

## Tragfähigkeit von Stabdübelverbindungen

François Colling, Hans-Joachim Blaß

### Zusammenfassung

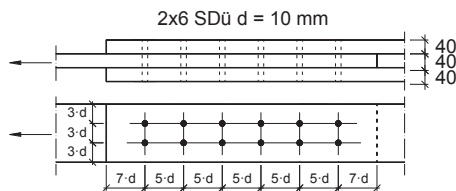
Insgesamt 1588 verfügbare Versuche aus 7 verschiedenen Forschungsarbeiten wurden zusammenfassend ausgewertet. Die Untersuchungen deuten darauf hin, dass die nach „alter“ DIN 1052 berechneten zulässigen Werte um etwa 20 – 25% überschätzt waren und entsprechend unter dem heute geforderten Sicherheitsniveau lagen. Weiterhin zeigten die Auswertungen, dass eine Berechnung der Tragfähigkeit nach Eurocode 5 als konservativ angesehen kann und noch „Luft“ für höhere rechnerische Tragfähigkeiten besteht. So konnte anhand von Versuchen mit aus verschiedenen Holzbaubetrieben entnommenen Stabdübeln eine modifizierte Gleichung für das Fließmoment  $M_y$  abgeleitet werden, die insbesondere bei Stabdübeln mit größeren Durchmessern höhere rechnerische Tragfähigkeiten ergibt. Diese Versuche zeigten auch, dass die vorhandenen Stahlfestigkeiten z.T. deutlich über den zugehörigen Nennfestigkeiten liegen. Weiterhin zeigten die Untersuchungen, dass bei Stabdübelverbindungen, bei denen sich im Versagensfall (ein oder) zwei Fließgelenke ausbilden, ein zusätzlicher „Schlankheitseffekt“ im Sinne einer pauschalen Tragfähigkeitssteigerung angesetzt werden könnte. Unter Anwendung dieser drei Erkenntnisse können die Unterschiede zwischen DIN 1052-„alt“ und EC 5 zumindest zu großen Teilen erklärt werden.

## 1 Ausgangslage

In Fachkreisen wird immer noch intensiv darüber diskutiert, dass die rechnerischen Tragfähigkeiten von Verbindungen mit Stabdübeln nach DIN 1052:2008 und Eurocode 5 z.T. erheblich geringer sind als nach DIN 1052:1988 (nachfolgend mit DIN 1052-„alt“ bezeichnet).

Bei der Überprüfung bestehender Tragwerke ergeben sich z.T. erhebliche rechnerische Überschreitungen der Bemessungswerte der Tragfähigkeit. Dies wird nachfolgend an zwei Beispielen aufgezeigt.

**Beispiel 1:** Verbindung mit geringer Schlankheit. NKL 2, KLED = mittel.  $F_{g,k} = F_{p,k} = 20 \text{ kN}$ .



Nach „alter“ DIN 1052 dürfen bis zu 6 hintereinander liegende Verbindungsmittel als voll wirksam angenommen werden. Es dürfen daher alle SDÜ ( $2 \cdot 6 = 12$ ) als voll tragend angenommen werden.

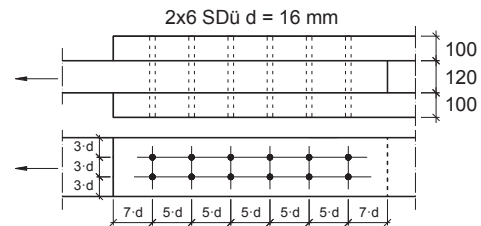
Nach Eurocode 5 dürfen wegen der bei hintereinander liegenden Verbindungsmitteln bestehenden Spaltgefahr nicht alle Verbindungsmittel vollständig angesetzt werden. Die rechnerisch wirksame Anzahl SDÜ ergibt sich im vorliegenden Fall mit  $a_1 = 5 \cdot d$  zu  $2 \cdot 3,95 = 7,9$ .

Nachfolgend sind die rechnerischen Ausnutzungsgrade für eine Bemessung nach DIN 1052-„alt“ und Eurocode 5 angegeben:

DIN 1052-„alt“:  $\eta = 0,98 < 1 \quad \checkmark$

Eurocode 5:  $\eta = 1,26 > 1 \quad !$

**Beispiel 2:** Schlanke Verbindung. NKL 2, KLED = mittel.  $F_{g,k} = F_{p,k} = 76 \text{ kN}$



Für diesen Fall ergeben sich folgende Ausnutzungsgrade:

DIN 1052-„alt“:  $\eta = 0,97 < 1 \quad \checkmark$

Eurocode 5:  $\eta = 1,83 \gg 1 \quad !$

Setzt man voraus, dass das Berechnungsmodell des Eurocode 5 (Johansen-Theorie) korrekt ist, führen die oben gezeigten Beispiele zu dem Schluss, dass bei Verbindungen, die nach „alter“ DIN 1052 berechnet wurden, teilweise erhebliche Sicherheitsdefizite bestehen.

Da Stabdübelverbindungen aber nicht besonders schadens auffällig sind, was auf eine Überschätzung der Stabdübeltragfähigkeiten in der Vergangenheit zurückzuführen wäre, wurde vom DIBt ein Forschungsvorhaben in Auftrag gegeben, in dessen Rahmen das Tragverhalten von Stabdübelverbindungen nochmals umfassend untersucht und bewertet werden sollte. Die Ergebnisse dieses Vorhabens sind nachfolgend zusammengefasst.

## 2 DIN-„alt“ – EC 5

In einem ersten Schritt wurde durch Vergleichsrechnungen untersucht, in welchen Fällen größere Unterschiede zwischen den berechneten Tragfähigkeiten nach DIN 1052-„alt“ und Eurocode 5 bestehen.

### 2.1 Berechnungsgrundlagen

Da die beiden Bemessungsnormen auf unterschiedlichen Sicherheitskonzepten aufbauen, wurden im Hinblick auf eine Vergleichbarkeit der berechneten Tragfähigkeiten folgende Annahmen getroffen:

- Für die Lastseite wurde eine pauschale Erhöhung der Einwirkungen von  $\gamma_{G/Q} = 1,4$  angesetzt.

- Für die Widerstandsseite wurde die Nutzungs-kategorie 1/2 und eine Klasse der Lasteinwirkungs-dauer KLED = mittel angenommen. Dies ent-spricht einem  $k_{mod}$  – Wert von 0,8.

Mit diesen Annahmen wurde für die Tragfähigkeiten nach Eurocode 5 ein Vergleichswert  $R_{vgl}$  berechnet, der direkt mit der zulässigen Belastung  $zul N_{St}$  nach DIN 1052-„alt“ verglichen werden kann:

$$R_{vgl} = \frac{k_{mod}}{\gamma_M} \cdot \frac{F_{v,Rk}}{\gamma_{G/Q}} = 0,44 \cdot F_{v,Rk} \leftrightarrow zul N_{St}$$

### 2.2 Ergebnisse

Für den Fall eines einzelnen Verbindungsmittels zeigten die Vergleichsrechnungen, dass bei Stabdübeln mit kleinen Durchmessern und geringen Schlankheiten  $\lambda$  (= Verhältnis Holzdicke/ Durchmesser) die berechneten Vergleichswerte nach Eurocode 5 z.T. deutlich über denen nach DIN 1052-„alt“ liegen. In Abb. 1 ist dies dargestellt.

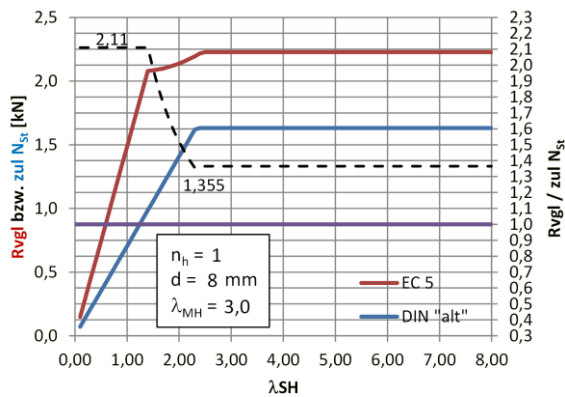


Abb. 1 Vergleich der SDÜ-Tragfähigkeiten nach DIN 1052-„alt“ (zul  $N_{St}$ ) und Eurocode 5 ( $R_{vgl}$ ) Gestrichelte Linie:  $R_{vgl} / zul N_{St}$

Bei größeren Durchmessern und Schlankheiten liegen die nach Eurocode 5 berechneten Vergleichswerte jedoch z.T. deutlich unter den zulässigen Werten nach DIN 1052-„alt“ (siehe Abb. 2).

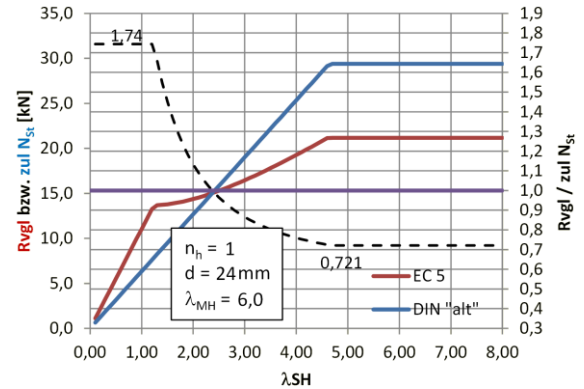


Abb. 2 SDÜ-Tragfähigkeiten nach DIN 1052-„alt“ (zul  $N_{St}$ ) und Eurocode 5 ( $R_{vgl}$ )

Bei Anschlüssen mit mehreren hintereinander liegenden Verbindungsmitteln greift die nach Eurocode 5 erforderliche Abminderung wegen der gegebenen Spaltgefahr, was zu einer gravierenden Verschiebung zu Ungunsten der Vergleichswerte nach Eurocode 5 führt. Dies ist in den nachfolgenden Abb. 3 und Abb. 4 am Beispiel von 6 hintereinander liegenden Stabdübeln dargestellt.

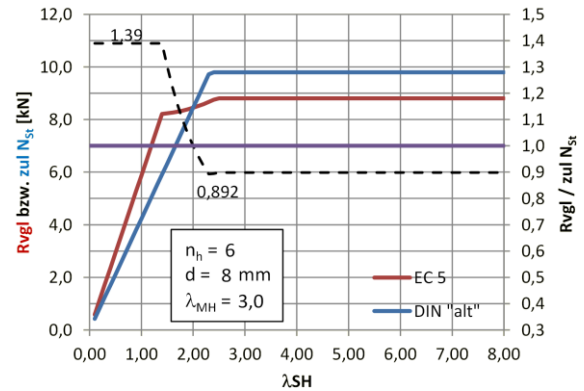


Abb. 3 SDÜ-Tragfähigkeiten nach DIN 1052-„alt“ (zul  $N_{St}$ ) und Eurocode 5 ( $R_{vgl}$ )

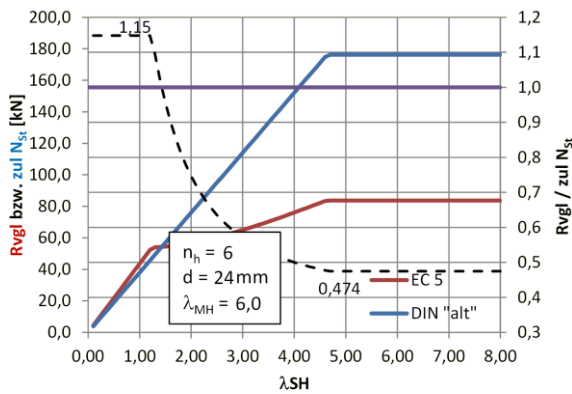


Abb. 4 SDÜ-Tragfähigkeiten nach DIN 1052-„alt“ (zul  $N_{St}$ ) und Eurocode 5 ( $R_{Vgl}$ )

Aus Abb. 4 ist zu erkennen, dass schlanke Verbindungen mit Stabdübeln größerer Durchmesser nach dem Eurocode 5 rechnerisch nur noch halb soviel tragen wie nach „alter“ DIN 1052 (Verhältniswert  $R_{Vgl}/zul N_{St} = 0,474 < 0,5!$ ).

### 2.3 Fazit

Die Vergleichsrechnungen zeigten somit, dass die Unterschiede zwischen den nach DIN 1052-„alt“ und EC 5 berechneten Tragfähigkeiten mit zunehmendem Durchmesser der Stabdübel und zunehmender Schlankheit (= Verhältnis Holzdicke/Durchmesser) größer werden.

## 3 Versuchsdaten

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden Versuchsergebnisse aus insgesamt 7 Quellen (siehe [3] bis [9]) zusammengestellt und umfassend ausgewertet.

### 3.1 Eckdaten

Insgesamt wurden 1588 Versuche ausgewertet, davon 1045 Holz-Holz-Verbindungen und 543 Stahlblech-Holz-Verbindungen. In Abb. 5 sind die Versuchszahlen mit den zugehörigen Quellen angegeben. Von diesen Prüfkörpern wurden insgesamt 988 in Zugscherversuchen geprüft, 600 in Druckscherversuchen.

Die Schlankheiten  $\lambda_{SH}$  der Seitenhölzer (= Seitenholzdicke / Stabdübeldurchmesser) der Prüfkörper variierten dabei zwischen 1,0 und 7,5 (Abb. 6). Aus diesem Bild ist zu erkennen, dass bei Holz-Holz-Verbindungen vornehmlich Verbindungen mit Seitenholzschlankheiten von  $\lambda_{SH} < 5$  geprüft wurden.

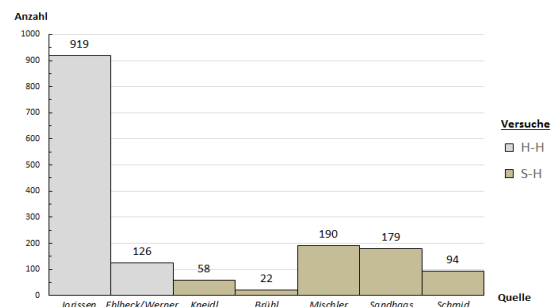


Abb. 5 Ausgewertete Versuche mit Quellen

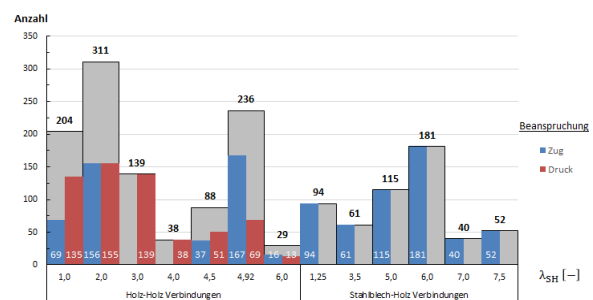


Abb. 6 Schlankheiten der Seitenhölzer der Prüfkörper

Abb. 7 zeigt, dass die überwiegende Anzahl der Versuche mit Stabdübeln  $d = 12$  mm durchgeführt wurde.

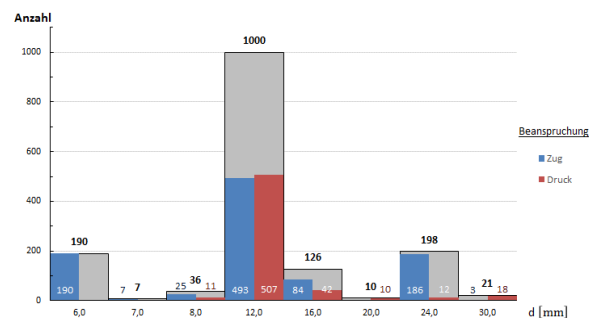


Abb. 7 Durchmesser

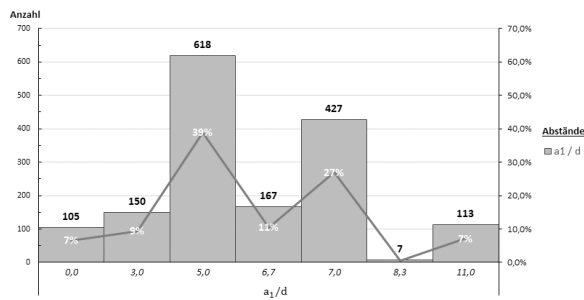


Abb. 8 Abstände  $a_1$

Die Abstände  $a_1$  der Stabdübel untereinander in Faserrichtung variierte zwischen  $3 \cdot d$  und  $11 \cdot d$  (Abb. 8).

In Abb. 9 ist dargestellt, dass die Zugfestigkeit der geprüften Stabdübel z.T. deutlich über der nominalen Zugfestigkeit für die Stahlgüte S 235 ( $360 \text{ N/mm}^2$ ) lag.

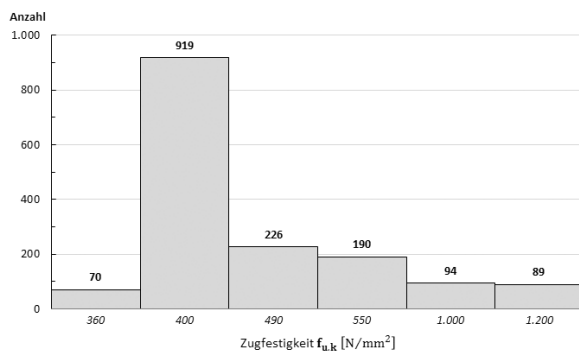


Abb. 9 Zugfestigkeiten der SDü

Auf das Thema Stahlfestigkeiten wird in Abschnitt 4.2 noch näher eingegangen.

Abb. 10 gibt einen Überblick über die Anzahl der nebeneinander ( $n_n$ ) und hintereinander ( $n_h$ ) liegenden Verbindungsmittel.

Nur in den Arbeiten [4] und [6] wurden vergleichende Versuche mit versetzt und nicht versetzter Anordnung der Stabdübel durchgeführt. Hierbei wurden insgesamt 4 Versuchsreihen mit Holz-Holz-Verbindungen (12x versetzt, 20x nicht versetzt) und 5 Versuchsreihen mit Stahlblech-Holz-Verbindungen (24x versetzt, 23x nicht versetzt) geprüft.

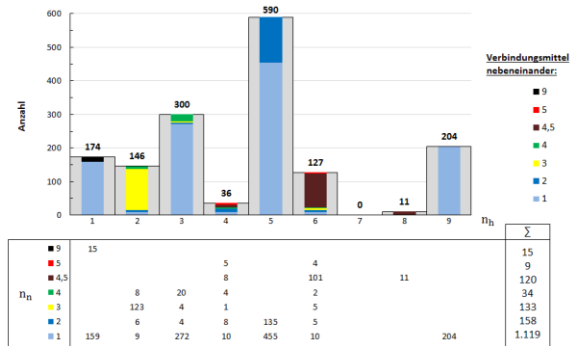


Abb. 10 Anzahl der SDü in einem Anschluss

### 3.2 Ausgeschlossene Werte

Bei den nachfolgend beschriebenen Auswertungen wurden Versuche mit Randbedingungen ausgeschlossen, die entweder zu einer Verletzung der Anforderungen der Bemessungsnormen führen oder untypische Situationen wie sehr geringe Seitenholzschlankheit oder Laubholzverwendung erfassen:

- Abstände der SDü in Faserrichtung  $a_1 < 5 \cdot d$
- Abstände zum beanspruchten Hirnholz  $a_{3,t} < 6 \cdot d$
- Abstände zum seitlichen Rand  $a_{4,c} < 3 \cdot d$
- SH-Schlankheiten  $\lambda_{SH} < 2$
- Rohdichten  $\rho > 600 \text{ kg/m}^3$  (Laubhölzer)

Die zugehörigen Versuche werden nachfolgend als „ausgeschlossene Werte“ bezeichnet. Nach Abzug dieser ausgeschlossenen Werte verblieben noch insgesamt 561 Versuche mit Holz-Holz-Verbindungen und 325 Versuche mit Stahlblech-Holz-Verbindungen.

### 3.3 Vergleich Versuchswerte mit zulässigen Werten nach DIN 1052-„alt“

In einer ersten Auswertung wurden die im Versuch erreichten Tragfähigkeiten  $R_V$  mit den nach DIN 1052-„alt“ berechneten zulässigen Werten  $N$  verglichen.

In Abb. 11 sind die Verhältniszerte  $R_V/\text{zul } N$  für Holz-Holz-Verbindungen dargestellt. Der charakteristische Verhältniszerte  $(R_V/\text{zul } N)_k$  aller Versuchswerte (ohne ausgeschlossene Werte) ergibt sich zu 1,788.

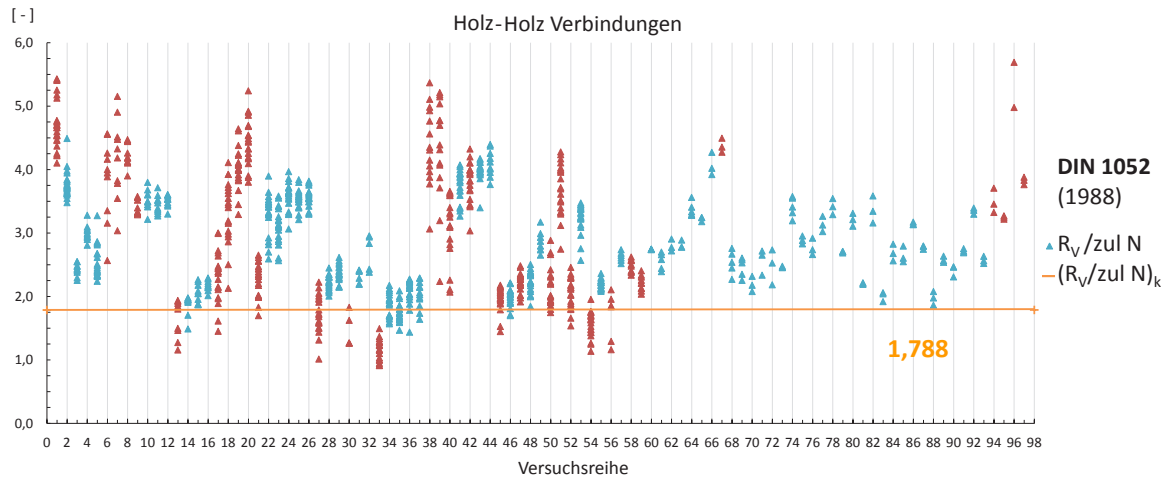


Abb. 11 Verhältnis  $R_V / z_u l N$  für Holz-Holz-Verbindungen (rot = ausgeschlossene Werte)

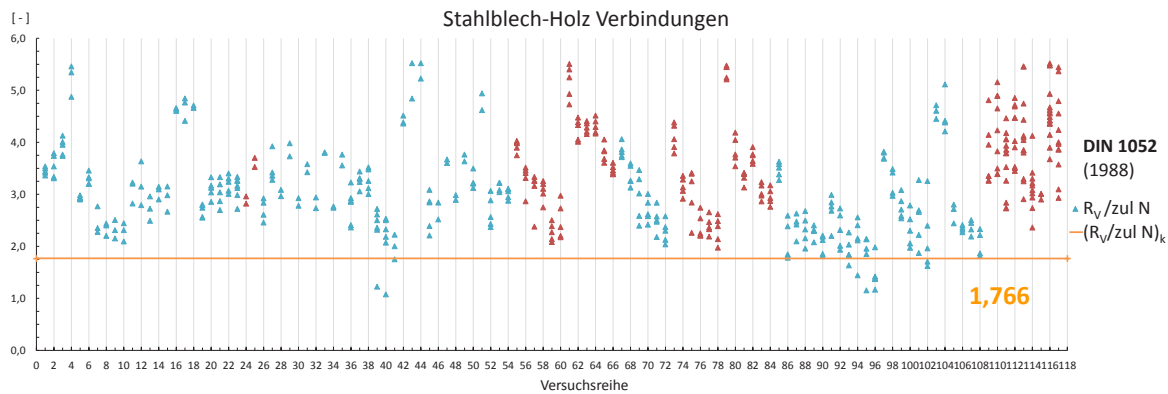


Abb. 12 Verhältnis  $R_V / z_u l N$  für Stahlblech-Holz-Verbindungen (rot = ausgeschlossene Werte)

Der charakteristische Verhältniswert  $(R_V / z_u l N)_k = 1,788$  entspricht dem globalen Sicherheitsbeiwert, der gegenüber der charakteristischen Tragfähigkeit (5%-Quantile) besteht. In Anlehnung an Abschnitt 2.1 sollte diese je nach Nutzungsklasse und Klasse der Lasteinwirkungsdauer in der Größenordnung von etwa 2,0 bis 2,3 betragen. Die Auswertung nach Abb. 11 zeigt, dass dieser Wert nicht erreicht wird.

Die Versuche deuten somit darauf hin, dass die zulässigen Werte nach DIN 1052-„alt“ zu hoch waren und etwa 20 - 25% unter dem derzeit geforderten Sicherheitsniveau lagen.

In Abb. 12 ist die gleiche Auswertung für Stahlblech-Holz-Verbindungen dargestellt. Der charakteristische Verhältniswert  $(R_V / z_u l N)_k$  aller Versuchswerte (ohne Ausgeschlossene Werte) ergibt sich zu 1,766. Diese Auswertung deutet darauf hin, dass auch die zulässigen Werte für Stahlblech-Holz-Verbindungen

nach DIN 1052-„alt“ zu hoch waren und etwa 20 - 25% unter dem derzeit geforderten Sicherheitsniveau lagen.

### 3.4 Vergleich Versuchswerte mit Rechenwerten nach EC 5

In einer zweiten Auswertung wurden die im Versuch erreichten Tragfähigkeiten  $R_V$  mit den nach Eurocode 5 berechneten charakteristischen Tragfähigkeiten  $R_k$  verglichen.

Diese Berechnung erfolgte allerdings ohne die Faktoren 1,05 bzw. 1,15, die nach Eurocode 5 bei Versagensfällen mit Fließgelenken angesetzt werden dürfen, da diese nur zum Ausgleich für den geringeren erforderlichen Material Sicherheitsbeiwert für den Stahl der Verbindungsmittel dient und keine Erhöhung der Tragfähigkeit der Verbindung selbst darstellt.

Für die Berechnung der charakteristischen Tragfähigkeiten  $R_k$  wurde für jede Versuchsreihe die mittlere Rohdichte der Prüfkörper ermittelt und auf Grundlage von DIN EN 338 bzw. DIN 1052 (für BSH) eine zugehörige charakteristische Rohdichte angesetzt.

Ebenso wurde bei bekannten Zugfestigkeiten der Stabdübel die charakteristische Zugfestigkeit einer zugehörigen genormten Stahlqualität angesetzt. Bei Versuchsreihen, bei denen die Zugfestigkeit der Stabdübel nicht durch Versuche bekannt war (wie z.B. bei [6]), wurde mit der Zugfestigkeit der angegebenen Stahlqualität gerechnet.

Bei Verbindungen mit mehreren hintereinander liegenden Stabdübeln wurde die wirksame Anzahl  $n_{ef}$  der Stabdübel nach Gleichung (8.34) des Eurocode 5 berechnet.

In Abb. 13 sind die Verhältniszerte  $R_V/R_k$  für Holz-Holz-Verbindungen dargestellt. Der charakteristische Verhältniszerte  $(R_V/R_k)_k$  aller Versuchswerte (ohne ausgeschlossene Werte) ergibt sich zu 1,074.

Im Idealfall würde sich der charakteristische Verhältniszerte  $(R_V/R_k)_k$  zu 1,0 ergeben. Die Tatsache, dass dieser Wert über 1,0 liegt, deutet darauf hin,

dass die nach Eurocode 5 berechnete charakteristische Tragfähigkeit  $R_k$  als leicht konservativ angesehen werden kann. Aus Abb. 13 ist zu erkennen, dass ab Versuchsreihe 59 die Versuchswerte z.T. deutlich über den berechneten Werten nach Eurocode 5 liegen. Bei diesen Versuchen von Ehlbeck/Werner [4] wiesen die Prüfkörper signifikant größere Schlankheiten auf als diejenigen von Jorissen [3].

In Abb. 14 ist die gleiche Auswertung für Stahlblech-Holz-Verbindungen dargestellt. Der charakteristische Verhältniszerte  $(R_V/R_k)_k$  aller Versuchswerte (ohne ausgeschlossene Werte) ergibt sich zu 1,073 und ist daher nahezu identisch mit dem der Holz-Holz-Verbindungen.

Damit deuten auch diese Versuche darauf hin, dass die nach Eurocode 5 berechnete charakteristische Tragfähigkeit  $R_k$  als leicht konservativ angesehen werden kann.

Bei den Auswertungen zeigte sich die Tendenz, dass die Unterschiede zwischen Versuchswerten und Rechenwerten nach Eurocode 5 mit zunehmendem Durchmesser der Stabdübel größer wurden: die Tragfähigkeiten von Verbindungen mit größeren Durchmessern werden bei einer Berechnung nach Eurocode 5 anscheinend unterschätzt.

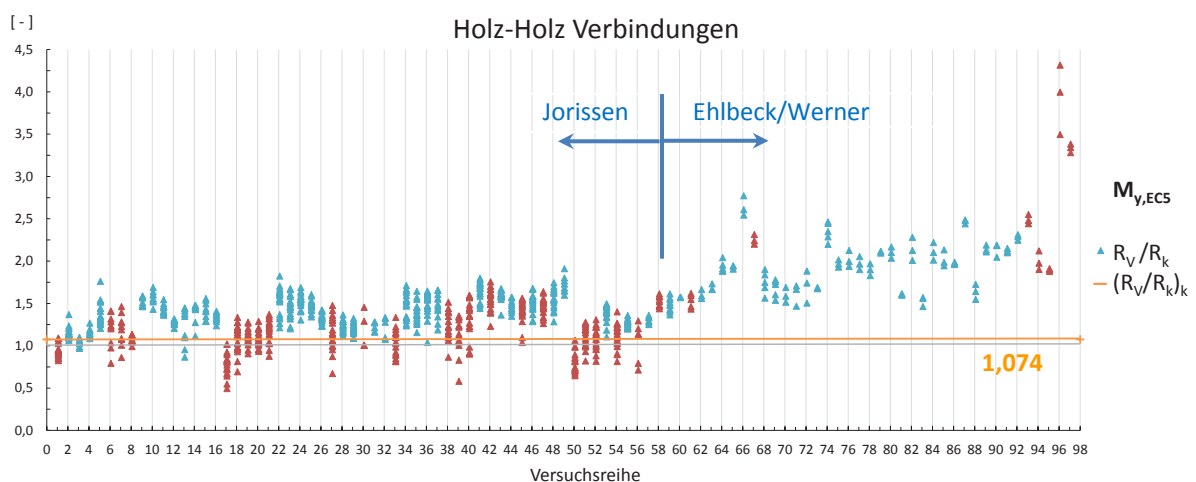


Abb. 13 Verhältnis  $R_V/R_k$  für Holz-Holz-Verbindungen (rot = ausgeschlossene Werte)

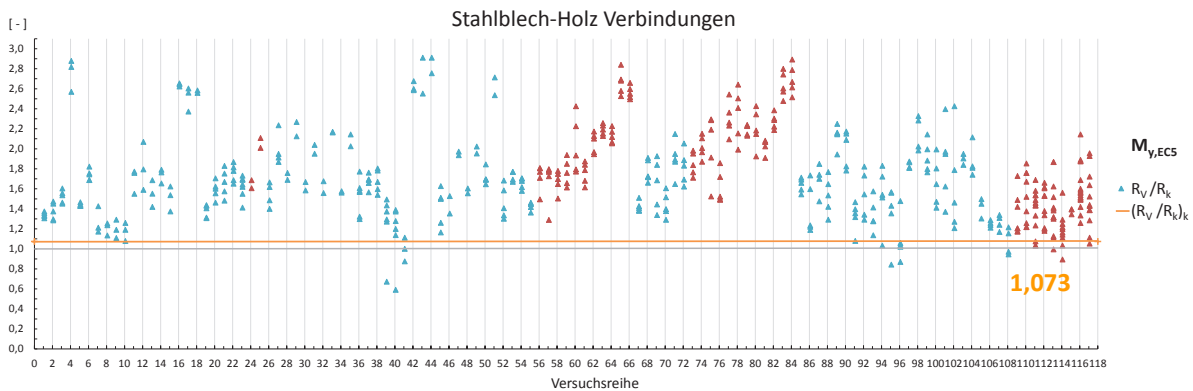


Abb. 14 Verhältnis  $R_V / R_k$  für Stahlblech-Holz-Verbindungen (rot = ausgeschlossene Werte)

### 3.5 Vergleich Versuchswerte mit erwarteten Versuchswerten

In einem weiteren Schritt wurden die Versuchswerte  $R_V$  mit den zugehörigen erwarteten Versuchswerten  $R_{EV}$  verglichen. Diese wurden zwar ebenfalls nach Eurocode 5 berechnet, allerdings mit den bei den Versuchen vorliegenden Rohdichten der Hölzer und Stahlfestigkeiten der Stabdübel.

Diese Auswertung ermöglicht eine Aussage über die „Güte“ des zugrunde gelegten Rechenmodells (Johansen-Theorie). Trifft das Modell zu, so ist ein Verhältnis  $R_V/R_{EV}$  von im Mittel 1,0 zu erwarten.

In Abb. 15 ist dieser Vergleich für Holz-Holz- und Stahlblech-Holz-Verbindungen in Abhängigkeit von der Schlankheit des Seitenholzes dargestellt.

Aus diesem Bild ist zu erkennen, dass insbesondere ab SH-Schlankheiten von  $\lambda_{SH} \geq ca. 4$  die im Versuch erzielten Tragfähigkeiten über den erwarteten Tragfähigkeiten lagen (Verhältnis  $R_V/R_{EV} > 1,0$ ).

### 3.6 Fazit

Die Auswertung der Versuche bestätigte die in den Vergleichsrechnungen mit der „alten“ DIN gewonnenen Tendenzen:

- Die Tragfähigkeit von Stabdübeln mit größeren Durchmessern wird nach Eurocode 5 unterschätzt.
- Die Tragfähigkeit von Stabdübelverbindungen mit größeren Seitenholz-Schlankheiten wird nach Eurocode 5 ebenfalls unterschätzt.

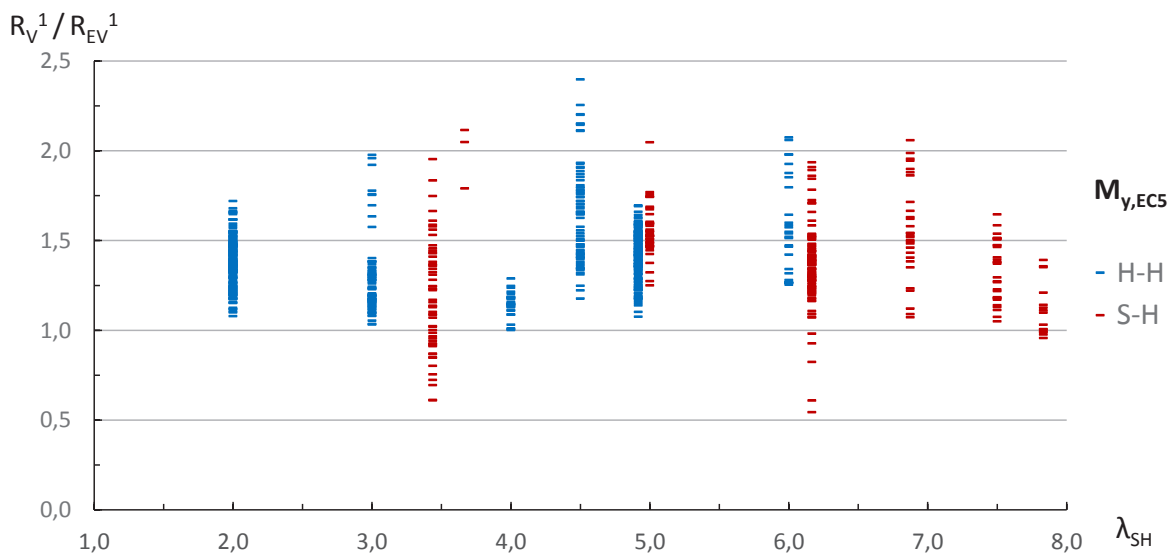


Abb. 15 Verhältnis  $R_V / R_{EV}$  in Abhängigkeit von der Schlankheit des Seitenholzes



## 4 Versuche mit Stabdübeln

### 4.1 Fließmoment $M_y$

Die Auswertung der verfügbaren Versuchsergebnisse in Abschnitt 3 zeigte für größere Stabdübeldurchmesser eine zunehmende Unterschätzung der Tragfähigkeiten der Verbindungen. Dasselbe gilt für höhere Stabdübelschlankheiten, bei denen überhaupt erst Fließgelenke auftreten und das Fließmoment des Stabdübels sich auf die Tragfähigkeit auswirkt. Ein Ziel dieses Forschungsvorhabens war daher die experimentelle Überprüfung der Fließmomente von Stabdübeln unterschiedlicher Durchmesser und unterschiedlicher Festigkeit. Um die Fließmomente nach Gleichung (8.30) des Eurocode 5 zu überprüfen, wurden Stabdübel verwendet, die bei unterschiedlichen Herstellern und verschiedenen Holzbaubetrieben entnommen wurden. Insgesamt wurden 159 Zugversuche und 122 vergleichende Biegeversuche durchgeführt. Es wurde angestrebt, bei den entnommenen Stabdübeln ein Teil in Zugversuchen und ein Teil in Biegeversuchen zu prüfen. Da die Versuchsergebnisse innerhalb einer Versuchsreihe kaum streuten, konnte aus dem Vergleich der in den Versuchen bestimmten Fließmomente nach DIN EN 409 mit der Zugfestigkeit bzw. Fließgrenze aus dem Versuch die Gleichung (8.30) des Eurocode 5 überprüft werden.

Die Versuche zeigten hierbei ein unterschiedliches Tragverhalten von Stählen mit niedrigen bzw. hohen Zugfestigkeiten. Während bei Stählen mit niedriger Zugfestigkeit und ausgeprägter Streckgrenze das aufnehmbare Moment bei Erreichen plastischer Verformungen noch deutlich ansteigt, ist dies bei Stählen mit hoher Zugfestigkeit nur in geringerem Maße der Fall. Dies ist in Abb. 16 dargestellt.

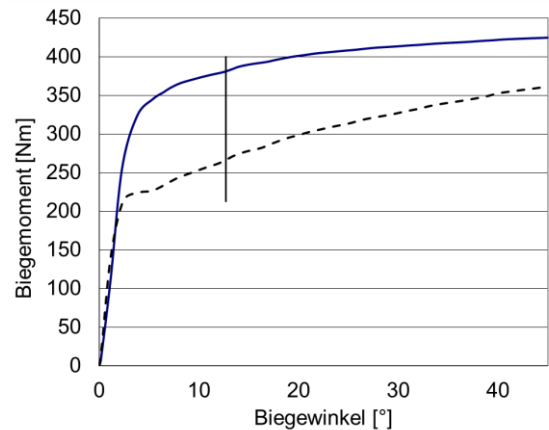


Abb. 16 Aufnehmbares Biegemoment in Abhängigkeit vom Biegewinkel für einen höherfesten Stahl (durchgehende Linie) und einen niederfesten Stahl mit ausgeprägter Streckgrenze (gestrichelte Linie)

Gleichung (8.30) des Eurocode 5 gibt das Fließmoment abhängig von den Parametern Durchmesser und Zugfestigkeit des Stahls an. Während bei höherfesten Stählen diese beiden Parameter für die Berechnung des Fließmomentes ausreichen, wird bei niederfesten Stählen für eine genauere Berechnung auch die Fließgrenze benötigt. Die Versuchsergebnisse mit Stabdübeln zeigten insbesondere für größere Stabdübeldurchmesser deutlich höhere Fließmomente als nach Eurocode 5 berechnet.

Für die genaue Berechnung des Fließmomentes konnte folgende Beziehung abgeleitet werden:

$$M_{y,neu} = \begin{cases} 0,15 \cdot \frac{f_y + f_u}{2} \cdot d^3 & \text{für } f_u < 450 \text{ N/mm}^2 \\ 0,15 \cdot f_u \cdot d^3 & \text{für } f_u > 450 \text{ N/mm}^2 \end{cases}$$

mit

$d$  = Durchmesser

$f_y$  = Streckgrenze des Stahls

$f_u$  = Zugfestigkeit des Stahls

Diese modifizierte Gleichung liefert für zunehmende Durchmesser und höhere Zugfestigkeit deutlich höhere Werte für das Fließmoment als gegenwärtig nach Eurocode 5.

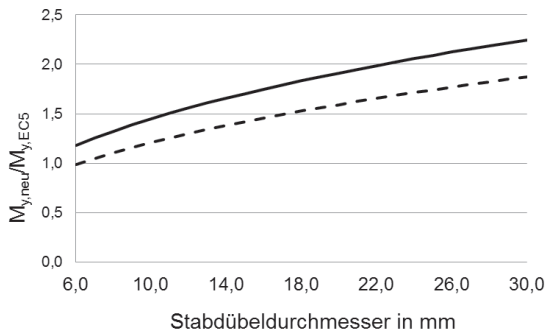


Abb. 17 Verhältniswert des Fließmoments nach dem obigen Vorschlag zum Fließmoment nach Eurocode 5 für Stähle mit Zugfestigkeiten  $f_u > 450 \text{ N/mm}^2$  (durchgehende Linie) und  $f_u < 450 \text{ N/mm}^2$  (gestrichelte Linie)

#### 4.2 Überfestigkeiten

Bei Versuchen mit Stahlteilen ist immer wieder festzustellen, dass diese z.T. erhebliche Überfestigkeiten aufweisen. Zur Überprüfung, ob dies auch bei Stabdübeln der Fall ist, wurden aus 38 Holzbaubetrieben insgesamt 159 Stabdübel entnommen und im Zugversuch geprüft (siehe auch Abschnitt 4.1).

Hierbei musste festgestellt werden, dass nur in 14 Betrieben Stabdübel mit Angabe einer deklarierten Stahlgüte verwendet wurden. Bei den übrigen Betrieben waren auf den Verpackungen keinerlei Angaben zur Stahlqualität zu finden. Die ermittelten Zugfestigkeiten lagen alle über der Mindestfestigkeit für S 235 von  $360 \text{ N/mm}^2$  und schwankten bei einem Mittelwert von etwa  $585 \text{ N/mm}^2$  zwischen  $397$  und  $853 \text{ N/mm}^2$ .

Höhere Stahlfestigkeiten führen bei Stabdübelverbindungen auch zu höheren Tragfähigkeiten, sofern sich mindestens ein Fließgelenk ausbilden kann. Ist die tatsächliche Zugfestigkeit der Stabdübel bekannt (z.B. nach Probenentnahme in einem Bestandsgebäude), so kann diese auch bei einer Überprüfung der Standsicherheit berücksichtigt werden.

Anzumerken wäre in diesem Zusammenhang, dass bei früheren Versuchen, die zu den Regelungen der „alten“ DIN 1052 geführt haben, die Stahlfestigkeit der Stabdübel nicht explizit bestimmt wurde und

somit etwaige Überfestigkeiten in den zulässigen Werten nach DIN 1052-„alt“ enthalten sind.

Bei einer Berechnung nach Eurocode 5 wird dagegen nur mit der nominellen Zugfestigkeit (Mindestzugfestigkeit) der Stabdübel gerechnet.

### 5 Schlankheitseffekt

Wie in Abschnitt 3.5 beschrieben, deuten die ausgewerteten Versuche darauf hin, dass bei Schlankheiten  $\geq \text{ca. } 4,0$  höhere Tragfähigkeiten beobachtet werden als rechnerisch erwartet (siehe auch Abb. 15). Dieser Effekt wird nachfolgend als „Schlankheitseffekt“ bezeichnet. Eine vollständige wissenschaftlich fundierte Erklärung dieses Effektes konnte bislang noch nicht gefunden werden. Nur ein Teil dieses Effektes kann mit den höheren Fließmomenten (siehe Abschnitt 4) erklärt werden.

Es wird jedoch vermutet, dass bei Ausbildung von Fließgelenken im Stabdübel Verformungen in der Verbindung auftreten, die ihrerseits Reibungskräfte aktivieren, die bislang bei der Bemessung nicht berücksichtigt werden.

Der im Eurocode 5 verankerte Einhängeneffekt basiert auf einem Aneinanderpressen der miteinander verbundenen Hölzer bzw. Stahlbleche und der damit in der Scherfuge aktivierten Reibungskraft mit einem angenommenen Reibungskoeffizienten von  $\mu = 0,25$ . Inwieweit der aus den Versuchen festgestellte „Schlankheitseffekt“ mit diesem Einhängeneffekt vergleichbar ist, konnte im Zuge dieses Vorhabens nicht geklärt werden.

Beim Auftreten von zwei Fließgelenken pro Scherfuge „verhaken“ sich Seiten- und Mittelholz miteinander, so dass ein Anpressen der Hölzer auch bei Stabdübelverbindungen möglich erscheint (siehe Abb. 18 links). Dies ist insbesondere bei Verbindungen mit größeren Schlankheiten ( $> \text{ca. } 6-7$  je nach Stahlgüte) der Fall. Bei Ausbildung von nur einem Fließgelenk bestehen noch Zweifel an der Möglichkeit eines Anpressens der Hölzer. Hier ist eher davon auszugehen, dass die Seitenhölzer sich aus der Verbindung herausziehen (siehe Abb. 18 rechts).

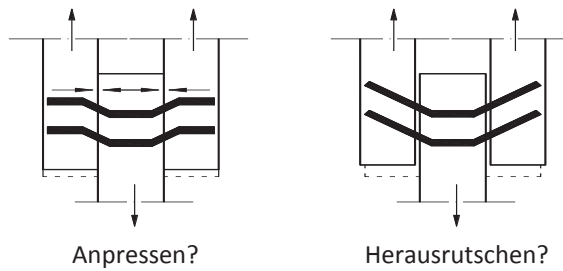


Abb. 18 Mögliches Anpressen der Hölzer bei Ausbildung von 2 Fließgelenken pro Scherfuge (links) und mögliche Gefahr eines Herausrutschens des Seitenholzes bei nur 1 Fließgelenk pro Scherfuge (rechts)

Eine andere Erklärung für den Schlankheitseffekt könnte darin bestehen, dass die Spaltgefahr infolge hintereinander liegender Verbindungsmittel geringer ist, als dies bisher angenommen wurde. Die Gleichung für  $n_{ef}$  im EC 5 wurde anhand der Versuche von Jorissen [3] hergeleitet, bei denen aber vorrangig Prüfkörper mit geringer bis mittlerer Schlankheit geprüft wurden. Zur Klärung dieser Frage sind aber entsprechende Untersuchungen/Versuche notwendig.

## 6 Neuauswertungen

### 6.1 Schlankheitseffekt von 25% bei Ausbildung von 2 Fließgelenken

Unter Ansatz der modifizierten Gleichung für das Fließmoment  $M_y$  (nach Abschnitt 4.1) und einem „Schlankheitseffekt“ von 25% für den Versagensfall mit 2 Fließgelenken wurden die Versuche erneut ausgewertet. Die Ergebnisse sind in Abb. 19 bis Abb. 21 dargestellt.

Der charakteristische Verhältnisswert  $(R_V/R_k)_k$  aller Holz-Holz-Versuchswerte (ohne ausgeschlossene Werte) ergibt sich dabei zu 1,037.

Der charakteristische Verhältnisswert  $(R_V/R_k)_k$  aller Stahlblech-Holz-Versuchswerte (ohne ausgeschlossene Werte) ergibt sich zu 0,978.

Die Gegenüberstellung der Versuchswerte mit den erwarteten Versuchswerten  $(R_V/R_{EV})$  zeigt bei Schlankheiten  $\lambda_{SH} > 6$  eine Annäherung an den Ide-

alwert von 1: In diesem Bereich kommt der Schlankheitseffekt bei Ausbildung von 2 Fließgelenken zu Tragen.

Allerdings werden die Tragfähigkeiten im mittleren Schlankheitsbereich  $4 < \lambda_{SH} < 6$  immer noch tendenziell unterschätzt. In diesem Schlankheitsbereich tritt meist nur ein Fließgelenk auf, für den kein Schlankheitseffekt angesetzt wurde. Hier scheint noch „Reserve“ für den Ansatz eines „mittleren“ Schlankheitseffekts zu bestehen.

In Zusammenhang mit dem Schlankheitseffekt wäre anzumerken, dass bei der praktischen Anwendung nach „alter“ DIN 1052 eine Grenzschlankheit der Hölzer von mind. 6 angestrebt wurde. Es ist daher anzunehmen, dass bei Verbindungen nach „alter“ DIN 1052 ein „Schlankheitseffekt“ implizit enthalten ist.

### 6.2 Schlankheitseffekt von 25% bei Ausbildung von 1 und 2 Fließgelenken

Die Versuche zeigen, dass auch im mittleren Schlankheitsbereich zwischen 4 und 6 ein „Schlankheitseffekt“ angesetzt werden könnte (siehe auch Abb. 21).

Setzt man einen „Schlankheitseffekt“ von 25% auch bei Ausbildung von nur 1 Fließgelenk an, so nähert sich das Verhältnis  $R_V/R_{EV}$  (Versuchswert / erwarteter Versuchswert) dem Idealwert von 1,0 weiter an (Abb. 22).

Der Ansatz dieses „Schlankheitseffektes“ auch bei mittleren Schlankheiten führt allerdings dazu, dass für das Verhältnis  $R_V/R_k$  (Versuchswert / char. Wert nach Eurocode 5) der char. Wert auf 0,846 (Holz-Holz-Verbindungen, Abb. 23) bzw. 0,801 (Stahlblech-Holz-Verbindungen, Abb. 24) absinkt.

Der Ansatz eines „Schlankheitseffektes“ von 25% auch bei nur einem Fließgelenk pro Scherfuge führt dazu, dass das Bemessungsmodell dann für nahezu alle Holz-Holz-Versuche von Jorissen rechnerisch zu hohe Tragfähigkeiten liefert und diese damit überschätzt.

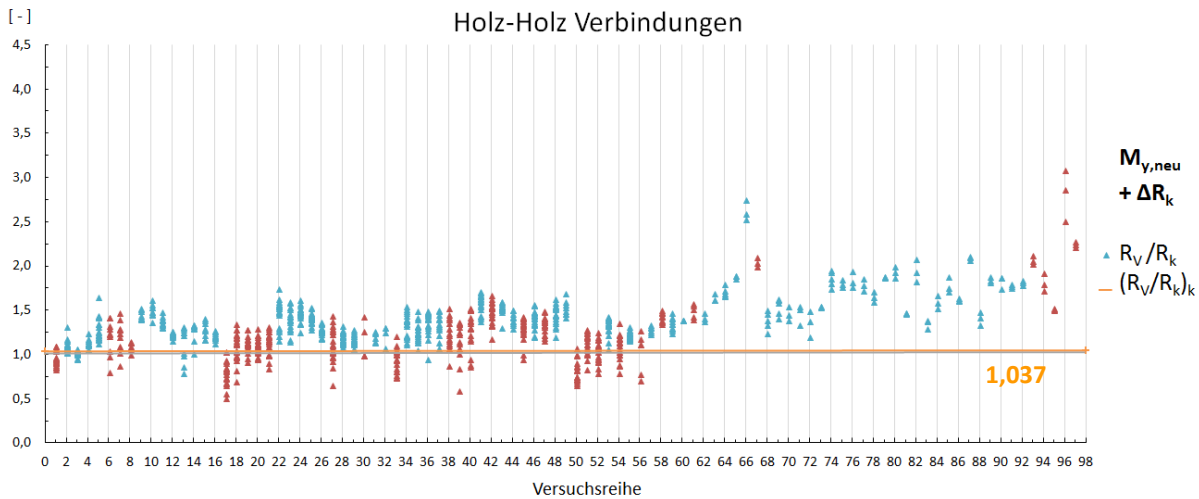


Abb. 19 Verhältnis  $R_V / R_k$  für Holz-Holz-Verbindungen (rot = ausgeschlossene Werte): Neuauswertung mit  $M_{y,neu}$  und Schlankheitseffekt von 25% bei Auftreten von 2 Fließgelenken pro Scherfuge

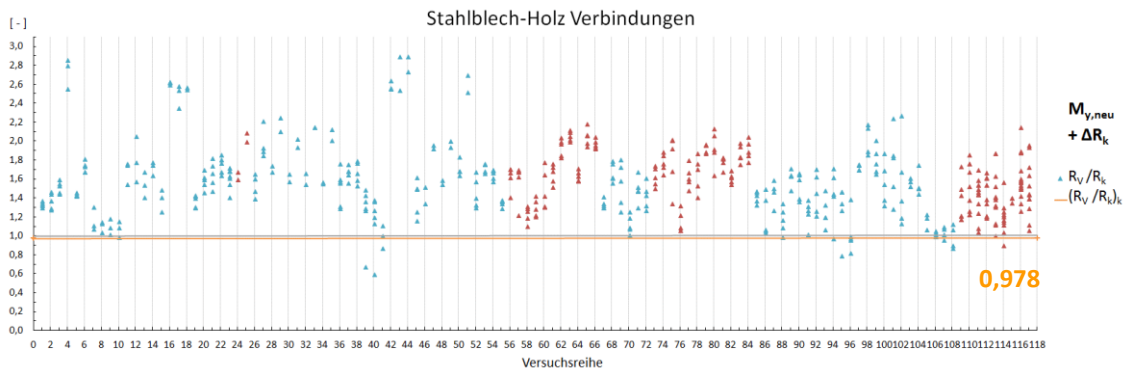


Abb. 20 Verhältnis  $R_V / R_k$  für Stahlblech-Holz-Verbindungen (rot = ausgeschlossene Werte): Neuauswertung mit  $M_{y,neu}$  und Schlankheitseffekt von 25% bei Auftreten von 2 Fließgelenken pro Scherfuge

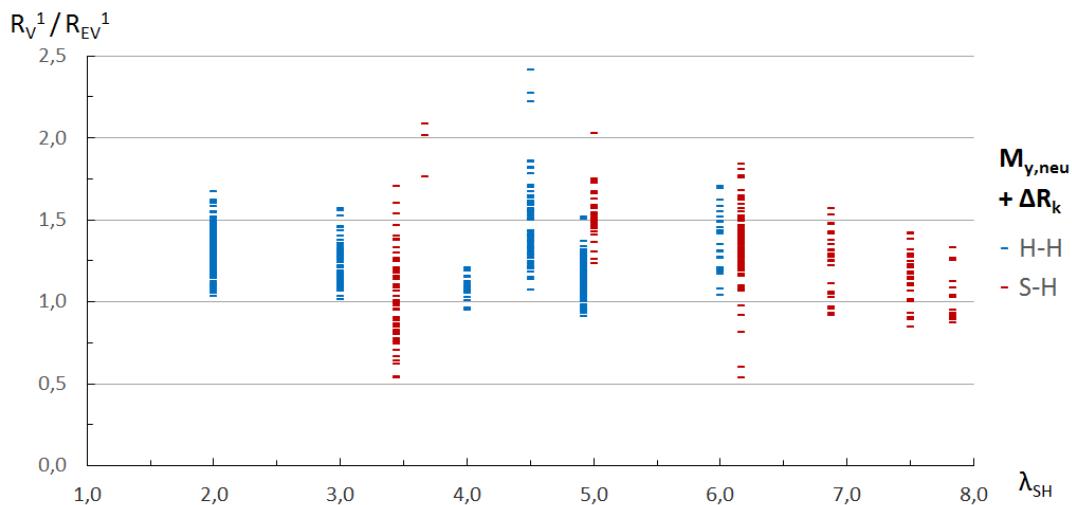


Abb. 21 Verhältnis  $R_V / R_{EV}$  in Abhängigkeit von der Schlankheit des Seitenholzes: Neuauswertung mit  $M_{y,neu}$  und Schlankheitseffekt von 25% bei Auftreten von 2 Fließgelenken pro Scherfuge

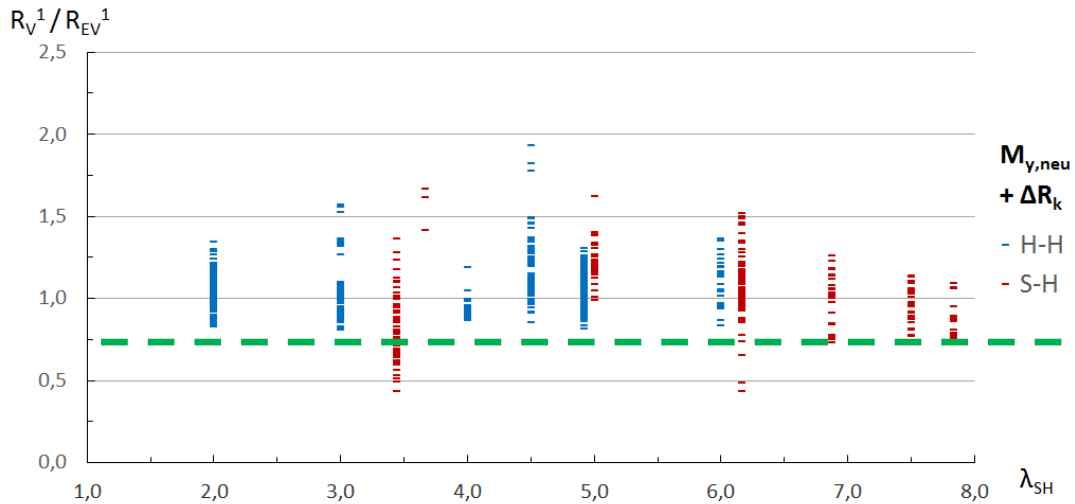


Abb. 22 Verhältnis  $R_V / R_{EV}$  in Abhängigkeit von der Schlankheit des Seitenholzes: Neuauswertung mit  $M_{y,neu}$  und Schlankheitseffekt von 25% bei Auftreten von 1 und 2 Fließgelenken pro Scherfuge

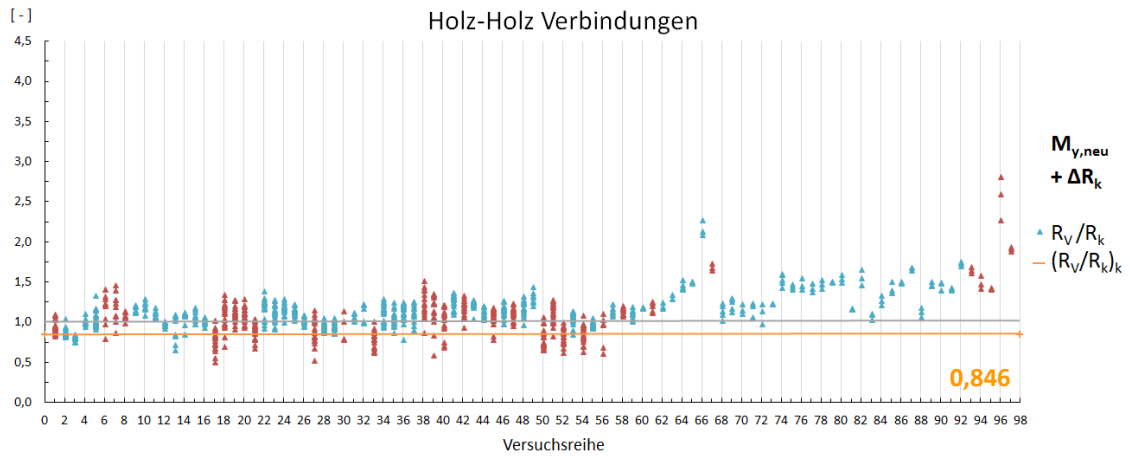


Abb. 23 Verhältnis  $R_V / R_k$  für Holz-Holz-Verbindungen (rot = ausgeschlossene Werte): Neuauswertung mit  $M_{y,neu}$  und Schlankheitseffekt von 25% bei Auftreten von 1 und 2 Fließgelenken pro Scherfuge

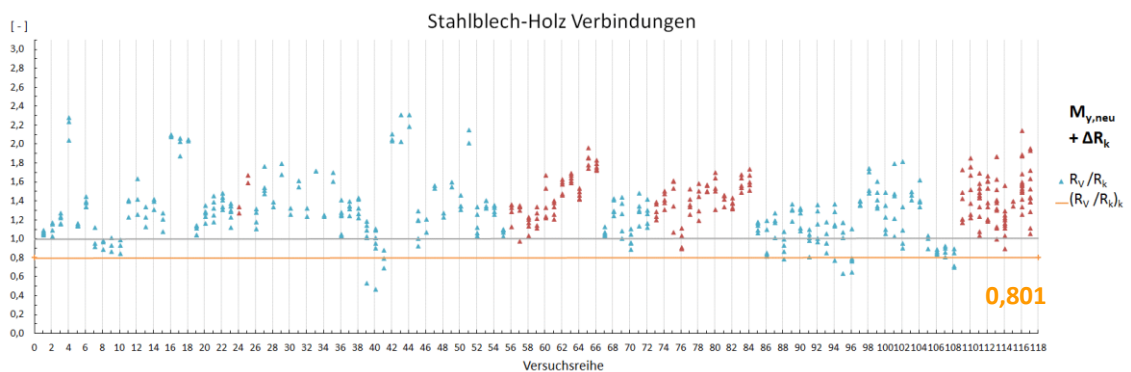


Abb. 24 Verhältnis  $R_V / R_k$  für Stahlblech-Holz-Verbindungen (rot = ausgeschlossene Werte): Neuauswertung mit  $M_{y,neu}$  und Schlankheitseffekt von 25% bei Auftreten von 1 und 2 Fließgelenken pro Scherfuge

### 6.3 Schlankheitseffekt von 10% bei Ausbildung von 1 Fließgelenk und von 25% bei 2 Fließgelenken

Die Auswertungen des vorherigen Abschnittes zeigen, dass der Ansatz eines Schlankheitseffektes von 25% bei Ausbildung von 1 Fließgelenk zu einer deutlichen Abminderung der Sicherheit führt. Daher wurde eine erneute Auswertung durchgeführt, bei der für Versagensfälle mit nur 1 Fließgelenk nur ein „Schlankheitseffekt“ von 10% angesetzt wurde.

Die Ergebnisse sind nachfolgend dargestellt.

In Abb. 25 sind die Verhältniswerte  $R_V/R_{EV}$  (Versuchswert / erwarteter Versuchswert) dargestellt. Dieses Bild deutet darauf hin, dass im mittleren Schlankheitsbereich trotzdem noch Reserven vorhanden sind.

In Abb. 26 und Abb. 27 sind die Verhältniswerte  $R_V/R_k$  (Versuchswert / char. Wert nach Eurocode 5) dargestellt. Die charakteristischen Verhältniswerte liegen nach dieser Auswertung bei 0,943 bei Holz-Holz-Verbindungen und 0,889 bei Stahlblech-Holz-Verbindungen.

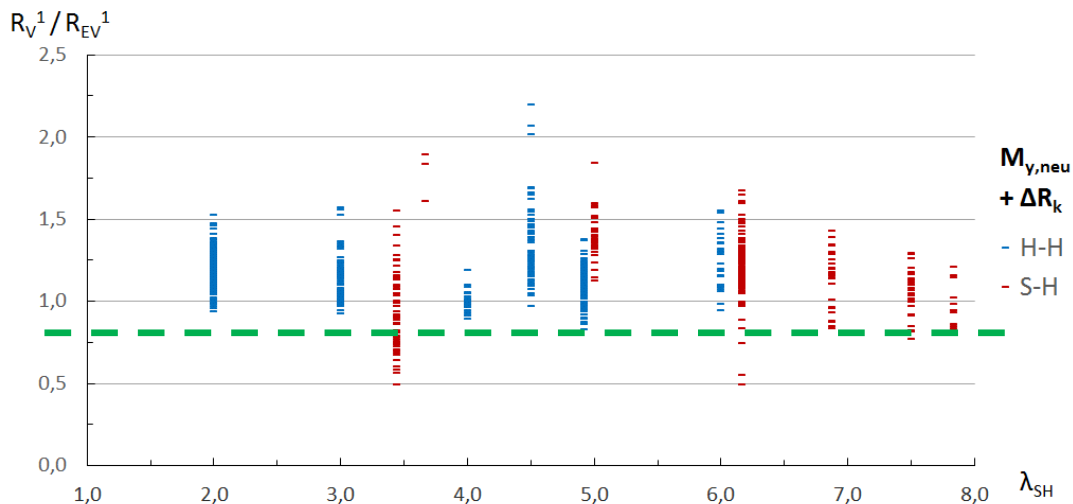


Abb. 25 Verhältnis  $R_V/R_{EV}$  in Abhängigkeit von der Schlankheit des Seitenholzes: Neuauswertung mit  $M_{y,neu}$  und Schlankheitseffekt von 10% bei Auftreten von 1 Fließgelenk und 25% bei 2 Fließgelenken

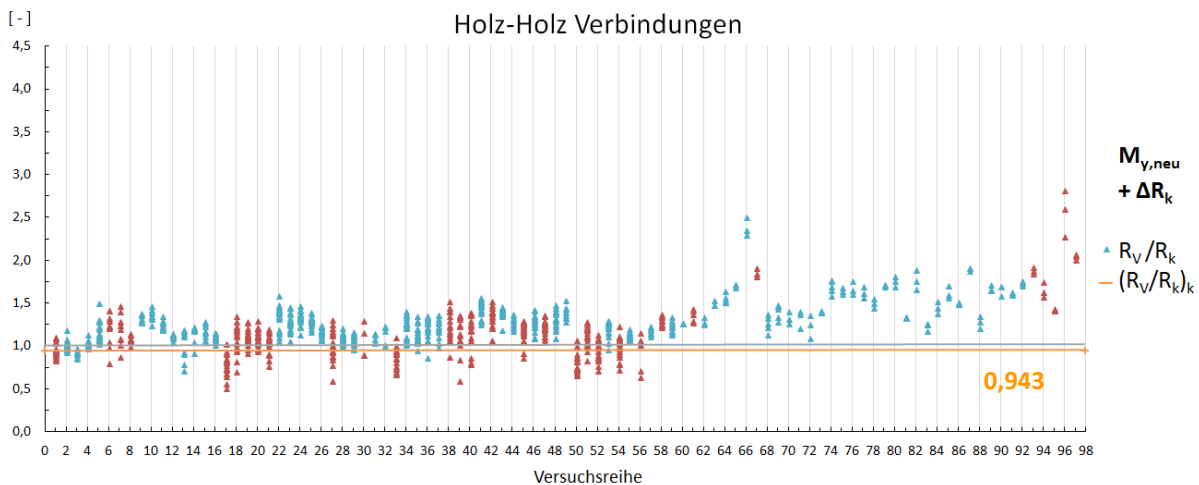


Abb. 26 Verhältnis  $R_V/R_k$  für Holz-Holz-Verbindungen (rot = ausgeschlossene Werte): Neuauswertung mit  $M_{y,neu}$  und Schlankheitseffekt von 10% bei Auftreten von 1 Fließgelenk und 25% bei 2 Fließgelenken

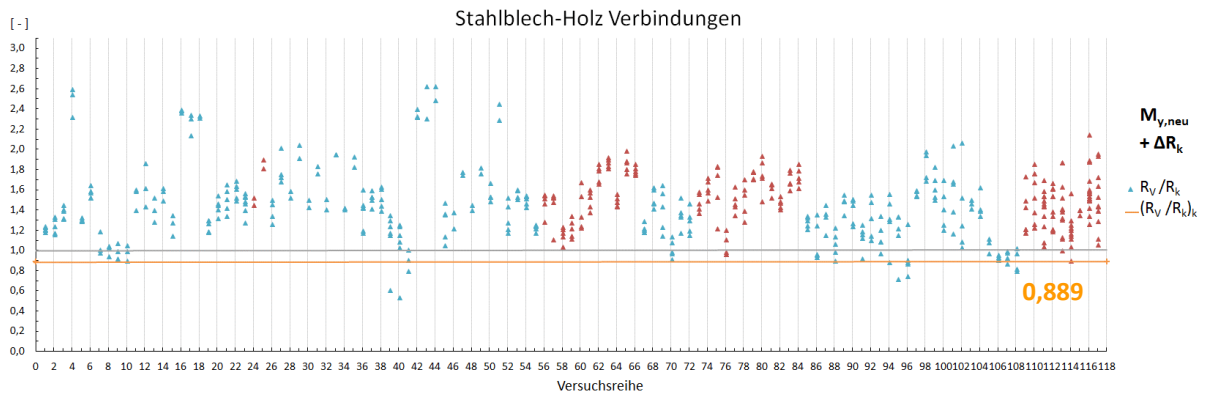


Abb. 27 Verhältnis  $R_v/R_k$  für Stahlblech-Holz-Verbindungen (rot = ausgeschlossene Werte): Neuauswertung mit  $M_{y,neu}$  und Schlankheitseffekt von 10% bei Auftreten von 1 Fließgelenk und 25% bei 2 Fließgelenken

## 7 Auswirkungen

Anhand der durchgeführten Auswertungen konnten die nachfolgenden drei Einflussfaktoren herausgearbeitet werden:

- Modifizierte Gleichung für das Fließmoment  $M_y$  ( $M_{y,neu}$ ).
- „Schlankheitseffekt“, z.B. in Form von pauschalen Tragfähigkeitssteigerungen für die Versagensfälle mit einem und/oder zwei Fließgelenken.
- Überfestigkeit der Stabdübel, z.B. in Form des Ansatzes einer Zugfestigkeit von  $490 \text{ N/mm}^2$  für die Stabdübel, entsprechend einer Stahlgüte S 355.

Die Auswirkungen auf die in Abschnitt 1 aufgeführten Beispiele sind nachfolgend aufgezeigt. In Tab. 1 und Tab. 2 sind die unter Ansatz verschiedener Einflussfaktoren gegebenen Ausnutzungsgrade bei einer Berechnung nach EC 5 zusammengestellt.

Aus diesen Tabellen sind folgende Tendenzen zu erkennen:

- Bei gedungenen Verbindungen mit kleinen Stabdübeldurchmessern sind durch Ansatz der verschiedenen Einflussfaktoren keine markanten Veränderungen zu erkennen:

die ohnehin geringe Überschreitung von 26% (Ausnutzung 1,26) kann auf 13% reduziert werden.

- Bei schlanken Verbindungen mit größeren Durchmessern sind jedoch deutlichere Auswirkungen festzustellen.
- So führt allein die modifizierte Gleichung für das Fließmoment  $M_y$  zu einer signifikanten Reduzierung des Ausnutzungsgrades ( $1,83 \rightarrow 1,62$ ).
- Der Ansatz eines Schlankheitseffektes bei Ausbildung von 2 Fließgelenken ohne Ansatz von Überfestigkeiten bewirkt ebenfalls eine deutliche Reduzierung des Ausnutzungsgrades ( $\rightarrow 1,45$ ).
- Der Ansatz einer meist vorhandenen Überfestigkeit ohne Berücksichtigung eines „Schlankheitseffektes“ führt zu einer weiteren deutlichen Reduzierung des Ausnutzungsgrades ( $\rightarrow 1,35$ ).
- Der Ansatz eines „Schlankheitseffektes“ auch bei Ausbildung von nur einem Fließgelenk führt zu einer weiteren Reduzierung. Inwieweit dies jedoch gerechtfertigt ist, muss noch in Fachkreisen diskutiert werden.

Tab. 1 Ausnutzungen der Verbindung aus Beispiel 1 (gedrungene Verbindung)

M <sub>y</sub> - neu	„Schlankheitseffekt“ bei 1 Fließgelenk / 2 Fließgelenken			Überfestigkeit (S 355)	Ausnutzungs- grad
	0 % / 25%	10% / 25%	25% / 25%		
					<b>1,26<sup>*)</sup></b>
x					1,24
x	x				1,24
x		x			1,13
x			x		1,13
x				x	1,13
x	x			x	1,13
x		x		x	1,13
x			x	x	1,13
*) Derzeitiger Stand					

Tab. 2 Ausnutzungen der Verbindung aus Beispiel 2 (schlanke Verbindung)

M <sub>y</sub> - neu	„Schlankheitseffekt“ bei 1 Fließgelenk / 2 Fließgelenken			Überfestigkeit (S 355)	Ausnutzungs- grad
	0 % / 25%	10% / 25%	25% / 25%		
					<b>1,83<sup>*)</sup></b>
x					1,62
x	x				1,45
x		x			1,31
x			x		1,30
x				x	1,35
x	x			x	1,35
x		x		x	1,23
x			x	x	1,08
*) Derzeitiger Stand					

In den nachfolgenden Bildern sind nochmals die zulässigen Belastungen nach DIN 1052-„alt“ zu  $N_{St}$  und die Tragfähigkeiten  $R_{Vgl}$  unter Berücksichtigung folgender Einflussfaktoren für die in Abschnitt 2.2 bereits beschriebenen Fälle mit  $n_h = 6$  dargestellt:

- modifizierte Gleichung für  $M_y$ ,
- Ansatz einer Überfestigkeit des Stahles (S 355 anstatt S 235),
- 10% „Schlankheitseffekt“ bei Ausbildung von 1 Fließgelenk und 25% bei Ausbildung von 2 Fließgelenken.

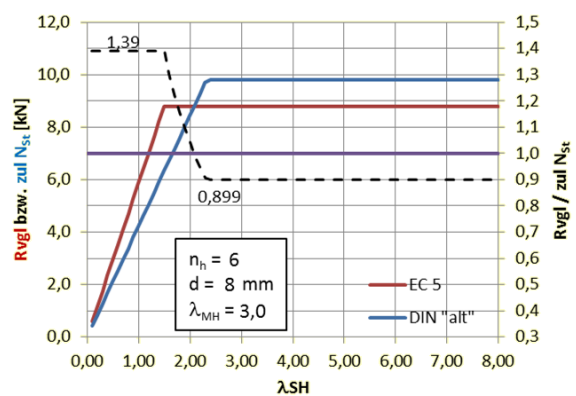


Abb. 28 Verhältnis  $R_{Vgl} / \text{zul } N_{St}$  in Abhängigkeit von der Schlankheit des Seitenholzes: Neuauswertung mit  $M_y$ -neu, Schlankheitseffekt von 10% bei Auftreten von 1 Fließgelenk und 25% bei Auftreten von 2 Fließgelenken pro Scherfuge und Annahme von S. 355



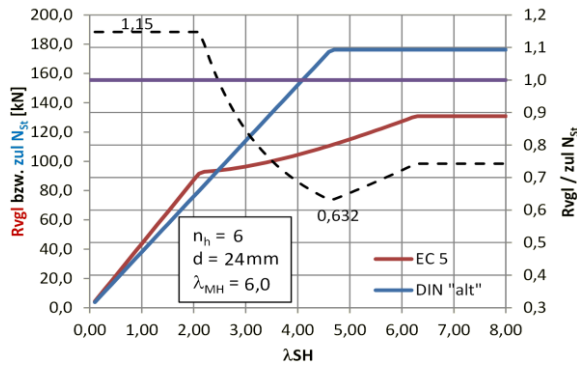


Abb. 29 Verhältnis  $R_{v,gl} / \text{zul } N_{St}$  in Abhängigkeit von der Schlankheit des Seitenholzes: Neuauswertung mit  $M_v$ -neu, Schlankheitseffekt von 10% bei Auftreten von 1 Fließgelenk und 25% bei Auftreten von 2 Fließgelenken pro Scherfuge und Annahme von S 355

Ein Vergleich von Abb. 29 mit Abb. 4 zeigt, dass die Berücksichtigung der drei Effekte zu einer deutlichen Annäherung der berechneten Tragfähigkeiten führt.

## 8 Weitere Ergebnisse

### 8.1 $n_{ef}$

Die im Eurocode 5 verankerte Gleichung zur Berechnung der wirksamen Anzahl von Verbindungsmitteln  $n_{ef}$  wurde aus den Versuchen von Jorissen [3] abgeleitet.

Unter Einbeziehung aller verfügbaren Versuchsergebnisse wurden im Zuge des Forschungsprojekts zahlreiche Regressionsanalysen durchgeführt, mit dem Ziel eine „bessere“ oder vielleicht einfachere Gleichung zur Berechnung von  $n_{ef}$  zu finden.

Die Auswertungen sind noch nicht abgeschlossen, es ist jedoch abzusehen, dass die derzeitige Gleichung weitgehend bestätigt wird, und zwar sowohl hinsichtlich der Form als auch der Größe der Abminderung.

### 8.2 Versetzte/nicht versetzte Anordnung

Nur in den Untersuchungen von Ehlbeck/Werner [4] und Kneidl [6] wurden Anschlüsse mit versetzter

und nicht versetzter Anordnung vergleichend untersucht.

In Abb. 30 sind die Verhältniszahlen  $R_V/R_k$  (Versuchswert/ Tragfähigkeit nach Eurocode 5) für diese Versuche dargestellt.

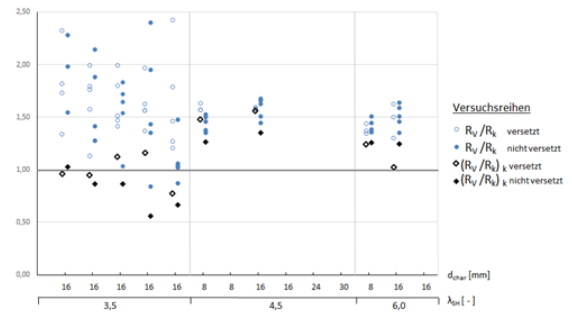


Abb. 30 Verhältniszahlen  $R_V/R_k$  bei versetzter/nicht versetzter Anordnung

Aus diesem Bild ist kein signifikanter Unterschied zwischen den Verhältniszahlen bei versetzter Anordnung („hohle“ Markierungen) und nicht versetzter Anordnung (ausgefüllte Markierungen) zu erkennen. Dies gilt zumindest für die geprüften Durchmesser.

### 8.3 Zug-/Druckscherversuche

Die Ermittlung der Tragfähigkeit von Verbindungen ist in einem Druckversuch deutlich einfacher durchzuführen als in einem Zugversuch. Da es aber in einem Druckscherversuch zu einem Anpressen der Seitenhölzer an das Mittelholz kommt und damit Reibungskräfte aktiviert werden, die in einem Zugscherversuch nicht auftreten, werden in jüngerer Zeit vornehmlich Zugversuche durchgeführt (siehe Abb. 31).

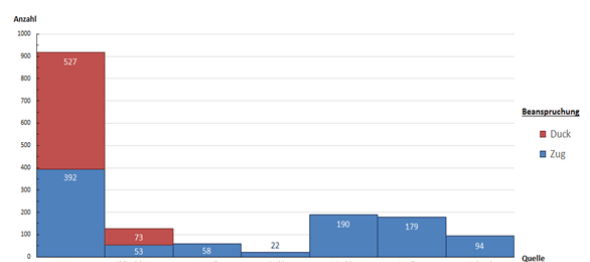


Abb. 31 Anzahl durchgeführter Zug- und Druckscherversuche

Wie aus Abb. 31 zu erkennen ist, wurden die meisten Druckscherversuche von Jorissen [3] durchgeführt, dessen Versuchswerte aber sehr gut mit den nach Eurocode 5 berechneten Tragfähigkeiten übereinstimmen (siehe auch Abb. 13). Hier ist kein signifikanter Unterschied zwischen Zug- und Druckscherversuchen zu erkennen. Allerdings hat Jorissen auch Gleitfolien in den Scherfugen zwischen Mittel- und Seitenhölzern angeordnet, um die Reibung zu minimieren.

## 9 Zusammenfassung

Insgesamt 1588 verfügbare Versuche aus 7 verschiedenen Forschungsarbeiten wurden zusammenfassend ausgewertet.

Die Auswertung der Versuche deutet darauf hin, dass die nach „alter“ DIN 1052 berechneten zulässigen Werte um etwa 20 – 25% überschätzt waren und entsprechend unter dem heute geforderten Sicherheitsniveau lagen. Allerdings deutet eine systematische Schadensanalyse an Hallentragwerken aus Holz (Band 16 der Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau) darauf hin, dass zwar bei der Ausführung von Verbindungen häufiger Fehler auftreten (etwa 20 % der Ausführungsfehler beziehen sich auf Verbindungsmittel), die Ausführungsfehler aber nur etwa 5 % der Fehlerquellen insgesamt darstellen. Mechanische Verbindungen sind daher deutlich unterdurchschnittlich als Ursache von Fehlern oder Schäden in Hallentragwerken aus Holz anzusehen. Dies gilt sicherlich auch für andere Holztragwerke. Daher wird es als nicht notwendig erachtet, unauffällige Konstruktionen ausschließlich wegen der möglicherweise rechnerisch zu geringen Tragfähigkeit von nach DIN 1052:1988 bemessenen Stabdübelverbindungen zu überprüfen. Die Überprüfung der Standsicherheit im Zuge der baurechtlich geforderten Instandhaltung von Gebäuden (z.B. auf Grundlage von [10]) ist ausreichend, mögliche Schäden in Verbindungen rechtzeitig zu erkennen.

Die Auswertungen deuten darauf hin, dass nach Eurocode 5 berechnete Tragfähigkeiten als konservativ angesehen werden können. Hier besteht noch „Luft“ für höhere rechnerische Tragfähigkeiten.

So konnte anhand von Versuchen mit Stabdübeln, die im Zuge von Firmenüberwachungen entnommen wurden, eine modifizierte Gleichung für das Fließmoment  $M_y$  abgeleitet werden, die insbesondere bei Stabdübeln mit größeren Durchmessern höhere rechnerische Tragfähigkeiten ergibt.

Weiterhin zeigten die Untersuchungen, dass bei Stabdübelverbindungen, bei denen sich im Versagensfall (ein oder) zwei Fließgelenke ausbilden, ein zusätzlicher „Schlankheitseffekt“ im Sinne einer pauschalen Tragfähigkeitssteigerung angesetzt werden könnte.

Inwieweit dieser „Schlankheitseffekt“ auf eine bei schlanken Verbindungen gegebene geringere Spaltgefahr bei hintereinander liegenden Verbindungsmitteln zurückzuführen ist, konnte im Rahmen dieses Vorhabens nicht geklärt werden. Zur Klärung wären weitere Untersuchungen/Versuche erforderlich. Die mit Stabdübeln durchgeführten Versuche zeigten weiterhin, dass die vorhandenen Stahlfestigkeiten z.T. deutlich über den zugehörigen Nennfestigkeiten liegen.

Die Regelungen zur „alten“ DIN 1052 wurden aus Versuchen abgeleitet, bei denen diese beiden Effekte (Schlankheit und Überfestigkeiten) enthalten waren. Das bedeutet, dass in den zulässigen Tragfähigkeiten nach „alter“ DIN diese beiden Effekte implizit enthalten waren.

Unter Berücksichtigung dieser drei Erkenntnisse (modifizierte Gleichung für  $M_y$ , „Schlankheitseffekt“, Überfestigkeiten bei Stahl) können die bestehenden Unterschiede zwischen den nach DIN 1052-„alt“ und Eurocode 5 berechneten Tragfähigkeiten zumindest zu einem großen Teil erklärt werden.

Damit werden die Unterschiede in den berechneten Tragfähigkeiten deutlich geringer als dies auf Grundlage der beiden Regelwerke der Fall ist.

## 10 Literatur

- [1] DIN 1052:1988: Holzbauwerke; Teil 2: Mechanische Verbindungen.
- [2] DIN EN 1995-1-1:2010-12: „Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau.
- [3] A. Jorissen, „Double shear timber connections with dowel type fasteners,“ Delft University Press, Delft, 1998.
- [4] J. Ehlbeck und H. Werner, „Tragverhalten von Stabdübeln in Brettschichtholz und Vollholz verschiedener Holzarten bei unterschiedlichen Rißlinienanordnungen,“ Universität Fridericana Karlsruhe, Karlsruhe, 1989.
- [5] F. Brühl, „Duktile Anschlüsse in Holzbau,“ Universität Stuttgart, Stuttgart, 2010.
- [6] R. Kneidl, „Abschlussbericht zu experimentellen Untersuchungen von Stabdübelverbindungen,“ Bayerische Ingenieurkammer Bau, München, 2009.
- [7] A. Mischler, „Bedeutung der Duktilität für das Tragverhalten von Stahl-Holz-Bolzenverbindungen,“ ETH Zürich, Zürich, 1998.
- [8] C. Sandhaas, „MECHANICAL BEHAVIOUR OF TIMBER JOINTS WITH SLOTTED-IN STEEL PLATES,“ Technische Universiteit Delft, Delft, 2012.
- [9] M. Schmid, „Anwendung der Bruchmechanik auf Verbindungen mit Holz,“ Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 2002.
- [10] Hinweise für die Überprüfung der Standsicherheit von baulichen Anlagen durch den Eigentümer/Verfügungsberechtigten, Bauministerkonferenz, 2006.

## 11 Autoren

Prof. Dr.-Ing. François Colling

Institut für Holzbau, Hochschule Augsburg  
An der Hochschule 1  
86161 Augsburg

Kontakt: [www.ifh-augsburg.de](http://www.ifh-augsburg.de)  
[francois.colling@hs-augsburg.de](mailto:francois.colling@hs-augsburg.de)

Univ. Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Blaß

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Holzbau und Baukonstruktionen  
R.-Baumeister-Platz 1  
76131 Karlsruhe

Kontakt:  
[Hans.Blass@kit.edu](mailto:Hans.Blass@kit.edu)