bauteilen, d.h. Stiele und Riegel bestehen aus BS-Holz mit BSB-Verbindungen. DIN 4149 gibt den Verhaltensbeiwert in diesem Fall zu  $q = 4,0$  an.

Der Duktilitätsklasse 2 dürfen Tragwerke zugeordnet werden, bei denen sich die Duktilitätsanforderungen auf wenige aber wirksame dissipative Bereiche mit stiftförmigen Verbindungsmitteln beschränken. Dazu zählen Stützen-Binder-Tragwerke mit nachgiebig eingespannten Stützenfüßen und Zwei- und Dreigelenkrahmen mit Dübelverbindungen in den Rahmenecken. Hierunter fallen eingespannte Fachwerkstiele mit BSB-Verbindungen oder Zwei- und Dreigelenkrahmen mit biegesteifen Rahmenecken und Stielen oder Riegeln aus Fachwerken mit BSB-Verbindungen. DIN 4149 gibt den Verhaltensbeiwert in diesem Fall zu  $q = 2,5$  an.

Eine Einteilung in die Duktilitätsklasse 2 oder 3 nach DIN 4149 ist nur möglich, wenn in sämtlichen Scherfugen der BSB-Verbindung der Versagensmechanismus mit zwei Fließgelenken pro Scherfuge maßgebend wird.

Eurocode 8 enthält für Holzbauten drei Duktilitätsklassen L bis H, denen entsprechende Verhaltensbeiwerte  $q$  zwischen  $q = 1,5$  und  $q = 5,0$  zugeordnet sind.

Wird das Auslegungskonzept „dissipatives Tragwerksverhalten“ für die Aufnahme von Erdbebenlasten gewählt, so ist zwischen den Duktilitätsklassen H und M zu unterscheiden.



Der Duktilitätsklasse H dürfen Tragwerke zugeordnet werden, die dissipative Bereiche mit stiftförmigen Verbindungsmitteln besitzen. Dazu zählen statisch überbestimmte Rahmen, d.h. Stiele und Riegel bestehen aus BS-Holz mit BSB-Verbindungen. Eurocode 8 gibt den Verhaltensbeiwert in diesem Fall zu  $q = 4,0$  an.

Der Duktilitätsklasse M dürfen Tragwerke zugeordnet werden, bei denen sich die Duktilitätsanforderungen auf wenige aber wirksame dissipative Bereiche mit stiftförmigen Verbindungsmitteln beschränken. Dazu zählen ebenfalls statisch überbestimmte Rahmen wie Stützen-Binder-Tragwerke mit nachgiebig eingespannten Stützenfüßen und Zwei- und Dreigelenkrahmen mit Dübelverbindungen in den Rahmenecken. Hierunter fallen eingespannte Fachwerkstiele mit BSB-Verbindungen oder Zwei- und Dreigelenkrahmen mit biegesteifen Rahmenecken und Stielen oder Riegeln aus Fachwerken mit BSB-Verbindungen. Eurocode 8 gibt den Verhaltensbeiwert in diesem Fall zu  $q = 2,5$  an.

Eine Einteilung in die Duktilitätsklasse M oder H nach Eurocode 8 ist nur möglich, wenn in sämtlichen Scherfugen der BSB-Verbindung der Versagensmechanismus mit zwei Fließgelenken pro Scherfuge maßgebend wird. Dies wird über die Mindestschlankheit 8 der Stabdübel nachgewiesen, d.h. die Mindestholzdicke der Mittel- und Seitenhölzer beträgt 51 mm.

Um die Anwendbarkeit der im Auslegungskonzept „dissipatives Tragwerksverhalten“ formulierten Verhaltensbeiwerte sicher zu stellen, werden in Eurocode 8 weitere Anforderungen gestellt. So müssen die dissipativen Bereiche in der Lage sein, plastische Verformungen in zyklischer Wechselbeanspruchung aufzunehmen und dabei bestimmte Zähigkeitsverhältnisse zu erreichen.

Da zyklische Versuche für die BSB-Bauweise nicht vorliegen, wird im Rahmen dieses Gutachtens empfohlen, die Bauweise maximal in die Duktilitätsklasse M nach Eurocode 8 einzustufen. Da die Anforderungen an die dissipativen Bereiche in Eurocode 8 gegenüber der DIN 4149 genauer formuliert sind, wird empfohlen, die Bauweise maximal in Duktilitätsklasse 2 nach DIN 4149 einzustufen.

## **5 Nachweise für BSB-Verbindungen**

### **5.1 Lochleibungsfestigkeit**

Die Lochleibungsfestigkeit des Brettschichtholzes ist bei Stabdübelverbindungen nach Eurocode 5 (im Gegensatz zu DIN 1052) auch für Durchmesser  $d \leq 8$  mm vom Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung abhängig. Gleichung (8.31) des Eurocode 5 enthält den Einfluss des Kraft-Faser-Winkels auf die Lochleibungsfestigkeit. Im Gegensatz dazu darf die Lochleibungsfestigkeit für Nägel in vorgebohrten Löchern bei Durchmessern bis zu 8 mm nach Eurocode 5 unabhängig vom Kraft-Faser-Winkel angenommen werden (Gleichung (8.16) des Eurocode 5). BSB-Verbindungen werden einheitlich mit Stabdübeln des Durchmessers 6,3 mm hergestellt. Es bestehen daher im Hinblick auf die Regeln des Eurocode 5 für Nagelverbindungen keine Bedenken, auch für Stabdübel bis zu einem Durchmesser von 8 mm den Wert  $k_{90}$  nach Gleichung (8.33) grundsätzlich zu  $k_{90} = 1$  anzunehmen.

## 5.2 Zugtragfähigkeit im Nettoquerschnitt

Nach Eurocode 5 Abschnitt 6.1.2 ist die Zugtragfähigkeit im Nettoquerschnitt eines Zugstabs nachzuweisen. In mehrschnittigen Stabdübelverbindungen wie BSB-Verbindungen kann die Tragfähigkeit pro Scherfuge in den inneren Scherfugen von derjenigen in den äußeren Scherfugen abweichen. Darüber hinaus ist nicht gewährleistet, dass das Verhältnis der Querschnittsflächen in den Mittel- und Seitenhölzern dem Verhältnis der über die Stabdübel eingeleiteten Kräfte entspricht. Daher stellt sich die Frage, ob ein Nachweis der Zugtragfähigkeit im Nettoquerschnitt mit der gesamten Zugkraft und der gesamten Nettoquerschnittsfläche geführt werden darf. Dieser vereinfachte Nachweis entspricht einem Nachweis mit der mittleren Zugspannung im Nettoquerschnitt.

Neuere Forschungsergebnisse (Blaß, Hans Joachim und Enders-Comberg, Markus: Fachwerkträger für den industriellen Holzbau, Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau / Karlsruher Institut für Technologie, Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen; Band 22, ISSN: 1860-093X) haben gezeigt, dass der Einfluss einer Querschnittsschwächung auf die Zugtragfähigkeit eines Zugstabes aus BS-Holz signifikant geringer ist als das Verhältnis von Querschnittsschwächung zu Bruttoquerschnitt. Werden die Biegebeanspruchungen in den Seitenhölzern der zugbeanspruchten BS-Holzstäbe genauer nachgewiesen (siehe 5.3), bestehen daher keine Bedenken, den Nachweis der Zugtragfähigkeit im Nettoquerschnitt vereinfacht mit der gesamten Zugkraft und der gesamten Nettoquerschnittsfläche zu führen.

## 5.3 Zusatzmomente in den Seitenhölzern

In den Seitenhölzern der BSB-Verbindung entstehen durch die ausmittige Lasteinleitung der Stabdübel Biegemomente. Nach dem nationalen Anhang zum Eurocode 5 dürfen diese Biegemomente durch eine Abminderung der Zugfestigkeit im Nettoquerschnitt um 60 % berücksichtigt werden. Ein genauere Nachweis mit kombinierten Biege- und Zugspannungen ist jedoch ebenfalls möglich. Die Größe des Biegemoments hängt ab vom Versagensmechanismus der Stabdübel. Beim reinen Lochleibungsversagen ohne Fließgelenk im Seitenholz entsteht kein Zusatzmoment, ein Nachweis der Zugtragfähigkeit im Nettoquerschnitt des Seitenholzes ist ausreichend.

Für den Versagensmechanismus mit einem oder zwei Fließgelenken pro Scherfuge beträgt das Zusatzmoment im Seitenholz:

$$M_{Rd,SH} = n_{ef} \cdot n_R \cdot \left( \frac{F_{v,Rd} \cdot t_1}{2} - M_{y,d} \right) \text{ in Nmm}$$

Der Nachweis nach Abschnitt 6.2.3 des Eurocode 5 für auf Biegung und Zug beanspruchte Seitenhölzer muss erfüllt sein.

$$\frac{n_{ef} \cdot n_R \cdot F_{v,Rd}}{A_{net} \cdot f_{t,0,d}} + \frac{M_{Rd,SH}}{W_{net} \cdot f_{m,d}} \leq 1$$

Hierin bedeuten:

- $n_{ef}$  Wirksame Anzahl der Stabdübel in der BSB-Verbindung in einer Stabdübelreihe nach Gleichung (8.34) des Eurocode 5
- $n_R$  Anzahl der Stabdübelreihen in der BSB-Verbindung

$t_1$	Seitenholzdicke in mm
$F_{v,Rd}$	Bemessungswert der Tragfähigkeit des Stabdübels in der Scherfuge im Seitenholz in N
$M_{y,d}$	Bemessungswert des Fließmoments des Stabdübels in Nmm
$A_{net}$	Nettoquerschnittsfläche des Seitenholzes in mm <sup>2</sup>
$W_{net}$	Nettowiderstandsmoment des Seitenholzes in mm <sup>3</sup>

## 6 Zusammenfassung

BSB-Verbindungen von Brettschichtholz mit innen liegenden Stahlblechen waren mit Bescheid des DIBt vom 29. März 1999 unter der Nummer Z-9.1-208 bis zum 31. März 2004 allgemein bauaufsichtlich zugelassen. Mit der Einführung der DIN 1052:2004-08 war eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung nicht mehr erforderlich, da die BSB-Verbindung mit den Regeln der DIN 1052-2004-08 bemessen werden konnte. Dies gilt unverändert auch seit der Einführung der EN 1995-1-1 (Eurocode 5). In dieser gutachtlichen Stellungnahme wurden aus den Ergebnissen von Tragfähigkeitsversuchen der ETH Zürich sowie aus theoretischen Betrachtungen Vorschläge für die Bemessung von BSB-Verbindungen abgeleitet.

BSB-Verbindungen dürfen wie Stahlblech-Holz-Stabdübelverbindungen nach Eurocode 5 bemessen werden, wenn ein Mindestabstand von 45 mm zum beanspruchten Hirnholze eingehalten wird. Bei Kreisdübelbildern darf als Abstand untereinander in Faserrichtung für insgesamt 4 Stabdübel pro Kreisdübelbild ein Wert von 30 mm ausgeführt werden.

Bei der Ermittlung der Lochleibungsfestigkeit darf der Einfluss des Kraft-Faser-Winkels vernachlässigt werden, d.h. es darf grundsätzlich  $\alpha = 0^\circ$  angenommen werden.

Beim Nachweis der Zugspannungen im Nettoquerschnitt darf vereinfacht die Zugspannung mit der gesamten Zugkraft und dem gesamten Nettoquerschnitt ermittelt werden.

Die Biegebeanspruchungen in den Seitenhölzern dürfen mit einem genaueren Nachweis nach Abschnitt 5.3 nachgewiesen werden.

Bei Erdbebeneinwirkungen dürfen aussteifende Bauteile aus BS-Holz mit BSB-Verbindungen in Duktilitätsklasse M nach Eurocode 8 bzw. Duktilitätsklasse 2 nach DIN 4149 eingestuft werden.

Bei Einhaltung der genannten Bedingungen bestehen gegen die Bemessung von BSB-Verbindungen nach Eurocode 5 nach meiner Überzeugung keine Bedenken.

Karlsruhe, den 14.11.2012



Univ.-Prof. Dr.-Ing. H.J. Blaß