

79

**Vergleichende Berechnungen zur Bestimmung
charakteristischer Tragfähigkeiten und Verschiebungsmoduln
von Holzverbindungen mit Dübeln besonderer Bauart**

von

H.J. Blaß, J. Ehlbeck und M. Schlager

Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine
Abteilung Ingenieurholzbau
Universität Fridericiana Karlsruhe
Univ.-Professor Dr.-Ing. Hans Joachim Blaß
1996

**Vergleichende Berechnungen zur Bestimmung
charakteristischer Tragfähigkeiten und Verschiebungsmoduln
von Holzverbindungen mit Dübeln besonderer Bauart**

von

H.J. Blaß, J. Ehlbeck und M. Schlager

Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine
Abteilung Ingenieurholzbau
Universität Fridericiana Karlsruhe
Univ.-Professor Dr.-Ing. Hans Joachim Blaß
1996

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation	1
1.2	Ziel der Untersuchungen	1
2	Verbindungen mit Einlaßdübeln	2
2.1	Rechenmodell	2
2.2	Tragfähigkeit und Steifigkeit aus Versuchen	3
2.2.1	Lochleibungsfestigkeit	4
2.2.2	Tragfähigkeit	4
2.2.3	Steifigkeit	5
2.3	Bemessungsgleichungen	5
2.4	Vergleichsrechnungen hinsichtlich Tragfähigkeit	7
2.4.1	Annahme des Verhältnisses zwischen charakteristischer Tragfähigkeit und zulässiger Belastung	7
2.4.2	Vergleichsrechnungen mit Dübeltyp A und Variation der Holzdicken	8
2.4.3	Vergleichsrechnungen mit Dübeltyp A und Variation des Kraft-Faser-Winkels	9
2.4.4	Vergleichsrechnungen mit Dübeltyp A unter Druckbeanspruchung	11
2.4.5	Vergleichsrechnungen mit Dübeltyp B	13
2.5	Vergleichsrechnungen hinsichtlich Steifigkeit	14
2.5.1	Berechnung der Verschiebungsmoduln nach dem vorgeschlagenen Berechnungsverfahren	14
2.5.2	Berechnung der Verschiebungsmoduln nach DIN 1052	14
2.5.3	Vergleichsrechnung	15
3	Verbindungen mit Einpreßdübeln	16
3.1	Rechenmodell	16
3.2	Tragfähigkeit und Steifigkeit aus Versuchen	16
3.2.1	Tragfähigkeit	16
3.2.2	Steifigkeit	17
3.3	Bemessungsgleichungen	18
3.4	Vergleichsrechnungen hinsichtlich Tragfähigkeit	20
3.4.1	Annahme des Verhältnisses zwischen charakteristischer Tragfähigkeit und zulässiger Belastung	20
3.4.2	Vergleichsrechnungen mit Dübeltyp C unter Zugbeanspruchung	21
3.4.3	Vergleichsrechnungen mit Dübeltyp C und Variation des Kraft-Faser-Winkels	22
3.4.4	Vergleichsrechnungen mit Dübeltyp C unter Druckbeanspruchung	25
3.4.5	Vergleichsrechnungen mit Dübeltyp D unter Zugbeanspruchung	26
3.4.6	Vergleichsrechnungen mit Dübeltyp D und Variation des Kraft-Faser-Winkels	27
3.4.7	Vergleichsrechnungen mit Dübeltyp D unter Druckbeanspruchung	30
3.5	Vergleichsrechnungen hinsichtlich Steifigkeit	31
3.5.1	Berechnung der Verschiebungsmoduln nach dem vorgeschlagenen Berechnungsverfahren	31
3.5.2	Berechnung der Verschiebungsmoduln nach DIN 1052	31
3.5.3	Vergleichsrechnungen	31
4	Zusammenfassung	33
5	Literatur	34

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Im Rahmen der Harmonisierung der Baubestimmungen zum Zwecke des Abbaus von Handelshemmnissen innerhalb der Länder der europäischen Union werden auch europäische Normen für Dübel besonderer Bauart erarbeitet. Das Mandat hierzu wurde vom europäischen Komitee für Normung (CEN) an das Technische Komitee TC 124 vergeben. In einer Arbeitsgruppe innerhalb dieses Komitees werden die Normen für Dübel besonderer Bauart vorbereitet. Aufgabe der Arbeitsgruppe ist es, Normentwürfe für Dübel besonderer Bauart in tragenden Verbindungen von Holzbauwerken vorzubereiten. Eine dieser Normen wird die Anforderungen an die Dübelabmessungen und die Werkstoff-Spezifikationen enthalten. In einer zweiten Norm werden charakteristische Werte der Tragfähigkeit und des Verformungsverhaltens von Dübelverbindungen angegeben werden. Beide Normen werden als Bezugsnormen für die europäische Bemessungsnorm im Holzbau, den Eurocode 5, benötigt.

Es wurde festgelegt, daß in die Normungsarbeit alle Dübel besonderer Bauart einbezogen werden, die sich bewährt haben und in den Mitgliedstaaten der EU und der EFTA verwendet werden. Dies sind u.a. die in DIN 1052, Teil 2 aufgeführten ein- und zweiseitigen Ringkeildübel des Dübeltyps A sowie die ein- und zweiseitigen Einpreßdübel der Dübeltypen C (rund und quadratisch) und D. Außerdem wird der Rundholzdübel des Dübeltyps B aus Eiche berücksichtigt. Insgesamt werden in den in Vorbereitung befindlichen europäischen Normen 21 unterschiedliche Dübeltypen behandelt.

Die Arbeitsgruppe des CEN/TC 124 hat bisher einen Entwurf „Spezifikationen für Dübel besonderer Bauart für Holz“ erstellt. Dieser Entwurf wurde als prEN 912 allen Mitgliedstaaten des CEN vorgelegt.

Zur Vorbereitung der zweiten Norm wurden Rechenmodelle zur Bestimmung charakteristischer Tragfähigkeiten für Verbindungen mit Ringdübeln oder Scheibendübeln (einseitige Einlaßdübel) sowie für Verbindungen mit Einpreßdübeln entwickelt. Sie basieren sowohl auf theoretischen Untersuchungen als auch auf der Auswertung von Versuchsergebnissen. Ebenfalls aus Versuchsergebnissen wurden Verschiebungsmoduln für Verformungsberechnungen und für Nachweise der Tragfähigkeit nachgiebig zusammengesetzter Querschnitte bestimmt.

1.2 Ziel der Untersuchungen

Um Aussagen über die Sicherheit und Wirtschaftlichkeit der mit den entsprechenden Modellen berechneten Tragfähigkeiten und Steifigkeiten machen zu können, werden die Werte den zulässigen Belastungen bzw. den Verschiebungsmoduln nach DIN 1052, Teil 2, April 1988 gegenübergestellt. Die im Entwurf DIN 1052-2/A1, Juni 1995 enthaltenen Änderungen werden dabei berücksichtigt. Ein Vergleich der charakteristischen Tragfähigkeiten und Verschiebungsmoduln mit den entsprechenden zulässigen Werten wird unter Berücksichtigung des neuen Bemessungskonzeptes mit Teilsicherheitsbeiwerten durchgeführt.

2 Verbindungen mit Einlaßdübeln

2.1 Rechenmodell

Bei Zugversuchen mit Einlaßdübelverbindungen wurde als Versagensursache meist ein Abscheren des Holzes am Bauteilende beobachtet. Das Rechenmodell zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Einlaßdübelverbindungen geht daher auch von einem solchen Versagen aus. Die in Wirklichkeit ungleichmäßig verteilten Lochleibungsspannungen werden als gleichmäßig verteilt und parallel zur Richtung der übertragenen Kraft wirkend angenommen. Diese werden dann über Scherspannungen in das Bauteil übertragen.

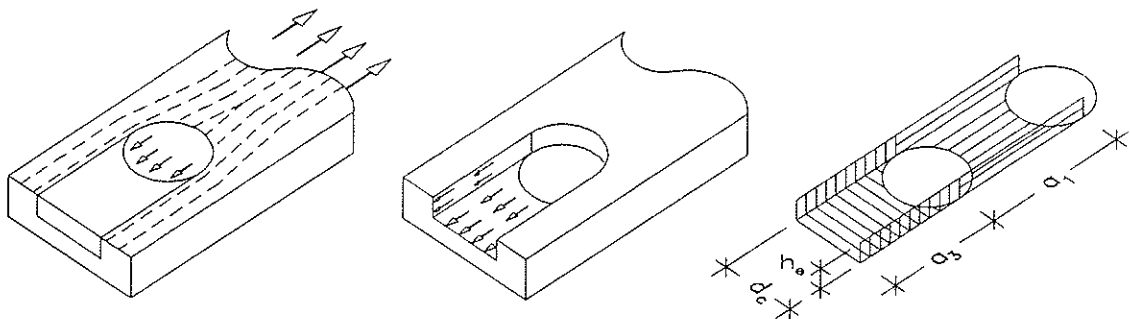


Abb. 1 Spannungen in einer Einlaßdübelverbindung mit zugehörigen Scherflächen.

Die Tragfähigkeit der Bolzen wird vernachlässigt, da diese wegen des Lochspiels erst nach einem gewissen Anfangsschlupf zu tragen beginnen. Das Versagen der Verbindung erfolgt aufgrund des plötzlichen Abscherens schon bei sehr kleinen Verformungen, so daß ein Zusammenwirken von Bolzen und Einlaßdübel nicht gewährleistet ist.

Unter der Annahme eines Scherversagens des Holzes als maßgebender Versagensursache für Zuganschlüsse hängt die Tragfähigkeit von der Scherfläche vor dem Einlaßdübel und von der Scherfestigkeit des Holzes ab. Die Scherfläche innerhalb des Dübels wird nicht berücksichtigt, da in den meisten Versuchen der Holzkern im Dübel vor dem Erreichen der Höchstlast abscherete und damit nicht zur Gesamttragfähigkeit beitrug.

Das Abscheren des Vorholzes tritt jedoch nur bei ausreichender Lochleibungsfestigkeit des Holzes auf. Bei größeren Endabständen a_3 ist daher ein Lochleibungsversagen maßgebend für die Tragfähigkeit der Verbindung.

Damit kann die Tragfähigkeit einer auf Zug parallel zur Faser beanspruchten Einlaßdübelverbindung geschrieben werden als:

$$R_c = \min \begin{cases} f_v A_s \\ f_h d_c h_e \end{cases} \quad (1)$$

mit

- R_c die Tragfähigkeit eines Einlaßdübels,
- f_v die scheinbare oder mittlere Scherfestigkeit des Holzes,
- A_s die Scherfläche pro Dübel,
- f_h die Lochleibungsfestigkeit des Holzes,
- d_c der Dübeldurchmesser und
- h_e die Einlaßtiefe des Dübels im Holz.

Die scheinbare Scherfestigkeit nimmt mit ansteigender Scherfläche ab. Auf der Grundlage zahlreicher Versuche von KUIPERS und VERMEYDEN (1964) wird die folgende Beziehung zwischen scheinbarer Scherfestigkeit und Scherfläche angenommen:

$$f_v = K A_s^{-0,25} \quad (2)$$

mit

K Parameter zur Beschreibung der Scherfestigkeit des Holzes.

Wird Gleichung (2) in Gleichung (1) eingesetzt, folgt:

$$R_c = \min \left\{ \begin{array}{l} K A_s^{0,75} \\ f_h d_c h_e \end{array} \right. \quad (3)$$

Für eine Verbindung mit einem Dübel beträgt die Scherfläche (siehe Abb. 1):

$$A_s = (d_c + 2h_e) a_{3,t} - \pi d_c^2 / 8 \quad (4)$$

mit

$a_{3,t}$ Abstand zum beanspruchten Hirnholzende.

Bei Verbindungen mit mehreren in Krafrichtung hintereinander angeordneten Dübeln beträgt die Scherfläche für den zweiten und jeden weiteren Dübel:

$$A_s = (d_c + 2h_e) a_1 - \pi d_c^2 / 4 \quad (5)$$

mit

a_1 Dübelabstand in Faserrichtung.

Werden Einlaßdübelverbindungen unter einem Winkel von mehr als etwa 30° zur Faserrichtung bzw. auf Druck beansprucht, treten andere Versagensmechanismen auf. Verbindungen mit Winkeln zwischen Kraft- und Faserrichtung zwischen etwa 30° und 150° versagen meist durch Aufspalten des Holzes. Auf Druck beanspruchte Verbindungen zeigen ein kombiniertes Lochleibungs- und Spaltversagen. In diesem Fall tritt das Spalten erst nach beträchtlichen Lochleibungsverformungen unter dem Dübel und dem Bolzen auf. Im Versagenszustand beteiligen sich daher der Einlaßdübel und der Bolzen an der Kraftübertragung. Dieses Zusammenwirken von Einlaßdübel und Bolzen kann allerdings nur bei auf Druck beanspruchten Verbindungen beobachtet werden. Im Vergleich zu auf Zug bzw. unter einem Winkel von weniger als 150° beanspruchten Verbindungen, die ein sprödes Versagen zeigen, treten hier größere plastische Verformungen vor Erreichen der Höchstlast auf. Da auch in druckbeanspruchten Verbindungen der Holzkern im Dübel vor Erreichen der Höchstlast abscheret, wird die wirksame Lochleibungsfläche des Bolzens um die Fläche innerhalb des Dübels verringert.

2.2 Tragfähigkeit und Steifigkeit aus Versuchen

Die dargestellten Ergebnisse stammen von Versuchen mit Einlaßdübelverbindungen, die im Stevin-Laboratorium der Technischen Universität Delft und im dänischen Bauforschungsinstitut zwischen 1957 und 1991 durchgeführt wurden. In den Versuchen wurden einseitige Einlaßdübel mit einem Durchmesser von 67 mm und zweiseitige Einlaßdübel mit Durchmessern von 72 mm und 112 mm verwendet. Insgesamt wurden 948 Versuche ausgewertet. Die Durchführung der Versuche und die Ergebnisse sind in BLAB et al. (1994) eingehend beschrieben. Die Lochleibungsversuche wurden am Brighton College of Technology (HILSON, 1969) durchgeführt.

2.2.1 Lochleibungsfestigkeit

Auf der Grundlage von 139 Versuchen mit unterschiedlicher Rohdichte gibt HILSON (1969 a) folgende Beziehung zwischen der Lochleibungsfestigkeit unter einem Einlaßdübel und der Rohdichte des Holzes bei 13 % Holzfeuchte an:

$$f_h = 82(\rho / 1000)^{1,075} \quad (N/mm^2) \quad \text{mit } \rho \text{ in } kg/m^3 \quad (6)$$

Gleichung (6) kann genügend genau durch die folgende lineare Beziehung ersetzt werden:

$$f_h = 0,078\rho \quad (N/mm^2) \quad \text{mit } \rho \text{ in } kg/m^3 \quad (7)$$

Wird der Bolzenanteil nicht berücksichtigt, läßt sich die Tragfähigkeit der Verbindung näherungsweise ermitteln, indem ein Rechenwert für f_h verwendet wird, der mit der projizierten Fläche des Einlaßdübels multipliziert wird. Aus 30 Versuchen (HILSON, 1969 b) ergibt sich das Verhältnis des Beitrags der Lochleibungsfestigkeit unter dem Dübel zur Tragfähigkeit einschließlich des theoretischen Bolzenanteils im Mittel zu 0,804. Der resultierende Rechenwert

$$f_h = (0,078 / 0,804)\rho = 0,097\rho \quad (N/mm^2) \quad \text{mit } \rho \text{ in } kg/m^3 \quad (8)$$

stimmt gut mit dem entsprechenden charakteristischen Wert für die in BLAß et al. (1994) dargestellten Druckversuche überein:

$$f_{h,k} = 0,095\rho_k \quad (N/mm^2) \quad \text{mit } \rho_k \text{ in } kg/m^3 \quad (9)$$

Nachfolgend wird die charakteristische Lochleibungsfestigkeit zu $f_{h,k} = 0,09 \rho_k$ angenommen.

2.2.2 Tragfähigkeit

Aus der im Zugversuch erreichten Höchstlast und den Abmessungen der Hölzer wurde der Parameter K entsprechend Gleichung (2) für jeden Prüfkörper bestimmt. Aus sämtlichen Werten des Parameters K konnte dann ein 5%-Fraktilwert berechnet werden. Für die Nutzungs-klassen 1 & 2, bestimmte Mindestabmessungen der Hölzer und eine charakteristische Rohdichte des Holzes von $350 kg/m^3$ ergab sich der charakteristische Wert des Parameters K zu:

$$K_k = 20 N/mm^{1,5} \quad (10)$$

Mit diesem Wert für K_k und einer charakteristischen Lochleibungsfestigkeit $f_{h,k} = 0,09 \rho_k$ ergibt sich die charakteristische Tragfähigkeit einer auf Zug beanspruchten Einlaßdübelverbindung:

$$R_{c,0,k} = \min \left\{ \begin{array}{l} 20 A_s^{0,75} \\ 0,09 \rho_k d_c h_e \end{array} \right. \quad (N) \quad (11)$$

mit

A_s Scherfläche pro Dübel in mm^2 nach Abb. 1 bzw. Gleichung (4) oder (5).

Dieser Wert für $R_{c,0,k}$ wurde nur für Hölzer mit bestimmten Mindestdicken erreicht, da bei kleineren Holzdicken statt des Abscherens bzw. Lochleibungsversagens ein Spaltversagen des Holzes auftritt und dadurch die Tragfähigkeit abnimmt (SCHOLTEN, 1944). Die Auswertung der Versuchsergebnisse erfolgte auf der Grundlage einer Mindestdicke des Seitenholzes von $3 h_e$ und des Mittelholzes von $5 h_e$.

Obwohl das Rechenmodell, das ein Abscheren des Holzes vor dem Dübel annimmt, das Verhalten von Verbindungen mit einem Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung von bis zu etwa 30° beschreibt, wurde es bei der Auswertung sämtlicher Versuche mit Kraft-Faser-Winkeln bis zu 150° verwendet. Dies bedeutet, daß auch Verbindungen, die durch Aufspalten versagen, unter der Annahme des Versagens durch Abscheren ausgewertet wurden. Die 5%-Fraktile des

Parameters K zeigte trotzdem kaum Unterschiede aufgrund der unterschiedlichen Versagensformen. Dies kann damit erklärt werden, daß Zwischen- und Randabstände die Tragfähigkeit bei unterschiedlichen Versagensmechanismen in ähnlicher Weise beeinflussen. Falls das Versagen durch Aufspalten des Holzes erfolgt, erhöht ein vergrößerter Abstand zum beanspruchten Hirnholzende die auf Querkzug beanspruchte Fläche im Holz. Nur wenn der Abstand zum Hirnholzende sehr groß wird und die Höchstlast ohne ein Aufspalten des Holzes erreicht wird, kann eine Steigerung der Tragfähigkeit mit größer werdendem Randabstand nicht mehr erwartet werden.

Die Ergebnisse der Zugversuche zeigen keinen Einfluß der Anzahl der Dübel auf die Höchstlast pro Dübel bei bis zu drei Dübeln pro Scherfläche. Dasselbe gilt für die Druckversuche, bei denen ebenfalls keine klare Abhängigkeit zwischen der 5%-Fraktile des Parameters K und der Anzahl der Dübel pro Scherfläche gefunden wurde. Dies muß allerdings nicht bedeuten, daß ein solcher Einfluß nicht besteht. Bis weitere Untersuchungen den Einfluß der Anzahl der in einer Verbindung vorhandenen Dübel klären können, kann die wirksame Anzahl n_{ef} von mehr als zwei in Krafrichtung hintereinander angeordneten Dübeln angenommen werden zu:

$$n_{ef} = 2 + (1 - n / 20)(n - 2) \quad (12)$$

mit

n Anzahl der in Krafrichtung hintereinander angeordneten Dübel.

2.2.3 Steifigkeit

Steifigkeitswerte mechanischer Holzverbindungen werden zum Nachweis der Gebrauchstauglichkeit wie auch zum Nachweis der Tragfähigkeit bei nachgiebig zusammengesetzten Querschnitten benötigt. Der für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit verwendete Verschiebungsmodul K_{ser} entspricht dem Verschiebungsmodul k_s nach DIN EN 26891 "Holzbauwerke - Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln - Allgemeine Grundsätze für die Ermittlung der Tragfähigkeit und des Verformungsverhaltens". Der für den Nachweis der Tragfähigkeit verwendete Verschiebungsmodul K_u beträgt zwei Drittel des entsprechenden Wertes von K_{ser} .

Da die Steifigkeitswerte der geprüften Verbindungen in weiten Grenzen streuen, ist der Einfluß verschiedener Größen auf das Verformungsverhalten kaum zuverlässig abzuschätzen. Daher wurde eine einfache Beziehung gewählt, die den Verschiebungsmodul als Funktion des Einlaßdübelndurchmessers und der charakteristischen Rohdichte des Holzes darstellt. Der Einfluß des Winkels zwischen Kraft- und Faserrichtung, der Holzfeuchte, der Holzdicke sowie der Anzahl der Dübel pro Scherfläche wurde vernachlässigt. Unter der Annahme eines Wertes von 350 kg/m^3 für die charakteristische Rohdichte des in den Versuchen verwendeten Nadelholzes wurde der Mittelwert des Verschiebungsmoduls k_s nach DIN EN 26891 bestimmt zu:

$$k_s = 0,6 d_c \rho_k \quad (N/mm) \quad (13)$$

mit

d_c Dübelndurchmesser in mm ,

ρ_k charakteristische Rohdichte der entsprechenden Festigkeitsklasse des Holzes in kg/m^3 .

2.3 Bemessungsgleichungen

Wird Gleichung (11) auf zugbeanspruchte Verbindungen mit einem Abstand zum beanspruchten Hirnholzende $a_{3,t}$ von $2 d_c$, einer Seitenholzdicke von $3 h_e$, einer Mittelholzdicke von $5 h_e$ und einer charakteristischen Rohdichte des Holzes von 350 kg/m^3 angewandt, ergibt sich die

charakteristische Tragfähigkeit pro Scherfläche für die in prEN 912 angegebenen Einlaßdübel zu:

$$R_{c,0,k} = \min \begin{cases} 35d_c^{1,5} \\ 31,5d_c h_e \end{cases} \quad (N) \quad \text{mit } d_c \text{ und } h_e \text{ in } mm \quad (14)$$

Wird der Bolzenanteil vernachlässigt, kann die charakteristische Tragfähigkeit einer Einlaßdübelverbindung angegeben werden als:

$$R_{j,\alpha,k} = \frac{R_{c,0,k}}{k_{90} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (15)$$

Hierin ist

α Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung,

$$R_{c,0,k} = \min \begin{cases} 35d_c^{1,5} k_p k_{a3} k_t \\ 31,5d_c h_e k_p k_t \end{cases} \quad (N) \quad \text{mit } d_c \text{ und } h_e \text{ in } mm \quad (16)$$

$$k_{90} = 1,3 + 0,001d_c \quad \text{mit } d_c \text{ in } mm \quad (17)$$

Bei auf Druck beanspruchten Verbindungen ($150^\circ \leq \alpha \leq 210^\circ$) mit einem Dübel pro Scherfläche ist nur das Überschreiten der Lochleibungsfestigkeit zu überprüfen:

$$R_{c,0,k} = 31,5d_c h_e k_p k_t \quad (N) \quad \text{mit } d_c \text{ und } h_e \text{ in } mm \quad (18)$$

Auf Druck beanspruchte Verbindungen mit mehr als einem Dübel pro Scherfläche können auch durch Abscheren des Holzes zwischen den Dübeln versagen. Daher sind für diese Verbindungen beide Bedingungen der Gleichung (16) zu überprüfen.

Die empfohlenen Mindestabstände untereinander und von den Rändern sind in Tabelle 1 angegeben.

Tabelle 1 Empfohlene Mindestabstände von Einlaßdübeln.

a_1	Parallel zur Faserrichtung	$(1,2 + 0,8 \cos \alpha) d_c$
a_2	Rechtwinklig zur Faserrichtung	$1,2 d_c$
$a_{3,t}$	$-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	$2 d_c$ *)
$a_{3,c}$	$150^\circ \leq \alpha \leq 210^\circ$	$1,2 d_c$
	$90^\circ < \alpha < 150^\circ$	$(0,4 + 1,6 \sin \alpha) d_c$
	$210^\circ < \alpha < 270^\circ$	$(0,4 + 1,6 \sin \alpha) d_c$
$a_{4,t}$	$0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$	$(0,6 + 0,2 \sin \alpha) d_c$
$a_{4,c}$	für alle anderen Werte von α	$0,6 d_c$
*)	Der Abstand $a_{3,t}$ darf bei Zugverbindungen ($-30^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$) weiter bis auf $1,5 d_c$ verringert werden, wenn die charakteristische Tragfähigkeit proportional abgemindert wird.	

Die Beiwerte zur Berücksichtigung der Rohdichte, des Abstandes zum belasteten Hirnholzende (nur bei Zugbeanspruchung) und der Holzdicke lauten wie folgt:

$$k_p = \min \begin{cases} 1,75 \\ \frac{\rho_k}{350} \end{cases} \quad (19)$$

mit

ρ_k charakteristische Rohdichte des Holzes in kg/m^3 .

Bei auf Zug beanspruchten Verbindungen ($-30^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$) darf ein Modifikationsbeiwert für den Abstand zum beanspruchten Ende angewendet werden:

$$k_{a3} = \min \begin{cases} 1,25 \\ \frac{a_{3,t}}{2d_c} \end{cases} \quad (20)$$

mit

$a_{3,t}$ Abstand zum beanspruchten Hirnholzende und $\min a_{3,t} = 1,5 d_c$.

$$k_t = \min \begin{cases} 1 \\ \frac{t_1}{3h_e} \\ \frac{t_2}{5h_e} \end{cases} \quad (21)$$

mit

t_1 Seitenholzdicke,
 t_2 Mittelholzdicke,
 h_e Einlaßtiefe des Dübels.

Gleichung (21) gilt nur unter der Voraussetzung, daß t_1 und t_2 größer gleich $2,25 h_e$ bzw. $3,75 h_e$ sind.

2.4 Vergleichsrechnungen hinsichtlich Tragfähigkeit

2.4.1 Annahme eines Verhältnisses zwischen charakteristischer Tragfähigkeit und zulässiger Belastung

Das Verhältnis zwischen charakteristischer Tragfähigkeit und zulässiger Belastung entspricht dem Produkt aus dem aus den Lastkombinationen resultierenden Teilsicherheitsbeiwert für Einwirkungen und dem Teilsicherheitsbeiwert für Baustoffe dividiert durch den Modifikationsfaktor zur Berücksichtigung der Nutzungsklasse und der Klasse der Lasteinwirkungsdauer nach Eurocode 5. Für die folgenden Vergleichsrechnungen wird der Teilsicherheitsbeiwert für die Einwirkungen mit $\gamma_F = 1,4$, der Teilsicherheitsbeiwert für die Baustoffe mit $\gamma_M = 1,3$ und der Modifikationsfaktor mit $k_{mod} = 0,8$ abgeschätzt. Daraus ergibt sich ein globaler Sicherheitskoeffizient von 2,28 aus charakteristischer Tragfähigkeit und zulässiger Belastung bei etwa gleichem Sicherheitsniveau.

2.4.2 Vergleichsrechnungen mit Dübeltyp A und Variation der Holzdicken

Annahmen 1:

- zweischnittige Dübelverbindung mit zweiseitigen Ringkeildübeln des Dübeltyps A,
- Belastung auf Zug parallel zur Faser ($\alpha = 0^\circ$),
- Holz der Sortierklasse S 10 / MS 10 mit einer charakteristischen Rohdichte $\rho_k = 380 \text{ kg/m}^3$,
- Endabstand zum beanspruchten Rand entsprechend der Mindestvorholzlänge nach DIN 1052, Teil 2, Tabelle 4,
- Holzdicken entsprechend den Mindestholzdicken nach DIN 1052, Teil 2, Tabelle 4 unter Berücksichtigung der Änderungen im Entwurf DIN 1052-2/A1.

Tabelle 2 Eingabedaten, berechnete charakteristische Tragfähigkeiten und Verhältnisse zwischen charakteristischen Tragfähigkeiten und zulässigen Belastungen $R_{j,0,k}/\text{zul } F$.

d_c	h_c	h_e	$a_{3,t}$	$\min a_{3,t}!$	t_1	$\min t_1!$	t_2	$\min t_2!$	k_p	k_{a3}	k_t	$R_{c,0,k}$ = $R_{j,0,k}$ (kN)	zul F (kN)	$\frac{R_{j,0,k}}{\text{zul } F}$
(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)						
65	30	15	140	97,5	40	33,8	60	56,3	1,09	1,08	0,80	17,2	11,5	1,49
80	30	15	180	120	50	33,8	60	56,3	1,09	1,13	0,80	24,5	14,0	1,75
95	30	15	220	143	60	33,8	80	56,3	1,09	1,16	1,00	40,7	17,0	2,40
126	30	15	250	189	60	33,8	80	56,3	1,09	0,99	1,00	53,3	20,0	2,67
128	45	22,5	300	192	60	50,6	80	84,4	1,09	1,17	0,75	48,4	28,0	1,73
160	45	22,5	340	240	100	50,6	100	84,4	1,09	1,06	0,89	72,6	34,0	2,14
190	45	22,5	430	285	100	50,6	100	84,4	1,09	1,13	0,89	100	48,0	2,09
Mittelwert:													2,04	

Um ein Aufspalten der Hölzer als Versagensursache zu vermeiden, wurden mit dem Berechnungsverfahren auch Holzdicken in Abhängigkeit von der Einlaßtiefe der Dübel im Holz festgelegt. Für Verbindungen mit zweiseitigen Dübeln besonderer Bauart betragen die Grundwerte der Holzdicken für Seitenhölzer $t_1 = 3 h_e$ und für Mittelhölzer $t_2 = 5 h_e$. Diese Werte sind teilweise größer als die in DIN 1052, Teil 2, Tabelle 4 bzw. im Entwurf DIN 1052-2/A1 aufgeführten Mindestholzdicken für den Ringkeildübel des Dübeltyps A. Damit die nationalen Mindestholzdicken dennoch angewendet werden können, wurde in den Bemessungsgleichungen der Beiwert „Holzdicke“ (k_t) eingeführt. Er erlaubt eine Verringerung der Holzdicken, jedoch höchstens um 25 %. Die Dübeltragfähigkeit muß dann entsprechend linear abgemindert werden.

Beim Dübel mit Durchmesser $d_c = 128 \text{ mm}$ greift die untere Grenze bei der erforderlichen Holzdicke des Mittelholzes. Der in den nationalen Bestimmungen gegebene Mindestwert ist nicht mehr zulässig. Die Mindestholzdicke vergrößert sich von 80 mm auf $84,4 \text{ mm}$. Die anderen Mindestholzdicken nach DIN 1052, Teil 2 können weiter angewendet werden. Es verringern sich dann bei einigen Dübelgrößen der Grundwert der Dübeltragfähigkeit über den Beiwert k_t um 11 %, 20 % oder 25 %.

Ein Vergleich der berechneten charakteristischen Tragfähigkeiten mit den zulässigen Belastungen führt teilweise zu verhältnismäßig kleinen Verhältniswerten $R_{j,0,k} / \text{zul } F$. Dies bedeutet, daß die Dübelverbindungen mit den hier getroffenen Annahmen weniger als nach DIN 1052, Teil 2 belastet werden können. Dieser „Verlust“ ist auf die relativ geringen zulässigen Mindestholzdicken der DIN 1052, Teil 2 zurückzuführen.

Annahmen 2:

wie Annahmen 1, jedoch

- Holzdicken entsprechend den Grundwerten des Berechnungsverfahrens: $t_1 = 3 h_e$ und $t_2 = 5 h_e$.

Tabelle 3 Eingabedaten, berechnete charakteristische Tragfähigkeiten und Verhältnisse zwischen charakteristischen Tragfähigkeiten und zulässigen Belastungen $R_{j,0,k}/zul F$.

d_c (mm)	h_c (mm)	h_e (mm)	$a_{3,t}$ (mm)	t_1 (mm)	t_2 (mm)	k_p	k_{a3}	k_t	$R_{c,0,k}$ = $R_{j,0,k}$ (kN)	zul F (kN)	$\frac{R_{j,0,k}}{zul F}$
65	30	15	140	45	75	1,09	1,08	1,0	21,5	11,5	1,86
80	30	15	180	45	75	1,09	1,13	1,0	30,6	14,0	2,18
95	30	15	220	45	75	1,09	1,16	1,0	40,7	17,0	2,40
126	30	15	250	45	75	1,09	0,99	1,0	53,3	20,0	2,67
128	45	22,5	300	67,5	113	1,09	1,17	1,0	64,5	28,0	2,30
160	45	22,5	340	67,5	113	1,09	1,06	1,0	81,7	34,0	2,40
190	45	22,5	430	67,5	113	1,09	1,13	1,0	113	48,0	2,35
Mittelwert:											2,31

Bei Einhaltung der Grundwerte für die Holzdicken ergibt sich aus den Verhältnissen zwischen charakteristischen Tragfähigkeiten und zulässigen Belastungen ein Mittelwert von 2,31. Dies entspricht praktisch dem abgeschätzten globalen Sicherheitskoeffizienten von 2,28 (vgl. Abschnitt 2.4.1).

2.4.3 Vergleichsrechnungen mit Dübeltyp A und Variation des Kraft-Faser-Winkels

Annahmen 1:

- zweischnittige Dübelverbindung mit zweiseitigen Ringkeildübeln des Dübeltyps A,
- Belastung des Mittelholzes unter einem Winkel $\alpha = 30^\circ$ zur Faserrichtung und Belastung der Seitenhölzer parallel zur Faserrichtung ($\alpha = 0^\circ$),
- Holz der Sortierklasse S 10 / MS 10 mit einer charakteristischen Rohdichte $\rho_k = 380 \text{ kg/m}^3$,
- Endabstand zum beanspruchten Rand entsprechend der Mindestvorholzlänge nach DIN 1052, Teil 2, Tabelle 4,
- Holzdicken entsprechend den Grundwerten des Berechnungsverfahrens: $t_1 = 3 h_e$ und $t_2 = 5 h_e$.

Tabelle 4 Eingabedaten, berechnete charakteristische Tragfähigkeiten des Dübels im Mittelholz und Verhältnisse zwischen charakteristischen Tragfähigkeiten und zulässigen Belastungen $R_{j,30,k}/zul F$.

d_c	h_c	h_e	$a_{3,t}$	t_1	t_2	k_p	k_{a3}	k_t	$R_{c,0,k}$	k_{90}	$R_{c,30,k}$ = $R_{j,30,k}$	zul F	$\frac{R_{j,30,k}}{zul F}$
(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)				(kN)		(kN)	(kN)	
65	30	15	140	45	75	1,09	1,08	1,0	21,5	1,37	19,7	10,0	1,97
80	30	15	180	45	75	1,09	1,13	1,0	30,6	1,38	27,9	12,5	2,23
95	30	15	220	45	75	1,09	1,16	1,0	40,7	1,40	37,1	14,5	2,56
126	30	15	250	45	75	1,09	0,99	1,0	53,3	1,43	48,2	17,0	2,83
128	45	22,5	300	67,5	113	1,09	1,17	1,0	64,5	1,43	58,3	23,5	2,48
160	45	22,5	340	67,5	113	1,09	1,06	1,0	81,7	1,46	73,3	27,5	2,66
190	45	22,5	430	67,5	113	1,09	1,13	1,0	113	1,49	100	38,5	2,61
Mittelwert:												2,48	

Eine Beanspruchung unter einem Kraft-Faser-Winkel im Bereich $-30^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ zählt als Zugbeanspruchung. Somit darf hier noch der Modifikationsbeiwert für den Abstand zum beanspruchten Ende (k_{a3}) berücksichtigt werden.

Für einen Kraft-Faser-Winkel $\alpha = 30^\circ$ ergibt sich aus den Verhältnissen zwischen charakteristischen Tragfähigkeiten und zulässigen Belastungen ein Mittelwert von 2,48. Dies bedeutet, daß die Dübelverbindung mit den getroffenen Annahmen wirtschaftlicher als nach DIN 1052, Teil 2 bemessen werden kann.

Annahmen 2:

wie Annahmen 1, jedoch

- Belastung des Mittelholzes unter einem Winkel $\alpha = 60^\circ$ zur Faserrichtung und Belastung der Seitenhölzer parallel zur Faserrichtung ($\alpha = 0^\circ$).

Tabelle 5 Eingabedaten, berechnete charakteristische Tragfähigkeiten des Dübels im Mittelholz und Verhältnisse zwischen charakteristischen Tragfähigkeiten und zulässigen Belastungen $R_{j,60,k}/zul F$.

d_c	h_c	h_e	t_1	t_2	k_p	k_t	$R_{c,0,k}$	k_{90}	$R_{c,60,k}$ = $R_{j,60,k}$	zul F	$\frac{R_{j,60,k}}{zul F}$
(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)			(kN)		(kN)	(kN)	
65	30	15	45	75	1,09	1,0	19,9	1,37	15,6	10,0	1,56
80	30	15	45	75	1,09	1,0	27,2	1,38	21,2	12,5	1,69
95	30	15	45	75	1,09	1,0	35,2	1,40	27,1	14,5	1,87
126	30	15	45	75	1,09	1,0	53,8	1,43	40,7	17,0	2,40
128	45	22,5	67,5	113	1,09	1,0	55,0	1,43	41,7	23,5	1,77
160	45	22,5	67,5	113	1,09	1,0	76,9	1,46	57,2	27,5	2,08
190	45	22,5	67,5	113	1,09	1,0	99,5	1,49	72,8	38,5	1,89
Mittelwert:											1,90

Annahmen 3:

wie Annahmen 1, jedoch

- Belastung des Mittelholzes rechtwinklig zur Faserrichtung ($\alpha = 90^\circ$) und Belastung der Seitenhölzer parallel zur Faserrichtung ($\alpha = 0^\circ$).

Tabelle 6 Eingabedaten, berechnete charakteristische Tragfähigkeiten eines Dübels im Mittelholz und Verhältnisse zwischen charakteristischen Tragfähigkeiten und zulässigen Belastungen $R_{j,90,k}/zul F$.

d_c	h_c	h_e	t_1	t_2	k_p	k_t	$R_{c,0,k}$	k_{90}	$R_{c,90,k}$ $= R_{j,90,k}$	$zul F$	$\frac{R_{j,90,k}}{zul F}$
(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)			(kN)		(kN)	(kN)	
65	30	15	45	75	1,09	1,0	19,9	1,37	14,6	9,00	1,62
80	30	15	45	75	1,09	1,0	27,2	1,38	19,7	11,0	1,79
95	30	15	45	75	1,09	1,0	35,2	1,40	25,2	12,5	2,02
126	30	15	45	75	1,09	1,0	53,8	1,43	37,7	14,0	2,69
128	45	22,5	67,5	113	1,09	1,0	55,0	1,43	38,5	19,0	2,03
160	45	22,5	67,5	113	1,09	1,0	76,9	1,46	52,7	21,5	2,45
190	45	22,5	67,5	113	1,09	1,0	99,5	1,49	66,8	29,0	2,30
Mittelwert:											2,13

Aus den Verhältnissen zwischen charakteristischen Tragfähigkeiten und zulässigen Belastungen ergibt sich bei einem Kraft-Faser-Winkel $\alpha = 60^\circ$ ein Mittelwert von 1,90 und bei einem Kraft-Faser-Winkel $\alpha = 90^\circ$ ein Mittelwert von 2,13. Eine Dübelverbindung unter einem Kraft-Faser-Winkel von mehr als 30° wird also nach dem vorgeschlagenen Berechnungsverfahren unwirtschaftlicher als nach DIN 1052, Teil 2.

2.4.4 Vergleichsrechnungen mit Dübeltyp A unter Druckbeanspruchung

Annahmen 1:

- zweischnittige Verbindung mit einem zweiseitigen Ringkeildübel des Dübeltyps A pro Scherfläche,
- Belastung auf Druck parallel zur Faser ($\alpha = 180^\circ$); die Tragfähigkeit des Bolzens wird vernachlässigt.
- Holz der Sortierklasse S 10 / MS 10 mit einer charakteristischen Rohdichte $\rho_k = 380 \text{ kg/m}^3$,
- Endabstand zum unbeanspruchten Rand entsprechend der halben Mindestvorholzlänge nach DIN 1052, Teil 2, Tabelle 4,
- Holzdicken entsprechend den Grundwerten des Berechnungsverfahrens: $t_1 = 3 h_e$ und $t_2 = 5 h_e$.

Tabelle 7 Eingabedaten, berechnete charakteristische Tragfähigkeiten des Dübels und Verhältnisse zwischen charakteristischen Tragfähigkeiten und zulässigen Belastungen $R_{j,180,k}/zul F$.

d_c	h_c	h_e	$a_{3,c}$	$\min a_{3,c}!$	t_1	t_2	k_p	k_t	$R_{c,0,k}$	k_{90}	$R_{c,180,k}$ $= R_{j,180,k}$	$zul F$	$\frac{R_{j,180,k}}{zul F}$
(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)			(kN)		(kN)	(kN)	
65	30	15	70	39	45	75	1,09	1,0	33,4	1,37	33,4	11,5	2,90
80	30	15	90	48	45	75	1,09	1,0	41,0	1,38	41,0	14,0	2,93
95	30	15	110	57	45	75	1,09	1,0	48,7	1,40	48,7	17,0	2,87
126	30	15	125	75,6	45	75	1,09	1,0	64,6	1,43	64,6	20,0	3,23
128	45	22,5	150	76,8	67,5	113	1,09	1,0	98,5	1,43	98,5	28,0	3,52
160	45	22,5	170	96	67,5	113	1,09	1,0	123	1,46	123	34,0	3,62
190	45	22,5	215	114	67,5	113	1,09	1,0	146	1,49	146	48,0	3,05
Mittelwert:												3,16	

Die Tragfähigkeit einer auf Druck beanspruchten Verbindung mit einem Dübel pro Scherfläche ergibt sich aus dem Nachweis der Lochleibungsbeanspruchung. Im Versagensfall sind sowohl unter dem Dübel als auch unter dem Bolzen große Lochleibungsverformungen vorhanden. Obwohl die Tragfähigkeit des Bolzens in der Berechnung nicht berücksichtigt wurde, ergibt sich aus den Verhältnissen zwischen charakteristischen Tragfähigkeiten und zulässigen Belastungen ein Mittelwert von 3,16. Dies bedeutet, daß unter den getroffenen Annahmen eine Dübelverbindung deutlich wirtschaftlicher als nach DIN 1052, Teil 2 bemessen werden kann.

Annahmen 2:

wie Annahmen 1, jedoch

- zweischrittige Verbindung mit je zwei zweiseitigen Ringkeildübeln des Dübeltyps A pro Scherfläche.

Tabelle 8 Eingabedaten, berechnete charakteristische Tragfähigkeiten des zweiten Dübels und Verhältnisse zwischen charakteristischen Tragfähigkeiten und zulässigen Belastungen $R_{j,180,k}/zul F$.

d_c	h_c	h_e	t_1	t_2	k_p	k_t	$R_{c,0,k}$	k_{90}	$R_{c,180,k}$ $= R_{j,180,k}$	$zul F$	$\frac{R_{j,180,k}}{zul F}$
(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)			(kN)		(kN)	(kN)	
65	30	15	45	75	1,09	1,0	19,9	1,37	19,9	11,5	1,73
80	30	15	45	75	1,09	1,0	27,2	1,38	27,2	14,0	1,94
95	30	15	45	75	1,09	1,0	35,2	1,40	35,2	17,0	2,07
126	30	15	45	75	1,09	1,0	53,8	1,43	53,8	20,0	2,69
128	45	22,5	67,5	113	1,09	1,0	55,0	1,43	55,0	28,0	1,97
160	45	22,5	67,5	113	1,09	1,0	76,9	1,46	76,9	34,0	2,26
190	45	22,5	67,5	113	1,09	1,0	99,5	1,49	99,5	48,0	2,07
Mittelwert:											2,10

Die Tragfähigkeit einer auf Druck beanspruchten Verbindung mit zwei Dübeln pro Scherfläche wird durch Überschreiten der Lochleibungsfestigkeit oder durch Abscheren des Holzes zwi-

schen den Dübeln erreicht. Da beim Abscheren des Holzes ein sprödes Versagensverhalten auftritt, richtet sich bei diesem Versagensfall die Tragfähigkeit der gesamten Dübelverbindung nach der Tragfähigkeit des zweiten Dübels. Die charakteristische Tragfähigkeit der Verbindung ist dann das Zweifache der charakteristischen Tragfähigkeit des zweiten Dübels. Ausreichende Lochleibungsfestigkeit muß vorhanden sein.

Bei den in Tabelle 8 durchgeführten Vergleichsrechnungen wird das Abscheren des Holzes die maßgebende Bedingung zur Berechnung der charakteristischen Tragfähigkeiten. Aus den Verhältnissen zwischen charakteristischen Tragfähigkeiten und zulässigen Belastungen ergibt sich ein Mittelwert von 2,10. Dies bedeutet, daß unter den getroffenen Annahmen eine Dübelverbindung etwas geringer als nach DIN 1052, Teil 2 beansprucht werden kann.

2.4.5 Vergleichsrechnungen mit Dübeltyp B

Annahmen 1:

- zweischnittige Dübelverbindung mit Rundholzdübeln aus Eiche des Dübeltyps B,
- Belastung auf Zug parallel zur Faser ($\alpha = 0^\circ$),
- Holz der Sortierklasse S 10 / MS 10 mit einer charakteristischen Rohdichte $\rho_k = 380 \text{ kg/m}^3$,
- Endabstand zum beanspruchten Rand entsprechend der Mindestvorholzlänge nach DIN 1052, Teil 2, Tabelle 4,
- Holzdicken entsprechend den Mindestholzdicken nach DIN 1052, Teil 2, Tabelle 4 unter Berücksichtigung der Änderungen im Entwurf DIN 1052-2/A1.

Tabelle 9 Eingabedaten, berechnete charakteristische Tragfähigkeiten und Verhältnisse zwischen charakteristischen Tragfähigkeiten und zulässigen Belastungen $R_{j,0,k}/zul F$.

d_c	h_c	h_e	$a_{3,t}$	$\min a_{3,t}$	t_1	$\min t_1$	t_2	$\min t_2$	k_p	k_{a3}	k_t	$R_{c,0,k}$ $= R_{j,0,k}$	$zul F$	$\frac{R_{j,0,k}}{zul F}$
(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)				(kN)	(kN)	
66	32	16	130	99	40	36	60	60	1,09	0,98	0,75	15,1	11,0	1,37
100	40	20	200	150	60	45	80	75	1,09	1,00	0,80	30,4	18,0	1,69
													Mittelwert:	1,53

Annahmen 2:

wie Annahmen 1, jedoch

- Holzdicken entsprechend den Grundwerten des Berechnungsverfahrens: $t_1 = 3 h_e$ und $t_2 = 5 h_e$.

Tabelle 10 Eingabedaten, berechnete charakteristische Tragfähigkeiten und Verhältnisse zwischen charakteristischen Tragfähigkeiten und zulässigen Belastungen $R_{j,0,k}/zul F$.

d_c	h_c	h_e	$a_{3,t}$	t_1	t_2	k_p	k_{a3}	k_t	$R_{c,0,k}$ $= R_{j,0,k}$	$zul F$	$\frac{R_{j,0,k}}{zul F}$	
(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)				(kN)	(kN)		
66	32	16	130	48	80	1,09	0,98	1,00	20,1	11,0	1,82	
100	40	20	200	60	100	1,09	1,00	1,00	38,0	18,0	2,11	
											Mittelwert:	1,97

Annahmen 3:

wie Annahmen 2, jedoch

- Mindestabstand $a_{3,t} = 2,5 d_c$.

Tabelle 11 Eingabedaten, berechnete charakteristische Tragfähigkeiten und Verhältnisse zwischen charakteristischen Tragfähigkeiten und zulässigen Belastungen $R_{j,0,k}/zul F$.

d_c (mm)	h_c (mm)	h_e (mm)	$a_{3,t}$ (mm)	t_1 (mm)	t_2 (mm)	k_p	k_{a3}	k_t	$R_{c,0,k}$ = $R_{j,0,k}$ (kN)	zul F (kN)	$\frac{R_{j,0,k}}{zul F}$
66	32	16	165	48	80	1,09	1,25	1,00	25,5	11,0	2,32
100	40	20	250	60	100	1,09	1,25	1,00	47,5	18,0	2,64
Mittelwert:											2,48

Die in Tabelle 9 durchgeführten Vergleichsrechnungen mit kleinen Holzdicken entsprechend den nationalen Bestimmungen führen zu kleinen Verhältniswerten $R_{j,0,k} / zul F$. Werden die Holzdicken auf die im Berechnungsverfahren vorgeschlagenen Grundwerte $3 h_e$ für Seitenhölzer und $5 h_e$ für Mittelhölzer vergrößert, dann vergrößern sich auch die Dübeltragfähigkeiten deutlich (Tabelle 10). Bei Ausnutzung eines großen Endabstandes zum beanspruchten Rand von $a_{3,t} = 2,5 d_c$ kann die Tragfähigkeit einer auf Zug beanspruchten Dübelverbindung über den Beiwert k_{a3} weiter vergrößert werden (Tabelle 11). Mit diesen getroffenen Annahmen kann dann die Verbindung ebenso wirtschaftlich wie nach DIN 1052, Teil 2 bemessen werden.

2.5 Vergleichsrechnungen hinsichtlich Steifigkeit

2.5.1 Berechnung der Verschiebungsmoduln nach dem vorgeschlagenen Berechnungsverfahren

Für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit ergibt sich der Verschiebungsmodul K_{ser} in Abhängigkeit vom Dübeldurchmesser d_c und der charakteristischen Rohdichte des Holzes ρ_k zu $K_{ser} = 0,6 d_c \rho_k$. Der für den Nachweis der Tragfähigkeit bei zusammengesetzten Querschnitten verwendete Verschiebungsmodul K_u beträgt zwei Drittel des entsprechenden Wertes von K_{ser} .

2.5.2 Berechnung der Verschiebungsmoduln nach DIN 1052

Für Nachweise der Gebrauchstauglichkeit dürfen die in DIN 1052, Teil 2, Tabelle 13 angegebenen Verschiebungsmoduln ($C_{1,Gebr.}$ in Tabelle 12 unten) verwendet werden, mindestens jedoch die 1,25-fachen Werte der Verschiebungsmoduln ($C_{2,Gebr.}$ in Tabelle 12 unten) für Nachweise der Tragfähigkeit von nachgiebig zusammengesetzten Querschnitten nach DIN 1052, Teil 1, Tabelle 8 ($C_{Tragf.}$ in Tabelle 12 unten).

2.5.3 Vergleichsrechnung

Annahmen:

- Dübelverbindung mit zweiseitigen Ringkeildübeln des Dübeltyps A,
- Belastung auf Zug parallel zur Faser ($\alpha = 0^\circ$),
- Holz der Sortierklasse S 10 / MS 10 mit einer charakteristischen Rohdichte $\rho_k = 380 \text{ kg/m}^3$.

Tabelle 12 Eingabedaten, berechnete Verschiebungsmoduln und Verhältnisse zwischen den Verschiebungsmoduln nach dem vorgeschlagenen Berechnungsverfahren und nach DIN 1052.

d_c (mm)	Nachweise der Gebrauchstauglichkeit			$\frac{K_{ser}}{\max C_{Gebr.}}$	Nachweise der Tragfähigkeit		$\frac{K_u}{\max C_{Tragf.}}$
	Berechnungs- vorschlag K_{ser} (kN/mm)	DIN 1052 $C_{1,Gebr.}$ (kN/mm) $C_{2,Gebr.}$ (kN/mm)			Berechnungs- vorschlag K_u (kN/mm)	DIN 1052 $C_{Tragf.}$ (kN/mm)	
65	14,8	11,5	18,8	0,79	9,88	15,0	0,66
80	18,2	14,0	18,8	0,97	12,2	15,0	0,81
95	21,7	17,0	28,1	0,77	14,4	22,5	0,64
126	28,7	20,0	28,1	1,02	19,2	22,5	0,85
128	29,2	28,0	28,1	1,04	19,5	22,5	0,86
160	36,5	34,0	37,5	0,97	24,3	30,0	0,81
190	43,3	48,0	37,5	0,90	28,9	30,0	0,96
Mittelwert:				0,92	Mittelwert:		0,80

Für Verformungsberechnungen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ergibt sich unter den getroffenen Annahmen nach dem vorgeschlagenen Berechnungsverfahren ein im Mittel 8 % kleinerer Verschiebungsmodul als nach DIN 1052. Dies bedeutet, daß die berechneten Verformungen geringfügig größer werden. Für Tragfähigkeitsnachweise bei zusammengesetzten Querschnitten wird der Verschiebungsmodul im Mittel um 20 % kleiner angesetzt.

3 Verbindungen mit Einpreßdübeln

3.1 Rechenmodell

Bei vielen Versuchen mit Einpreßdübelverbindungen wurde als Versagensursache das Erreichen der Lochleibungsfestigkeit des Holzes sowohl unter den Dübelzähnen wie auch unter dem Bolzen beobachtet. Bei manchen Einpreßdübelarten werden die Zähne zusätzlich verbogen. Bei Zugverbindungen mit geringen Abständen zum Hirnholzende ist dagegen das Aufspalten und Abscheren des Holzes maßgebend für das Versagen. Da Verbindungen mit Einpreßdübeln im allgemeinen beträchtliche plastische Verformungen vor dem Erreichen der Höchstlast zeigen, kann ein Zusammenwirken von Einpreßdübel und Bolzen angenommen werden.

Das Modell zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Einpreßdübelverbindungen berücksichtigt das Zusammenwirken des Dübels und des Bolzens. Die Tragfähigkeit wird demzufolge berechnet zu:

$$R_{j,k} = R_{c,k} + R_{b,k} \quad (22)$$

mit

- $R_{j,k}$ charakteristische Tragfähigkeit der Verbindung mit Dübel und Bolzen,
- $R_{c,k}$ charakteristische Tragfähigkeit des Einpreßdübels,
- $R_{b,k}$ Tragfähigkeit des Bolzens nach EC5 mit den charakteristischen Werten der Lochleibungsfestigkeit und des Fließmoments des Bolzens.

Die charakteristische Tragfähigkeit eines runden Einpreßdübels kann durch folgende empirische Gleichung beschrieben werden:

$$R_{c,k} = A d_c^{1,5} \quad (23)$$

mit

- d_c Dübeldurchmesser,
- A vom Einpreßdübeltyp abhängiger Faktor, der durch Versuche zu bestimmen ist.

3.2 Tragfähigkeit und Steifigkeit aus Versuchen

Die hier angegebenen Werte sind Ergebnisse von Versuchen mit Einpreßdübelverbindungen, die im Stevin-Laboratorium der Technischen Universität Delft und im dänischen Bauforschungsinstitut zwischen 1957 und 1991 durchgeführt wurden. Es wurden lediglich Versuche mit einem Dübeltyp, dem Bulldogdübel, ausgewertet. In den Versuchen wurden runde Einpreßdübel mit Durchmessern zwischen 50 mm und 117 mm, zwei verschiedene quadratische Dübel mit 100 mm bzw. 130 mm Seitenlänge und ein ovaler Dübel von 70 mm auf 130 mm verwendet. Insgesamt konnten 486 Versuche ausgewertet werden. Die Durchführung der Versuche und die Ergebnisse sind in BLAß et al. (1993) eingehend beschrieben.

3.2.1 Tragfähigkeit

Aus den Abmessungen der Versuchskörper und unter der Annahme einer charakteristischen Rohdichte des Holzes von 350 kg/m^3 wurde die charakteristische Tragfähigkeit des Bolzens nach EC5 bestimmt. Dieser Wert wurde dann von der im Versuch erreichten Höchstlast abgezogen und der Parameter A entsprechend Gleichung (23) für jeden Prüfkörper bestimmt. Aus sämtlichen Werten des Parameters A konnte dann der 5%-Fraktilwert als charakteristischer

Wert berechnet werden. Für die Nutzungsklasse 1 & 2 und bestimmte Mindestabmessungen der Hölzer ergab sich der charakteristische Wert des Parameters A zu:

$$A_k = 18 \text{ N/mm}^{1,5} \quad (24)$$

Wie bei Einlaßdübelverbindungen wurde dieser Wert nur für Hölzer mit bestimmten Mindestdicken erreicht, da bei kleineren Holzdicken statt des Lochleibungsversagens ein Spaltversagen des Holzes auftritt und damit die Tragfähigkeit abnimmt. Die Auswertung der Versuchsergebnisse erfolgte auf der Grundlage einer Mindestholzdicke des Seitenholzes von $1,5 h_c$ und des Mittelholzes von $2,5 h_c$. h_c entspricht der Dübelhöhe für zweiseitige und der zweifachen Dübelhöhe für einseitige Einpreßdübel.

Die Ergebnisse der Versuche zeigen eine leichte Abnahme der charakteristischen Tragfähigkeit pro Dübel bei zunehmender Anzahl bis zu drei Dübel pro Scherfläche. Die Abnahme der mittleren Tragfähigkeit ist stärker ausgeprägt. Bevor weitere Untersuchungen den Einfluß der Anzahl der in einer Verbindung vorhandenen Dübel klären können, kann die wirksame Anzahl n_{ef} von mehr als zwei in Krafrichtung hintereinander angeordneten Dübeln angenommen werden zu:

$$n_{ef} = 2 + (1 - n/20)(n - 2) \quad (25)$$

mit

n Anzahl der in Krafrichtung hintereinander angeordneten Dübel.

Obwohl die Anzahl der Versuche mit Winkeln zwischen Kraft- und Faserrichtung von 30° bis 180° nicht sehr groß ist, scheint aus den Versuchen hervorzugehen, daß die 5%-Fraktile des Parameters A unabhängig vom Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung ist.

3.2.2 Steifigkeit

Da die Steifigkeitswerte der geprüften Verbindungen in weiten Grenzen streuen, ist der Einfluß verschiedener Größen auf das Verformungsverhalten kaum zuverlässig abzuschätzen. Daher wurde eine einfache Beziehung gewählt, die den Verschiebungsmodul als Funktion des Einpreßdübeldurchmessers und der charakteristischen Rohdichte des Holzes darstellt. Der Einfluß des Winkels zwischen Kraft- und Faserrichtung, der Holzfeuchte, der Holzdicke sowie der Anzahl der Dübel pro Scherfläche wurde vernachlässigt. Für die Einpreßdübel des Typs C1 bis C9 nach prEN 912 wurde der Mittelwert des Verschiebungsmoduls k_s nach DIN EN 26891 bestimmt zu:

$$k_s = 0,3 d_c \rho_k \quad (\text{N/mm}) \quad (26)$$

Aus einem Vergleich der Verschiebungsmoduln der in DIN 1052 (1988) angegebenen Einpreßdübel ergibt sich der Verschiebungsmodul k_s für die Einpreßdübel des Typs C10 und C11 nach prEN 912 zu:

$$k_s = 0,45 d_c \rho_k \quad (\text{N/mm}) \quad (27)$$

mit

d_c Dübeldurchmesser in mm ,

ρ_k charakteristische Rohdichte der entsprechenden Festigkeitsklasse des Holzes in kg/m^3 .

Tabelle 14 Empfohlene Mindestabstände von Einpreßdübeln des Typs C10 und C11.

a_1	Parallel zur Faserrichtung	$(1,2 + 0,8 \cos\alpha) d_c$
a_2	Rechtwinklig zur Faserrichtung	$1,2 d_c$
$a_{3,t}$	$-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	$2 d_c$ *)
$a_{3,c}$	$150^\circ \leq \alpha \leq 210^\circ$	$1,2 d_c$
	$90^\circ < \alpha < 150^\circ$	$(0,4 + 1,6 \sin\alpha) d_c$
	$210^\circ < \alpha < 270^\circ$	$(0,4 + 1,6 \sin\alpha) d_c$
$a_{4,t}$	$0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$	$(0,6 + 0,2 \sin\alpha) d_c$
$a_{4,c}$	für alle anderen Werte von α	$0,6 d_c$
*)	Der Abstand $a_{3,t}$ darf bei Zugverbindungen ($-30^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$) weiter bis auf $1,5 d_c$ verringert werden, wenn die charakteristische Tragfähigkeit proportional abgemindert wird.	

Die Beiwerte zur Berücksichtigung der Rohdichte, des Abstandes zum belasteten Hirnholzende (nur bei Zugbeanspruchung) und der Holzdicke lauten wie folgt:

$$k_p = \min \begin{cases} 1,5 \\ \frac{\rho_k}{350} \end{cases} \quad (31)$$

mit

ρ_k charakteristische Rohdichte des Holzes in kg/m^3 .

Bei auf Zug beanspruchten Verbindungen ($-30^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$) darf ein Modifikationsbeiwert für den Abstand zum beanspruchten Hirnholzende angewendet werden. Dieser beträgt für die Dübeltypen C1 bis C9 nach prEN 912:

$$k_{a3} = \min \begin{cases} 1 \\ \frac{a_{3,t}}{1,5d_c} \end{cases} \quad (32)$$

mit

$a_{3,t}$ Abstand zum beanspruchten Hirnholzende mit einem Mindestwert von

$$a_{3,t,\min} = \max \begin{cases} 1,1d_c \\ 7d_b \\ 80mm \end{cases} \quad (33)$$

mit

d_b Bolzendurchmesser in mm .

Für die Dübeltypen C10 und C11 nach prEN 912 lautet der Modifikationsbeiwert für Zugverbindungen ($-30^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$):

$$k_{a3} = \min \begin{cases} 1 \\ \frac{a_{3,t}}{2d_c} \end{cases} \quad (34)$$

Der Mindestwert des Abstandes zum beanspruchten Hirnholzende $a_{3,t}$ ist:

$$a_{3,t,\min} = \max \begin{cases} 1,5d_c \\ 7d_b \\ 80\text{mm} \end{cases} \quad (35)$$

Der Modifikationsbeiwert für die Mittel- bzw. Seitenholzdicke ist für alle Einpreßdübeltypen einheitlich:

$$k_t = \min \begin{cases} 1 \\ \frac{t_1}{1,5h_c} \\ \frac{t_2}{2,5h_c} \end{cases} \quad (36)$$

mit

t_1 Seitenholzdicke,

t_2 Mittelholzdicke,

h_c Dübelhöhe bei zweiseitigen und zweifache Dübelhöhe bei einseitigen Einpreßdübeln.

Gleichung (36) gilt nur unter der Voraussetzung, daß t_1 und t_2 größer gleich $1,1 h_c$ bzw. $1,9 h_c$ sind.

3.4 Vergleichsrechnungen hinsichtlich Tragfähigkeit

3.4.1 Annahme des Verhältnisses zwischen charakteristischer Tragfähigkeit und zulässiger Belastung

Wie bei den Vergleichsrechnungen für Einlaßdübelverbindungen wird ein globaler Sicherheitskoeffizient von 2,28 aus charakteristischer Tragfähigkeit und zulässiger Belastung bei etwa gleichem Sicherheitsniveau angenommen (vgl. Kap. 2.4.1).

3.4.2 Vergleichsrechnungen mit Dübeltyp C unter Zugbeanspruchung

Annahmen:

- zweischichtige Dübelverbindung mit zweiseitigen Einpreßdübeln des Dübeltyps C,
- Belastung auf Zug parallel zur Faser ($\alpha = 0^\circ$),
- Holz der Sortierklasse S 10 / MS 10 mit einer charakteristischen Rohdichte $\rho_k = 380 \text{ kg/m}^3$,
- Endabstand zum beanspruchten Rand entsprechend der Mindestvorholzlänge nach DIN 1052, Teil 2, Tabelle 6,
- Holzdicken entsprechend den Mindestholzdicken nach DIN 1052, Teil 2, Tabelle 6 unter Berücksichtigung der Änderungen im Entwurf DIN 1052-2/A1.
- Schraubenbolzen der Güte 4.6 mit einem charakteristischen Wert der Zugfestigkeit $f_u = 400 \text{ N/mm}^2$.

Tabelle 15 Eingabedaten, berechnete charakteristische Tragfähigkeiten und Verhältnisse zwischen charakteristischen Tragfähigkeiten und zulässigen Belastungen $R_{j,0,k} / \text{zul } F$.

d_c (mm)	h_c (mm)	d_b (mm)	$a_{3,t}$ (mm)	$\min a_{3,e}$ (mm)	t_1 (mm)	$\min t_1$ (mm)	t_2 (mm)	$\min t_2$ (mm)	k_p	k_{e3}	k_t	$R_{c,k}$ (kN)	$f_{h,0,k}$ (N/mm ²)	$M_{j,k}$ (Nmm)	$R_{b,0,k}$ (kN)	$R_{j,0,k}$ (kN)	zul F (kN)	$\frac{R_{j,0,k}}{\text{zul } F}$
48	12,5	12	120	84	40	13,8	60	24	1,09	1,00	1,00	6,50	27,4	92160	7,09	13,6	5,0	2,72
62	16,0	12	120	84	40	17,6	60	30	1,09	1,00	1,00	9,54	27,4	92160	7,09	16,6	7,0	2,38
75	19,5	16	140	112	50	21,5	60	37	1,09	1,00	1,00	12,7	26,2	218453	11,9	24,6	9,0	2,73
95	24,0	16	140	112	50	26,4	80	46	1,09	0,98	1,00	17,8	26,2	218453	11,9	29,7	12,0	2,47
117	29,5	20	170	140	80	32,5	80	56	1,09	0,97	1,00	24,0	24,9	426667	19,9	43,9	16,0	2,74
140	31,0	24	200	168	80	34,1	80	59	1,09	0,95	1,00	30,8	23,7	737280	22,7	53,6	22,0	2,43
165	32,0	24	230	182	80	35,2	80	61	1,09	0,93	1,00	38,5	23,7	737280	22,7	61,2	30,0	2,04
Mittelwert:																	2,50	

Mit den Mindestwerten für Holzdicke und Endabstand nach DIN 1052, Teil 2 ergibt sich aus den Verhältnissen zwischen charakteristischen Tragfähigkeiten und zulässigen Belastungen ein Mittelwert von 2,50. Dies bedeutet, daß die Dübelverbindungen mit den hier getroffenen Annahmen etwas wirtschaftlicher sind als nach DIN 1052, Teil 2.

3.4.3 Vergleichsrechnungen mit Dübeltyp C und Variation des Kraft-Faser-Winkels

Annahmen 1:

- zweischneittige Dübelverbindung mit zweiseitigen Einpreßdübeln des Dübeltyps C,
- Belastung des Mittelholzes unter einem Winkel $\alpha = 30^\circ$ zur Faserrichtung und Belastung der Seitenhölzer auf Zug parallel zur Faser,
- Holz der Sortierklasse S 10 / MS 10 mit einer charakteristischen Rohdichte $\rho_k = 380 \text{ kg/m}^3$,
- Endabstand zum beanspruchten Rand entsprechend der Mindestvorholzlänge nach DIN 1052, Teil 2, Tabelle 6,
- Holzdicke entsprechend den Mindestholzdicke nach DIN 1052, Teil 2, Tabelle 6 unter Berücksichtigung der Änderungen im Entwurf DIN 1052-2/A1.
- Schraubenbolzen der Güte 4.6 mit einem charakteristischen Wert der Zugfestigkeit $f_u = 400 \text{ N/mm}^2$.

Tabelle 16 Eingabedaten, berechnete charakteristische Tragfähigkeiten des Dübels im Mittelholz und Verhältnisse zwischen charakteristischen Tragfähigkeiten und zulässigen Belastungen $R_{y,30,k} / \text{zul } F$.

d_z (mm)	h_c (mm)	d_b (mm)	$a_{3,t}$ (mm)	t_1 (mm)	t_2 (mm)	k_p	$k_{0,3}$	k_t	$R_{e,k}$ (kN)	k_{90}	$f_{h,30,k}$ (N/mm ²)	$M_{y,k}$ (Nmm)	$R_{b,30,k}$ (kN)	$R_{y,30,k}$ (kN)	zul F (kN)	$\frac{R_{y,30,k}}{\text{zul } F}$
48	12,5	12	120	40	60	1,09	1,00	1,00	6,50	1,53	24,2	92160	6,50	13,0	5,0	2,60
62	16,0	12	120	40	60	1,09	1,00	1,00	9,54	1,53	24,2	92160	6,50	16,0	7,0	2,29
75	19,5	16	140	50	60	1,09	1,00	1,00	12,7	1,59	22,8	218453	10,9	23,5	9,0	2,62
95	24,0	16	140	50	80	1,09	0,98	1,00	17,8	1,59	22,8	218453	10,9	28,6	12,0	2,39
117	29,5	20	170	80	80	1,09	0,97	1,00	24,0	1,65	21,4	426667	17,2	41,1	16,0	2,57
140	31,0	24	200	80	80	1,09	0,95	1,00	30,8	1,71	20,1	737280	19,3	50,1	22,0	2,28
165	32,0	24	230	80	80	1,09	0,93	1,00	38,5	1,71	20,1	737280	19,3	57,8	30,0	1,93
Mittelwert:															2,38	

Aus den Verhältnissen zwischen charakteristischen Tragfähigkeiten und zulässigen Belastungen ergibt sich ein Mittelwert von 2,38 für Beanspruchung unter einem Kraft-Faser-Winkel von 30° und den Mindestwerten für Holzdicke und Endabstand nach DIN 1052. Eine Bemessung nach Eurocode 5 führt hier also zu etwa derselben Dübelgröße und -anzahl wie nach DIN 1052.

Annahmen 2:

wie Annahmen 1, jedoch

- Belastung des Mittelholzes unter einem Winkel $\alpha = 60^\circ$ zur Faserrichtung und Belastung der Seitenhölzer auf Zug parallel zur Faser.

Tabelle 17 Eingabedaten, berechnete charakteristische Tragfähigkeiten des Dübels im Mittelholz und Verhältnisse zwischen charakteristischen Tragfähigkeiten und zulässigen Belastungen $R_{j,60,k} / \text{zul } F$.

d_c (mm)	h_c (mm)	d_b (mm)	t_1 (mm)	t_2 (mm)	k_p	k_t	$R_{c,t}$ (kN)	k_{90}	$f_{h,60,k}$ (N/mm ²)	$M_{y,k}$ (Nm)	$R_{b,60,k}$ (kN)	$R_{j,60,k}$ (kN)	zul F (kN)	$\frac{R_{j,60,k}}{\text{zul } F}$
48	12,5	12	40	60	1,09	1,00	6,50	1,53	19,6	92160	5,64	12,1	4,5	2,70
62	16,0	12	40	60	1,09	1,00	9,54	1,53	19,6	92160	5,64	15,2	6,5	2,34
75	19,5	16	50	60	1,09	1,00	12,7	1,59	18,2	218453	8,71	21,4	8,5	2,52
95	24,0	16	50	80	1,09	1,00	18,1	1,59	18,2	218453	9,36	27,5	11,0	2,50
117	29,5	20	80	80	1,09	1,00	24,7	1,65	16,8	426667	13,4	38,1	15,0	2,54
140	31,0	24	80	80	1,09	1,00	32,4	1,71	15,5	737280	14,8	47,2	20,0	2,36
165	32,0	24	80	80	1,09	1,00	41,4	1,71	15,5	737280	14,8	56,3	27,0	2,08
Mittelwert:													2,43	

Hier gelten dieselben Schlußfolgerungen wie für den Vergleich unter Zugrundelegung der Annahmen 1.

Annahmen 3:

wie Annahmen 1, jedoch

- Belastung des Mittelholzes unter einem Winkel $\alpha = 90^\circ$ zur Faserrichtung und Belastung der Seitenhölzer auf Zug parallel zur Faser.

Tabelle 18 Eingabedaten, berechnete charakteristische Tragfähigkeiten des Dübels im Mittelholz und Verhältnisse zwischen charakteristischen Tragfähigkeiten und zulässigen Belastungen $R_{j,90,k} / \text{zul } F$.

d_c (mm)	h_c (mm)	d_b (mm)	t_1 (mm)	t_2 (mm)	k_p	k_i	$R_{c,k}$ (kN)	k_{90}	$f_{h,90,k}$ (N/mm ²)	$M_{y,k}$ (Nmm)	$R_{b,90,k}$ (kN)	$R_{j,90,k}$ (kN)	zul F (kN)	$\frac{R_{j,90,k}}{\text{zul } F}$
48	12,5	12	40	60	1,09	1,00	6,50	1,53	17,9	92160	5,32	11,8	4,5	2,63
62	16,0	12	40	60	1,09	1,00	9,54	1,53	17,9	92160	5,32	14,9	6,0	2,48
75	19,5	16	50	60	1,09	1,00	12,7	1,59	16,5	218453	7,90	20,6	8,0	2,57
95	24,0	16	50	80	1,09	1,00	18,1	1,59	16,5	218453	8,81	26,9	10,5	2,56
117	29,5	20	80	80	1,09	1,00	24,7	1,65	15,1	426667	12,1	36,8	14,0	2,63
140	31,0	24	80	80	1,09	1,00	32,4	1,71	13,9	737280	13,3	45,7	18,5	2,47
165	32,0	24	80	80	1,09	1,00	41,4	1,71	13,9	737280	13,3	54,7	24,0	2,28
Mittelwert:													2,52	

Aus den Verhältnissen zwischen charakteristischen Tragfähigkeiten und zulässigen Belastungen ergibt sich ein Mittelwert von 2,52 für Beanspruchung unter einem Kraft-Faser-Winkel von 90° und den Mindestholzdicken und Mindestabständen nach DIN 1052. Eine Bemessung nach Eurocode 5 ist hier also etwas wirtschaftlicher als nach DIN 1052.

3.4.5 Vergleichsrechnungen mit Dübeltyp D unter Zugbeanspruchung

Annahmen:

- zweischichtige Dübelverbindung mit zweiseitigen Einpreßdübeln des Dübeltyps D,
- Belastung auf Zug parallel zur Faser ($\alpha = 0^\circ$),
- Holz der Sortierklasse S 10 / MS 10 mit einer charakteristischen Rohdichte $\rho_k = 380 \text{ kg/m}^3$,
- Endabstand zum beanspruchten Rand entsprechend der Mindestvorholzlänge nach DIN 1052, Teil 2, Tabelle 7,
- Holzdicken entsprechend den Mindestholzdicken nach DIN 1052, Teil 2, Tabelle 7 unter Berücksichtigung der Änderungen im Entwurf DIN 1052-2/Al.
- Schraubenbolzen der Güte 4.6 mit einem charakteristischen Wert der Zugfestigkeit $f_u = 400 \text{ N/mm}^2$.

Tabelle 20 Eingabedaten, berechnete charakteristische Tragfähigkeiten und Verhältnisse zwischen charakteristischen Tragfähigkeiten und zulässigen Belastungen $R_{f,0,k} / \text{zul } F$.

d_c (mm)	h_c (mm)	d_b (mm)	$a_{3,t}$ (mm)	$\min a_{3,t}$ (mm)	t_1 (mm)	$\min t_1$ (mm)	t_2 (mm)	$\min t_2$ (mm)	k_p	k_{e3}	k_t	$R_{c,k}$ (kN)	$f_{h,0,k}$ (N/mm ²)	$M_{p,k}$ (Nmm)	$R_{b,0,k}$ (kN)	$R_{f,0,k}$ (kN)	zul F (kN)	$\frac{R_{f,0,k}}{\text{zul } F}$
50	27	12	120	84	40	29,7	60	51	1,09	1,00	0,89	10,2	27,4	92160	7,09	17,3	8,0	2,17
65	27	16	140	112	40	29,7	60	51	1,09	1,00	0,89	15,2	26,2	218453	11,1	26,3	11,5	2,29
80	27	20	170	140	50	29,7	80	51	1,09	1,00	1,00	23,3	24,9	426667	16,9	40,2	17,0	2,36
95	27	24	200	168	60	29,7	80	51	1,09	1,00	1,00	30,2	23,7	737280	22,7	52,9	21,0	2,52
115	27	24	230	173	60	29,7	80	51	1,09	1,00	1,00	40,2	23,7	737280	22,7	62,9	27,0	2,33
Mittelwert:																		2,33

3.4.6 Vergleichsrechnungen mit Dübeltyp D und Variation des Kraft-Faser-Winkels

Annahmen 1:

- zweischmittige Dübelverbindung mit zweiseitigen Einpreßdübeln des Dübeltyps D,
- Belastung des Mittelholzes unter einem Winkel $\alpha = 30^\circ$ zur Faserrichtung und Belastung der Seitenhölzer auf Zug parallel zur Faser,
- Holz der Sortierklasse S 10 / MS 10 mit einer charakteristischen Rohdichte $\rho_k = 380 \text{ kg/m}^3$,
- Endabstand zum beanspruchten Rand entsprechend der Mindestvorholzlänge nach DIN 1052, Teil 2, Tabelle 7,
- Holzdicke entsprechend den Mindestholzdicke nach DIN 1052, Teil 2, Tabelle 7 unter Berücksichtigung der Änderungen im Entwurf DIN 1052-2/A1.
- Schraubenbolzen der Güte 4.6 mit einem charakteristischen Wert der Zugfestigkeit $f_u = 400 \text{ N/mm}^2$.

Tabelle 21 Eingabedaten, berechnete charakteristische Tragfähigkeiten des Dübels im Mittelholz und Verhältnisse zwischen charakteristischen Tragfähigkeiten und zulässigen Belastungen $R_{j,30,k} / \text{zul } F$.

d_c (mm)	h_c (mm)	d_b (mm)	$a_{3,t}$ (mm)	t_1 (mm)	t_2 (mm)	k_p	k_{a3}	k_t	$R_{c,k}$ (kN)	k_{90}	$f_{h,30,k}$ (N/mm ²)	$M_{j,k}$ (Nmm)	$R_{b,30,k}$ (kN)	$R_{j,30,k}$ (kN)	$\text{zul } F$ (kN)	$\frac{R_{j,30,k}}{\text{zul } F}$
50	27	12	120	40	60	1,09	1,00	0,89	10,2	1,53	24,2	92160	6,50	16,7	8,0	2,09
65	27	16	140	40	60	1,09	1,00	0,89	15,2	1,59	22,8	218453	10,2	25,4	11,5	2,21
80	27	20	170	50	80	1,09	1,00	1,00	23,3	1,65	21,4	426667	15,4	38,7	17,0	2,28
95	27	24	200	60	80	1,09	1,00	1,00	30,2	1,71	20,1	737280	19,3	49,5	21,0	2,36
115	27	24	230	60	80	1,09	1,00	1,00	40,2	1,71	20,1	737280	19,3	59,5	27,0	2,20
Mittelwert:															2,23	

Aus den Verhältnissen zwischen charakteristischen Tragfähigkeiten und zulässigen Belastungen ergibt sich ein Mittelwert von 2,23 für Beanspruchung unter einem Kraft-Faser-Winkel von 30° und den Mindestwerten für Holzdicke und Endabstand nach DIN 1052. Dies entspricht praktisch dem abgeschätzten globalen Sicherheitsbeiwert.

Annahmen 2:

wie Annahmen 1, jedoch

- Belastung des Mittelholzes unter einem Winkel $\alpha = 60^\circ$ zur Faserrichtung und Belastung der Seitenhölzer auf Zug parallel zur Faser.

Tabelle 22 Eingabedaten, berechnete charakteristische Tragfähigkeiten des Dübels im Mittelholz und Verhältnisse zwischen charakteristischen Tragfähigkeiten und zulässigen Belastungen $R_{j,60,k} / \text{zul } F$.

d_c (mm)	h_c (mm)	d_b (mm)	t_1 (mm)	t_2 (mm)	k_p	k_t	$R_{c,k}$ (kN)	k_{90}	$f_{h,60,k}$ (N/mm ²)	$M_{y,k}$ (Nmm)	$R_{b,60,k}$ (kN)	$R_{j,60,k}$ (kN)	zul F (kN)	$\frac{R_{j,60,k}}{\text{zul } F}$
50	27	12	40	60	1,09	0,89	10,2	1,53	19,6	92160	5,64	15,9	7,5	2,12
65	27	16	40	60	1,09	0,89	15,2	1,59	18,2	218453	8,71	23,9	11,0	2,17
80	27	20	50	80	1,09	1,00	23,3	1,65	16,8	426667	13,4	36,7	16,0	2,29
95	27	24	60	80	1,09	1,00	30,2	1,71	15,5	737280	14,8	45,0	19,5	2,31
115	27	24	60	80	1,09	1,00	40,2	1,71	15,5	737280	14,8	55,0	24,5	2,25
Mittelwert:													2,23	

Annahmen 3:

wie Annahmen 1, jedoch

- Belastung des Mittelholzes unter einem Winkel $\alpha = 90^\circ$ zur Faserrichtung und Belastung der Seitenhölzer auf Zug parallel zur Faser.

Tabelle 23 Eingabedaten, berechnete charakteristische Tragfähigkeiten des Dübels im Mittelholz und Verhältnisse zwischen charakteristischen Tragfähigkeiten und zulässigen Belastungen $R_{j,90,k} / \text{zul } F$.

d_c (mm)	h_c (mm)	d_b (mm)	t_1 (mm)	t_2 (mm)	k_p	k_t	$R_{c,k}$ (kN)	k_{90}	$f_{h,90,k}$ (N/mm ²)	$M_{y,k}$ (Nmm)	$R_{b,90,k}$ (kN)	$R_{j,90,k}$ (kN)	zul F (kN)	$\frac{R_{j,90,k}}{\text{zul } F}$
50	27	12	40	60	1,09	0,89	10,2	1,53	17,9	92160	5,32	15,6	7,0	2,22
65	27	16	40	60	1,09	0,89	15,2	1,59	16,5	218453	7,90	23,1	10,0	2,31
80	27	20	50	80	1,09	1,00	23,3	1,65	15,1	426667	12,1	35,4	14,5	2,44
95	27	24	60	80	1,09	1,00	30,2	1,71	13,9	737280	13,3	43,5	17,5	2,48
115	27	24	60	80	1,09	1,00	40,2	1,71	13,9	737280	13,3	53,5	21,5	2,49
Mittelwert:													2,39	

Aus den Verhältnissen zwischen charakteristischen Tragfähigkeiten und zulässigen Belastungen ergibt sich ein Mittelwert von 2,39 für Beanspruchung unter einem Kraft-Faser-Winkel von 90° und den Mindestwerten für Holzdicke und Endabstand nach DIN 1052.

3.4.7 Vergleichsrechnungen mit Dübeltyp D unter Druckbeanspruchung

Annahmen:

- zweischrittige Dübelverbindung mit zweiseitigen Einpressdübeln des Dübeltyps D,
- Belastung auf Druck parallel zur Faser ($\alpha = 180^\circ$),
- Holz der Sortierklasse S 10 / MS 10 mit einer charakteristischen Rohdichte $\rho_k = 380 \text{ kg/m}^3$,
- Endabstand zum unbeanspruchten Rand entsprechend der halben Mindestvorholzlänge nach DIN 1052, Teil 2, Tabelle 7,
- Holzdicken entsprechend den Mindestholzdicken nach DIN 1052, Teil 2, Tabelle 7 unter Berücksichtigung der Änderungen im Entwurf DIN 1052-2/A1.
- Schraubenholzen der Güte 4.6 mit einem charakteristischen Wert der Zugfestigkeit $f_u = 400 \text{ N/mm}^2$.

Tabelle 24 Eingabedaten, berechnete charakteristische Tragfähigkeiten und Verhältnisse zwischen charakteristischen Tragfähigkeiten und zulässigen Belastungen $R_{f,180,k} / \text{zul } F$.

d_c (mm)	h_c (mm)	d_b (mm)	$a_{3,c}$ (mm)	$\min a_{3,c}!$ (mm)	t_1 (mm)	t_2 (mm)	k_ρ	k_t	$R_{c,k}$ (kN)	k_{90}	$f_{h,180,k}$ (N/mm ²)	$M_{y,k}$ (Nmm)	$R_{b,180,k}$ (kN)	$R_{f,180,k}$ (kN)	zul F (kN)	$\frac{R_{f,180,k}}{\text{zul } F}$
50	27	12	60	60	40	60	1,09	0,89	10,2	1,53	27,4	92160	7,09	17,3	8,0	2,17
65	27	16	70	78	40	60	1,09	0,89	15,2	1,59	26,2	218453	11,1	26,3	11,5	2,29
80	27	20	85	96	50	80	1,09	1,00	23,3	1,65	24,9	426667	16,9	40,2	17,0	2,36
95	27	24	100	114	60	80	1,09	1,00	30,2	1,71	23,7	737280	22,7	52,9	21,0	2,52
115	27	24	115	138	60	80	1,09	1,00	40,2	1,71	23,7	737280	22,7	62,9	27,0	2,33
Mittelwert:															2,33	

Die in DIN 1052, Teil 2 gegebenen Mindestwerte für den Endabstand zum unbeanspruchten Rand sind nach dem neuen Berechnungsverfahren nur noch für den kleinsten Dübeldurchmesser $d_c = 50 \text{ mm}$ zulässig. Für größere Dübeldurchmesser müssen die Endabstände auf $1,2 d_c$ vergrößert werden. Aus den Verhältnissen zwischen charakteristischen Tragfähigkeiten und zulässigen Belastungen ergibt sich dann ein Mittelwert von 2,33 für Druckbeanspruchung und die Mindestholzdicken nach DIN 1052.

3.5 Vergleichsrechnungen hinsichtlich Steifigkeit

3.5.1 Berechnung der Verschiebungsmoduln nach dem vorgeschlagenen Berechnungsverfahren

Für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit ergibt sich der Verschiebungsmodul K_{ser} in Abhängigkeit vom Dübeldurchmesser d_c und der charakteristischen Rohdichte des Holzes ρ_k für Verbindungen mit Einpreßdübeln des Dübeltyps C nach DIN 1052, Teil 2 zu $K_{ser} = 0,3 d_c \rho_k$ und für Verbindungen mit Einpreßdübeln des Dübeltyps D nach DIN 1052, Teil 2 zu $K_{ser} = 0,45 d_c \rho_k$. Der für den Nachweis der Tragfähigkeit bei zusammengesetzten Querschnitten verwendete Verschiebungsmodul K_u beträgt zwei Drittel des entsprechenden Wertes von K_{ser} .

3.5.2 Berechnung der Verschiebungsmoduln nach DIN 1052

Für Nachweise der Gebrauchstauglichkeit dürfen die in DIN 1052, Teil 2, Tabelle 13 angegebenen Verschiebungsmoduln ($C_{1,Gebr.}$ in Tabelle 25 bzw. 26 unten) verwendet werden, mindestens jedoch die 1,25-fachen Werte der Verschiebungsmoduln ($C_{2,Gebr.}$ in Tabelle 25 bzw. 26 unten) für Nachweise der Tragfähigkeit von nachgiebig zusammengesetzten Querschnitten nach DIN 1052, Teil 1, Tabelle 8 ($C_{Tragf.}$ in Tabelle 25 bzw. 26 unten).

3.5.3 Vergleichsrechnungen

Annahmen 1:

- Dübelverbindung mit zweiseitigen Einpreßdübeln des Dübeltyps C,
- Belastung auf Zug parallel zur Faser ($\alpha = 0^\circ$),
- Holz der Sortierklasse S 10 / MS 10 mit einer charakteristischen Rohdichte $\rho_k = 380 \text{ kg/m}^3$.

Tabelle 25 Eingabedaten, berechnete Verschiebungsmoduln und Verhältnisse zwischen den Verschiebungsmoduln nach dem vorgeschlagenen Berechnungsverfahren und nach DIN 1052.

d_c (mm)	Nachweise der Gebrauchstauglichkeit			$\frac{K_{ser}}{\max C_{Gebr.}}$	Nachweise der Tragfähigkeit		$\frac{K_u}{C_{Tragf.}}$
	Berechnungsvorschlag K_{ser} (kN/mm)	DIN 1052			Berechnungsvorschlag K_u (kN/mm)	DIN 1052 $C_{Tragf.}$ (kN/mm)	
		$C_{1,Gebr.}$ (kN/mm)	$C_{2,Gebr.}$ (kN/mm)				
48	5,47	5,0	18,8	0,29	3,65	15,0	0,24
62	7,07	7,0	18,8	0,38	4,71	15,0	0,31
75	8,55	9,0	18,8	0,46	5,70	15,0	0,38
95	10,8	12,0	18,8	0,58	7,22	15,0	0,48
117	13,3	16,0	18,8	0,71	8,89	15,0	0,59
140	16,0	22,0	28,1	0,57	10,6	22,5	0,47
165	18,8	30,0	28,1	0,63	12,5	22,5	0,56
Mittelwert:				0,52	Mittelwert:		0,43

Annahmen 2:

- Dübelverbindung mit zweiseitigen Einpreßdübeln des Dübeltyps D,
- Belastung auf Zug parallel zur Faser ($\alpha = 0^\circ$),
- Holz der Sortierklasse S 10 / MS 10 mit einer charakteristischen Rohdichte $\rho_k = 380 \text{ kg/m}^3$.

Tabelle 26 Eingabedaten, berechnete Verschiebungsmoduln und Verhältnisse zwischen den Verschiebungsmoduln nach dem vorgeschlagenen Berechnungsverfahren und nach DIN 1052.

d_c (mm)	Nachweise der Gebrauchstauglichkeit			$\frac{K_{ser}}{\max C_{Gehr.}}$	Nachweise der Tragfähigkeit		$\frac{K_u}{C_{Tragf.}}$
	Berechnungs- vorschlag K_{ser} (kN/mm)	DIN 1052 $C_{1,Gehr.}$ (kN/mm) $C_{2,Gehr.}$ (kN/mm)			Berechnungs- vorschlag K_u (kN/mm)	DIN 1052 $C_{Tragf.}$ (kN/mm)	
50	8,55	8,00	18,8	0,46	5,70	15,0	0,38
65	11,1	11,5	18,8	0,59	7,41	15,0	0,49
80	13,7	17,0	28,1	0,49	9,12	22,5	0,41
95	16,2	21,0	28,1	0,58	10,8	22,5	0,48
115	19,7	27,0	28,1	0,70	13,1	22,5	0,58
Mittelwert:				0,56	Mittelwert:		0,47

Die Verschiebungsmoduln sowohl für Gebrauchstauglichkeitsnachweise als auch für Tragfähigkeitsnachweise ergeben sich nach dem vorgeschlagenen Berechnungsverfahren für Verbindungen mit beiden untersuchten Einpreßdübeltypen um rund 50% kleiner als nach DIN 1052. Dies bedeutet, daß die damit berechneten Verschiebungen ungefähr doppelt so groß werden.

4 Zusammenfassung

Von einer Arbeitsgruppe des CEN/TC 124 wurden Rechenmodelle zur Bestimmung charakteristischer Tragfähigkeiten für Verbindungen mit Ringdübeln oder Scheibendübeln (einseitige Einlaßdübel) sowie für Verbindungen mit Einpreßdübeln entwickelt. Innerhalb der Arbeitsgruppe wurden außerdem Verschiebungsmoduln für die Nachweise der Gebrauchstauglichkeit und für Nachweise der Tragfähigkeit nachgiebig zusammengesetzter Querschnitte bestimmt. Um Aussagen über die Sicherheit und Wirtschaftlichkeit der mit den entsprechenden Rechenmodellen berechneten Tragfähigkeiten und Steifigkeiten machen zu können, wurden die Werte den in DIN 1052 gegebenen zulässigen Belastungen und Verschiebungsmoduln gegenübergestellt.

Die Vergleichsrechnungen zeigen, daß die Bemessung von Verbindungen mit Dübeln besonderer Bauart nach DIN 1052 bzw. Eurocode 5 zu etwa denselben Ergebnissen führt, wenn die in der Arbeitsgruppe CEN/TC 124/WG4 vorgeschlagenen Mindestdicken der Hölzer und die entsprechenden Mindestwerte der Dübelabstände untereinander und zum Rand eingehalten werden. Dies bedeutet in wenigen Fällen einen größeren Mindestquerschnitt als bisher in DIN 1052 vorgesehen.

Die Vergleiche der Verschiebungsmoduln ergaben für die Einlaßdübel etwa die gleichen Werte nach beiden Vorschriften, für Einpreßdübel ergeben sich nach den europäischen Normentwürfen etwa die doppelten Werte.

5 Literatur

- BLAß, H.J., EHLBECK, J. UND SCHLAGER, M. (1993). Characteristic strength of tooth-plate connector joints. Holz als Roh- und Werkstoff 51: 395-399.
- BLAß, H.J., EHLBECK, J. UND SCHLAGER, M. (1994). Strength and stiffness of ring and shear-plate connections. Holz als Roh- und Werkstoff 52: 71-76.
- BLAß, H.J. (1995). Verbindungen mit Einlaßdübeln. Holzbauwerke STEP 1, Fachverlag Holz der Arbeitsgemeinschaft Holz e.V., Düsseldorf.
- BLAß, H.J. (1995). Verbindungen mit Einpreßdübeln. Holzbauwerke STEP 1, Fachverlag Holz der Arbeitsgemeinschaft Holz e.V., Düsseldorf.
- HILSON, B.O. (1969 a). The behaviour of softwoods loaded in compression parallel to the grain and supported against lateral movement. Journal of the Inst. of Wood Science 4 (4): 11-23.
- HILSON, B.O. (1969 b). The ultimate strength of timber joints with split-ring connectors when loaded parallel to the grain. Journal of the Inst. of Wood Science 4 (11): 6-26.
- KUIPERS, J. und Vermeyden, P. (1964). Research on timber joints in the Netherlands. Rapport 4-64-15, Onderzoek v-7, Stevin-Laboratorium, Technische Hogeschool Delft, Niederlande.
- SCHOLTEN, J.A. (1944). Timber-Connector Joints - Their Strength and Design. Technical Bulletin No. 865, USDA Forest Service, Washington, D.C., USA.

Zitierte Normen, Vornormen und Normentwürfe

- | | |
|--|---|
| DIN 1052 Teil 1, April 1988 | Holzbauwerke, Berechnung und Ausführung. |
| DIN 1052 Teil 2, April 1988 | Holzbauwerke, Mechanische Verbindungen. |
| Entwurf DIN 1052-1/A1, Juni 1995 | Holzbauwerke, Teil 1: Berechnung und Ausführung, Änderung 1. |
| Entwurf DIN 1052-2/A1, Juni 1995 | Holzbauwerke, Teil 2: Mechanische Verbindungen, Änderung 1. |
| Entwurf prEN 912, Oktober 1992 | Holzverbindungsmittel - Spezifikationen für Dübel besonderer Bauart für Holz. |
| DIN EN 26891, Juli 1991 | Holzbauwerke; Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln, Allgemeine Grundsätze für die Ermittlung der Tragfähigkeit und des Verformungsverhaltens. |
| DIN V ENV 1995 Teil 1-1, Juni 1994 | Eurocode 5: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holztragwerken, Teil 1: Allgemeine Bemessungsregeln, Bemessungsregeln für den Hochbau. |
| Richtlinie zur Anwendung von DIN V ENV 1995-1-1, Februar 1995 - Nationales Anwendungsdokument (NAD). | |