

**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN**

**VIENNA
UNIVERSITY OF
TECHNOLOGY**

DIPLOMARBEIT

Master's Thesis

Stabdübelverbindungen – Vergleich von ÖNORM B4100-2 und Eurocode 5

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs
unter der Leitung von

o.Univ.Prof. DDI Wolfgang Winter

und als verantwortlich mitwirkenden Assistenten

ZT & SV DI Dr.techn. Karlheinz Hollinsky

am

Institut für Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Thomas Weinlinger

0126356

Manhartstraße 53/7/1

A – 2000 Stockerau

Wien, im Juni 2008

.....
(Thomas Weinlinger)

Danksagung

Für die Anregung zu dieser Diplomarbeit, und die Unterstützung bei der Ausarbeitung möchte ich mich bei Herrn DI Dr. tech. *Karlheinz Hollinsky* bedanken. Des Weiteren gilt mein Dank Herrn o.Univ.Prof. DDI *Wolfgang Winter* für seine Anregungen und konstruktiven Diskussionen.

Natürlich gebührt mein Dank auch allen Studienkolleginnen und Kollegen, die ich während der letzten fünf Jahre kennen lernen durfte. Für ihre kollegiale Zusammenarbeit und fortwährende Unterstützung möchte ich mich an dieser Stelle besonders bedanken. Allen voran bei meinen Kollegen DI *Anton Schweighofer*, DI *Roman Höbinger*, cand. DI *Manfred Weber*, DI *Thomas Bader*, DI *Christoph Hackspiel*, cand. DI *Florian Breitler*, DI *Andreas Wiesinger* sowie bei DI *Markus Riel*.

Für seine Unterstützung am Beginn und auch während des Studiums möchte ich mich bei meinem Cousin cand. DI *Manfred Weinlinger* bedanken.

Für die fortwährende Unterstützung und Ermutigung während der Studiendauer gilt mein Dank meinen Eltern und Geschwistern.

Ein ganz besonderes Dankeschön möchte ich an dieser Stelle meiner Freundin Corinna zukommen lassen. Für die Unterstützung und vor allem für ihre Geduld, besonders im letzten Teil des Studiums.

Für meine Kinder

Lara und Lion

Zusammenfassung

Der Eurocode 5 bringt neben dem Übergang auf das neue Sicherheitskonzept auch umfangreiche Änderungen bei der Berechnung von Verbindungen mit sich. Der EC 5 greift für die Ermittlung der Tragfähigkeit auf die Gleichungen von Johansen zurück, welche zum Teil sehr umfangreich sind. Diese Gleichungen berücksichtigen den Einfluss der Werkstoffe, so finden die Lochleibungsfestigkeit f_h und das Fließmoment M_y direkten Eingang in die Berechnung. Dadurch wird es ermöglicht, durch die Verwendung hochwertiger Materialien die Tragfähigkeit der Verbindung zu steigern. Aus den Bemessungsgleichungen nach EC 5 ergeben sich, im Vergleich zur Önorm, dickere Seitenhölzer und dünnere Mittelhölzer.

Die Vergleichsrechnungen von einzelnen Stabdübeln zeigen, dass vor allem kleinere Durchmesser an das Niveau der Tragfähigkeit der Önorm heranreichen. Nur bei Verbindungen mit seitlichem dickem Stahlblech liegt der EC 5 bei den Tragfähigkeitswerten meist über der Önorm.

Beim Vergleich von Verbindungen muss in beiden Regelwerken eine Abminderung infolge mehrerer in Kraft- und Faserrichtung hintereinander liegender Verbindungsmittel vorgenommen werden. Werden die Mindestabstände nach EC 5 eingehalten, können nur 78,75 % der wirksamen Verbindungsmittel der Önorm in Rechnung gestellt werden. Diese Differenz kann durch eine Erhöhung der Abstände unter den Verbindungsmitteln verringert werden.

Eine Vereinfachung der Bemessung, durch eine grafische Auswertung der Gleichungen von Johansen, stellen die Möller-Diagramme dar. Die Versagensart kann nach Berechnung von drei Parametern sofort bestimmt werden. Weiters wurden Diagramme zur grafischen Ermittlung eines Tragfähigkeitsfaktors angegeben, mit dem man die Tragfähigkeit sofort berechnen kann.

Eine andere vereinfachte Möglichkeit der Ermittlung der Tragfähigkeit wird in der DIN 1052 angegeben. Hier geht man von der maximalen Tragfähigkeit des Verbindungsmittels, unter Einhaltung von Mindestdicken für das Seiten- und das Mittelholz, aus. Wenn diese Mindestdicken nicht erreicht werden, mindert man die Tragfähigkeit mit dem Verhältnis der vorhandenen Holzdicke zur Mindestholzdicke linear ab. Ein wesentlicher Vorteil dieser Methode der Bemessung über die Mindestholzdicken ist die Möglichkeit der Angabe von Bemessungstabellen.

Abstract

The Eurocode 5 includes not only the new security concept, it is also including substantial changes in the calculation of connections. For determining the load-carrying capacity the EC 5 uses the equations of Johansen, which are partially very extensive. These equations consider the influence of the materials. The calculation is based on the embedding strength f_h and the yield moment M_y . The load-carrying capacity of the connection can be increased by the use of high-quality materials.

A result of the analysis of the equations in EC 5 is, that the construction wood on the side is thicker and in the middle thinner than in Önorm.

The comparative calculations of single dowels show, that dowels with small diameters reach the load-carrying capacity of the Önorm. In connections with thick steel the load-carrying capacity of the Önorm is lower than in EC 5.

Concerning connections, the effective number of dowels has to be reduced because of the splitting sensibility of timber. If the minimum distances are kept according to EC 5, only 78.75 % of the effective dowels in Önorm can be used in calculation. This difference can be reduced by an increase of distances between the dowels.

The Moeller-charts are the graphical analysis of the equations of Johansen. These graphic charts can be used to simplify the calculation based on EC 5. After the determination of three parameters the failure mode can be determined immediately. Further diagrams for the graphic determination of a load-carrying capacity factor were indicated. With this factor the load-carrying capacity can be computed immediately.

Another simplified possibility to determine of the load-carrying capacity is indicated in DIN 1052. This code uses the maximum load capacity of the dowel, under consideration of the smallest thickness for the side and middle wooden construction. If the minimum thickness can not be reached, the load carrying capacity has to be reduced linearly with the relationship of the existing to the minimum thickness.

The possibility of the indication of calculation tables represents a substantial advantage of this method of calculating the minimum thickness of timber.

Inhaltsverzeichnis

1. Allgemeines.....	3
1.1. Einleitung	3
1.2. Motivation	4
1.3. Ziel	4
2. Sicherheitskonzepte.....	5
2.1. Geschichtliche Entwicklung der Sicherheitskonzepte	5
2.2. Deterministisches Sicherheitskonzept.....	6
2.3. Semiprobabilistisches Sicherheitskonzept	7
2.4. Erklärung der Indizes im Eurocode.....	9
2.5. Bemessungssituation	11
2.6. Definition von Grenzzuständen.....	12
2.7. Methode der Teilsicherheitsbeiwerte	13
2.7.1. Bemessungswert der Baustoffeigenschaften.....	13
2.7.2. Bemessungswert der Beanspruchung.....	14
3. Theoretische Grundlagen	18
3.1. Tragfähigkeit bei Beanspruchung rechtwinkelig zur Stabachse	18
3.1.1. Johansens Theorie	18
3.1.2. Zweischnittige Holz-Holz-Verbindungen	21
3.1.3. Zweischnittige Stahlblech-Holz-Verbindungen (Stahlblech als Mittelteil der Verbindung).....	26
3.1.4. Zweischnittige Stahlblech-Holz-Verbindungen (Stahlblech als Seitenteil der Verbindung).....	29
3.2. Mehrschnittige Verbindungen.....	34
3.3. Sonderfälle	34
3.3.1. Erhöhung der Tragfähigkeit	35
3.3.2. Ausziehwiderstand	36
4. Einflussgrößen.....	38
4.1. Modifikationsbeiwert k_{mod}	38
4.1.1. Holzfeuchtigkeit	38
4.1.2. Lasteinwirkungsdauer	40
4.2. Die Holzqualität	42
4.2.1. Duktilität.....	42
4.2.2. Festigkeitssortierung	43
4.2.3. Einfluss der Rohdichte	47
4.2.4. Zulässige Spannungen.....	47
4.3. Lochleibungsfestigkeit	48
4.4. Stabdübel und Passbolzen	51
4.4.1. Vorschriften des EC 5	51
4.4.2. Vorschriften der ÖNORM.....	52
4.4.3. Tragfähigkeit nach Önorm B4100-2	52
4.5. Mechanische Eigenschaften der Verbindungsmittel	54
4.5.1. Bestimmung des Fließmomentes M_y	54

4.6.	Schlankheit der Verbindungsmittel.....	57
4.7.	Durchmesser der Verbindungsmittel und Holzdicken	57
4.7.1.	Zweischnittige Holz-Holz-Verbindung.....	58
4.7.2.	Zweischnittige Stahl-Holz-Verbindung	63
4.8.	Verbindungsmittelabstände.....	66
4.9.	Berücksichtigung der Verbindungsmittelanzahl	71
5.	Vergleich Eurocode 5 zur ÖNORM B 4100-2	75
5.1.	Annahmen	75
5.2.	Bruchmodell nach Eurocode 5	77
5.3.	Sicherheitsbeiwert	78
5.4.	Vergleichsrechnung Stabdübel.....	81
5.4.1.	Zweischnittige Holz-Holz-Verbindung.....	81
5.4.2.	Zweischnittige Stahl-Holz-Verbindung (Stahlblech in der Mitte).....	89
5.4.3.	Zweischnittige Stahl-Holz-Verbindung (dünnes Stahlblech seitlich).....	92
5.4.4.	Zweischnittige Stahl-Holz-Verbindung (dickes Stahlblech seitlich).....	94
5.5.	Wirtschaftlichkeit	97
6.	Möller-Diagramme	98
6.1.	Zweischnittige Holz-Holz-Verbindungen	98
6.2.	Zweischnittige Stahlblech-Holz-Verbindungen.....	101
6.2.1.	Innen liegendes Stahlblech.....	101
6.2.2.	Außen liegendes Stahlblech	102
7.	Mindestholzdicken.....	104
7.1.	DIN 1052.....	104
7.2.	Bemessungstabelle	106
8.	Schlussfolgerungen – Ausblick	108
9.	Anhang	110
9.1.	Literaturverzeichnis.....	110
9.2.	Abbildungsverzeichnis	111
9.3.	Tabellenverzeichnis.....	112

1. Allgemeines

1.1. Einleitung

Das konstruktive Bauen mit Holz ist auf Grund der natürlich vorgegebenen Randbedingungen – stabförmige Produkte mit beschränkten Querschnittsabmessungen – wesentlich geprägt durch eine effiziente und sichere Verbindungstechnik. In vielen Fällen werden die Abmessungen der einzelnen Bauteile nicht auf Grund der zu übertragenden Kräfte und Momente, sondern von den Verbindungen der einzelnen Bauteile bestimmt. Bei deren Entwurf und konstruktiver Durchbildung ist insbesondere das Verhalten hinsichtlich Tragfähigkeit, Steifigkeit und Duktilität zu beachten.

In einer Holzkonstruktion wird die Wahl der Verbindungsmittel nicht nur von der Belastung und der Tragfähigkeit festgelegt. Es sind weiterhin die Ästhetik, die Kosteneffizienz und der Herstellungsprozess zu berücksichtigen. Des Weiteren sind die Errichtungsmethode sowie die bevorzugte Ausbildung der Verbindungen von Architekt, Ingenieur und ausführender Firma zu berücksichtigen.

Durch diese Vielzahl von Einflüssen ist es nicht möglich allgemein gültige Regeln für günstige Verbindungen anzugeben. Es sollte jedoch gelten, einfache Verbindungen und wenige Verbindungsmittelarten zu verwenden.

Die Verbindungen selbst bzw. die Wahl der Verbindungsmittel beeinflussen auch in erheblichem Maße die Montage- und Herstellungskosten.

Im Eurocode 5 wird das Nachweisverfahren für Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln neu geregelt. Es erfolgt nun eine wirklichkeitsnähere Abbildung der Wirkungsweise der Verbindungsmittel. Es werden auch die Einflüsse der Werkstoffeigenschaften berücksichtigt. Die verschiedenen Holzbaustoffe werden durch ihre Lochleibungsfestigkeiten erfasst und die stiftförmigen Verbindungsmittel werden durch die Fließmomente berücksichtigt.

1.2. Motivation

Die Tragwerksplanung im Holzbau kann zurzeit noch nach der ÖNORM B 4100-2 durchgeführt werden. Mit dem ersten Jänner 2009 ist aber der Übergang auf die europäische Norm, den Eurocode 5, festgelegt. Dadurch wird nicht nur das Sicherheitskonzept vom deterministischen auf das semiprobabilistische umgestellt. Es werden neben weiteren Änderungen auch die Berechnungsmethoden der Tragfähigkeiten von Verbindungsmitteln geändert. Bisher wurden in den nationalen Normen Kennwerte vor, welche oft empirisch an einer begrenzten Anzahl von Bauteilversuchen gewonnen wurden. Die europäische Normung ermittelt die Tragfähigkeiten nun durch Rechenmodelle, welche das Trag- und Verformungsverhalten der Verbindung ausreichend genau beschreiben. Da dies eine wesentliche Änderung für den Ingenieur darstellt, soll diese Arbeit die Berechnung der Tragfähigkeit für stiftförmige Verbindungsmittel (vor allem für Stabdübel und Passbolzen) untersuchen.

1.3. Ziel

Die Bemessungsregeln für Stabdübel nach Eurocode 5 (EC 5) sollen analysiert und hinterfragt werden. Anhand von Fallbeispielen soll die Gegenüberstellung der Bemessungsergebnisse von Eurocode 5 und ÖNORM B 4100-2 dargestellt werden.

Ein weiteres Ziel ist es, eine vereinfachte Bemessung auf Basis von Diagrammen oder Tabellen zu entwickeln.

2. Sicherheitskonzepte

2.1. Geschichtliche Entwicklung der Sicherheitskonzepte

Bis Anfang des 19. Jahrhunderts war das Bauen durch die Erfahrung, die der Baumeister durch seine jahrelange Tätigkeit sammelte bestimmt. Erst mit Kenntnis der Werkstoffeigenschaften und der mathematischen Erfassung der Beanspruchungen der Bauteile war eine erste Definition eines Sicherheitsfaktors möglich.

An der Wende zum 20. Jahrhundert setzte sich dann das sogenannte „deterministische Sicherheitskonzept“ durch, das auf folgenden Rahmenbedingungen aufbaut:

- Statistische Auswertung der in Prüfverfahren ermittelten Materialkennwerte
- Deterministische Festlegung der Einwirkungen (vor allem Nutzlasten)
- Deterministische Festlegung der, der Widerstandsseite (= Beanspruchbarkeit der Konstruktionselemente) zugeordneten globalen Sicherheitsbeiwerte, die auf Grund von Erfahrungswerten zur Zuverlässigkeit (in Abhängigkeit von der Streuung der Prüfwerte der Baustoffeigenschaften und dem Grad der nutzungsbedingten Schwächung der Bauteile) festgelegt wurden.

Die darauf aufbauende „Bemessung nach zulässigen Spannungen“ erwies sich wegen der relativ einfachen Nachweisformate als äußerst erfolgreich war jedoch mit dem Nachteil behaftet, nur baustoffabhängig gleiche Versagensarten zu garantieren. Das Nachweisformat lautete

$$\sigma_{\text{vorh}} \leq \sigma_{\text{zul}} \quad (1)$$

Auf Grundlage des semiprobabilistischen Sicherheitskonzeptes werden Teilsicherheitsfaktoren verwendet.

Das Nachweisformat lautet nun

$$S_d \leq R_d \quad \text{oder} \quad \frac{S_d}{R_d} \leq 1 \quad (2)$$

Durch dieses Nachweisverfahren kann eine Zuverlässigkeitsaussage über das gesamte Bauwerk gemacht werden.

2.2. Deterministisches Sicherheitskonzept

Das deterministische Sicherheitskonzept ist ein Bemessungskonzept mit zulässigen Spannungen. Bei der Bemessung ist der Nachweis zu führen, dass die infolge der in den Normen festgelegten Belastungen ermittelten Spannungen die zulässigen Spannungen nicht überschreiten. Hierbei werden die zulässigen Spannungen als Teil einer kritischen Baustoffbeanspruchung festgelegt. Die Bemessungsbedingung, in der die Sicherheit nicht direkt aufscheint, lautet in bekannter Weise:

$$\sigma_{vorh} \leq \sigma_{zul} \leq \frac{\sigma_{krit}}{\nu} \quad (3)$$

v...globaler Sicherheitsfaktor 2,25 lt. [14]

Dieser Nachweis wird üblicherweise als "Allgemeiner Spannungsnachweis" bezeichnet. Der Nachweis der Sicherheit der zulässigen Spannungen setzt lineares Verhalten zwischen Last und Spannung voraus. Beim Bemessungskonzept mit zulässigen Spannungen wird die Sicherheit durch einen globalen Sicherheitsfaktor ν erfasst. Welche Unsicherheiten bei auf der Einwirkungsseite (Last) und welche auf der Widerstandsseite (Baustoffeigenschaften) damit abgedeckt werden bleibt unbekannt. Es kann somit keine Aussage über die Zuverlässigkeit der Konstruktion getroffen werden.

Mit der folgenden Abbildung wird versucht die Bemessung nach dem deterministischen Sicherheitskonzept grafisch darzustellen.

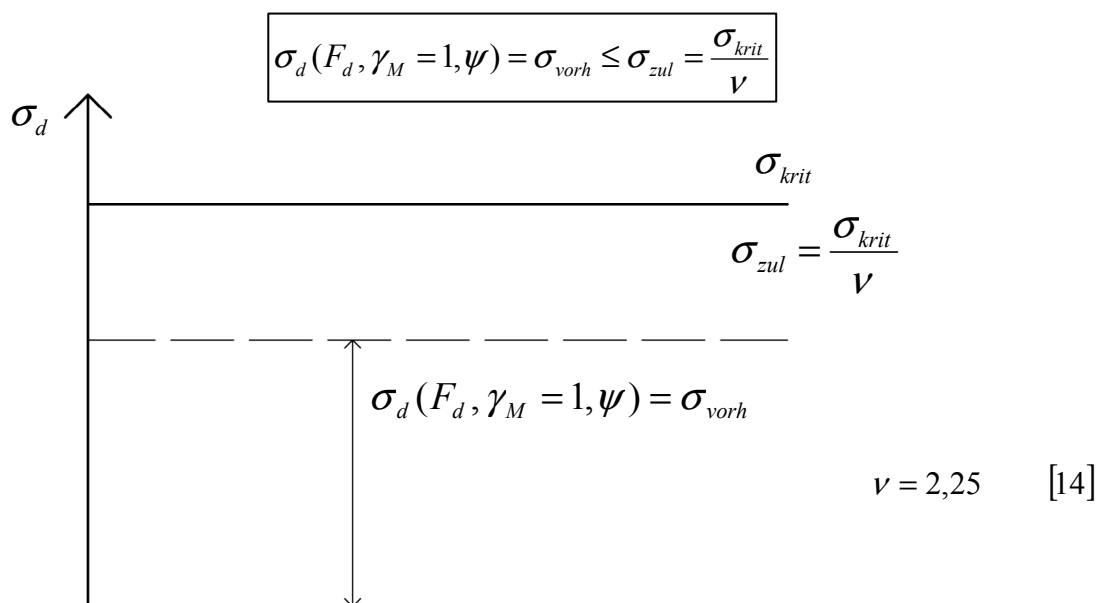


Abb. 1: deterministisches Sicherheitskonzept

Die Abbildung 1 verdeutlicht, dass eine kritische Spannung, σ_{krit} bei welcher das Holz versagt mit einem globalen Sicherheitsbeiwert abgemindert wird, um ausreichende Sicherheit gegen Versagen zu haben.

2.3. Semiprobabilistisches Sicherheitskonzept

Im semiprobabilistischen Bemessungskonzept fließen statistische Überlegungen in die Berechnungen ein. Diese sollen zum einen Variationen von Werkstoff- Eigenschaften und von Lastannahmen berücksichtigen, zum anderen wird die Wahrscheinlichkeit des gleichzeitigen Auftretens verschiedener Belastungen, nun als „Einwirkungen“ bezeichnet, berücksichtigt. Teilsicherheitsbeiwerte sowohl auf der Materialseite als auch auf der Einwirkungsseite berücksichtigen die unterschiedliche Streuung von Eigenschaften in Abhängigkeit vom Werkstoff (z.B. Stahl oder Holz) und von Einwirkungen (z.B. ständige und veränderliche Einwirkungen) sowie mögliche Modellierungsfehler.

Dem Bemessungskonzept liegen normalverteilte Einflussgrößen (Einwirkungen und Widerstände) zugrunde. In einem kleinen Bereich überschneiden sich diese beiden Normalverteilungen, hier würde das Bauteil versagen. Im Bauwesen wird eine sehr kleine Versagenswahrscheinlichkeit von ca. $1 \cdot 10^{-6}$ gefordert. Das bedeutet, dass ein Bauteil aus einer Million gleichartiger Bauteile mit gleicher Belastung versagt.

Um diese kleine Versagenswahrscheinlichkeit zu erreichen, muss die Schnittmenge der beiden Normalverteilung ausreichend klein sein. Dies erreicht man durch ausreichenden Abstand der Mittelwerte von Beanspruchung und Widerstand.

Eine noch höhere Sicherheit erreicht man, indem man die Einwirkungen erhöht oder die Widerstände vermindert. Diese Erhöhung bzw. Abminderung geschieht durch Teilsicherheitsbeiwerte. Der Nachweis besteht darin, dass die Versagenswahrscheinlichkeit nach dem Einrechnen der Teilsicherheitsbeiwerte geringer als $1 \cdot 10^{-6}$ ist.

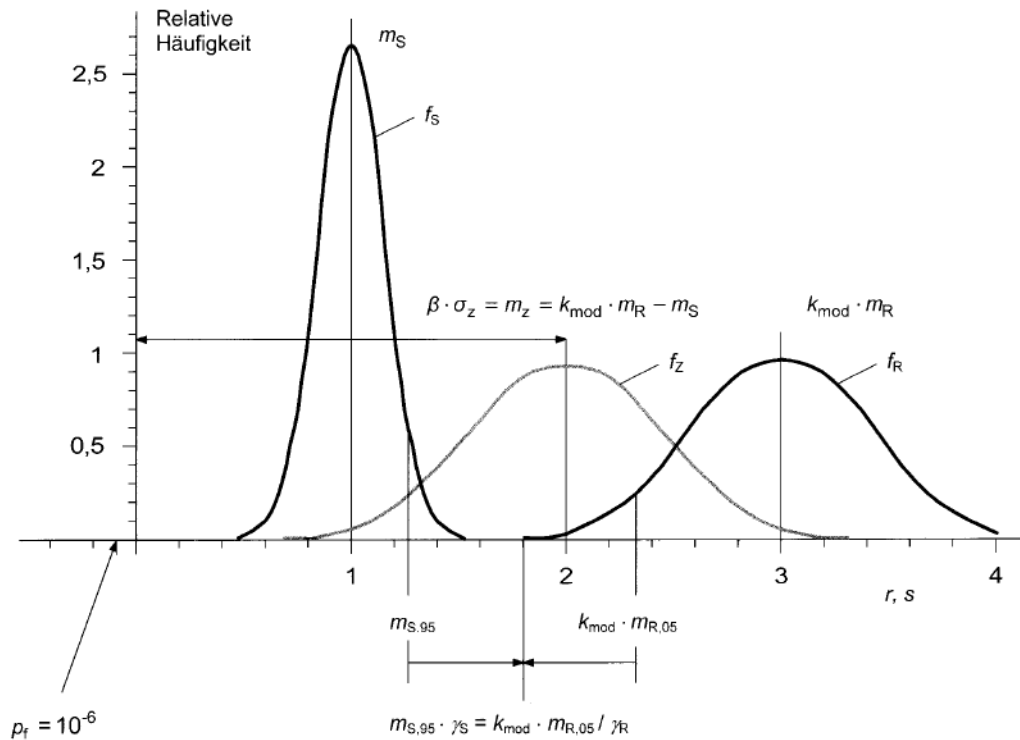


Abb. 2: Verteilung von Einwirkung S, Widerstand R und Grenzzustand Z=R-S [8]

Neben den allgemeinen vom Baustoff unabhängigen Regeln des semiprobabilistischen Sicherheitskonzepts, sind aufgrund der Komplexität des Baustoffes Holz zusätzliche werkstoffspezifische Beiwerte (z.B.: k_{mod}) zu berücksichtigen.

Mit der folgenden Abbildung wird versucht die Bemessung nach dem semiprobabilistischen Sicherheitskonzept grafisch darzustellen.

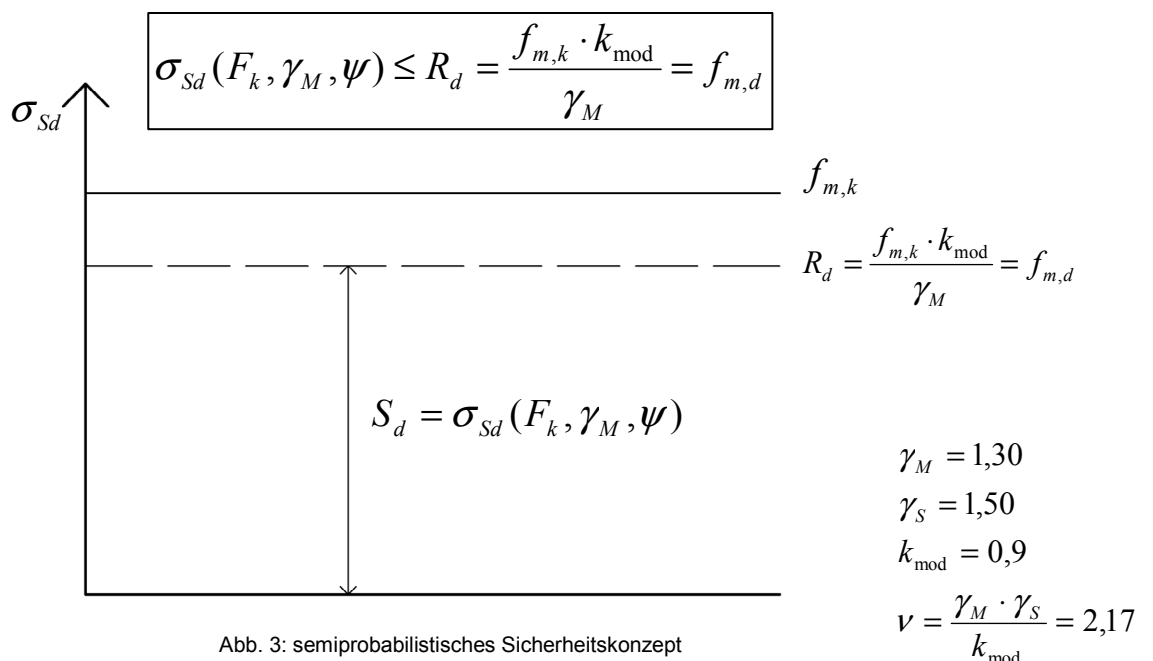


Abb. 3: semiprobabilistisches Sicherheitskonzept

In dieser Abbildung wird das System der Teilsicherheitsbeiwerte veranschaulicht. Auf der einen Seite wird die Bruchspannung $f_{m,k}$ durch den Modifikationsfaktor k_{mod} und den Teilsicherheitsbeiwert der Materialseite γ_M abgemindert. Auf der anderen Seite werden die Einwirkungen einen Teilsicherheitsbeiwert γ_S erhöht.

2.4. Erklärung der Indizes im Eurocode

Die im Eurocode angeführten Formelzeichen sind den in der europäischen Normung eingeführten Symbolen angepasst. So basieren die Fußzeiger auf den Fachausdrücken in englischer Sprache und haben bei zusammengesetzten Symbolen wie beispielsweise Festigkeitswerten in ihrer Reihenfolge nachstehende Bedeutung:

- Erster Index: Art der Beanspruchung
- Zweiter Index: Richtung der Beanspruchung
- Dritter Index: Definition, ob es sich um einen Charakteristischen oder um einen Bemessungswert handelt.

Im Folgenden sind die Bedeutungen einiger wichtiger Indizes erklärt:

c	Druck
cr	kritischer Wert für einen Querschnitt
crit	kritischer Wert für einen Bauteil
d	Bemessungswert
g; G	Eigengewicht
k	charakteristischer Wert
m	Biegung
max	Maximum
mean	Mittelwert
min	Minimum
mod	modifizierend
q, Q	Nutzlasten
t	Zug
tot	total, gesamt

v	Schub
x	in x-Richtung, um die x-Achse
y	in y-Richtung, um die y-Achse
z	in z-Richtung, um die z-Achse
$0; 90$	entsprechende Richtung in Bezug zur Faserrichtung
05	5%-Fraktile

Anschließend sind einige Beispiele für Indizes mit zusammengesetzten Symbolen angeführt:

$E_{0,mean}$	Mittelwert des Elastizitätsmoduls in Faserrichtung
$E_{0,05}$	5 %-Fraktilwert des Elastizitätsmoduls in Faserrichtung
$f_{c,0,k}$	charakteristischer Wert der Druckfestigkeit in Faserrichtung
$f_{c,0,d}$	Bemessungswert der Druckfestigkeit in Faserrichtung
$F_{t,90,d}$	Bemessungswert einer Zugkraft rechtwinkelig zur Faserrichtung

2.5. Bemessungssituation

Bemessungssituationen werden wie folgt eingeteilt:

- Ständige Situationen, die in üblichen Nutzungsbedingungen des Tragwerks entsprechen
- Vorübergehende Situationen, die sich auf zeitlich begrenzte Zustände des Tragwerks beziehen, z.B. im Bauzustand oder bei der Instandsetzung
- Außergewöhnliche Situationen, z.B. Brand, Explosion, Anprall
- Situationen bei Erdbeben

Die Bemessungssituation hat im Holzbau eine besondere Bedeutung, da von vornherein nicht gesagt werden kann, welcher Lastfall für einen Bauteil maßgebend wird. Dies liegt im Modifikationsfaktor k_{mod} begründet. Dieser wechselt für Lasten unterschiedlicher Dauer.

Da die Werkstoffeigenschaften von Holz im besonderen Umfang von der Holzfeuchte und von Lasteinwirkungsdauer abhängig sind, werden sie zusätzliche in Abhängigkeit von dem im Einbauzustand zu erwartenden Größen dieser Parameter modifiziert. Dies ist ein Novum im Vergleich zu den Bemessungsnormen der anderen Baustoffe (Stahl, Stahlbeton, Mauerwerk usw.), und macht das Verfahren eindeutig komplizierter. So kann es beim Baustoff Holz zu einer Situation kommen, in der eine Einwirkungskombination für die Bemessung eines Bauteils maßgebend wird, die nicht die maximale Schnittgröße liefert. Der Ingenieur muss mehrere Lastkombinationen in der Berechnung betrachten, um zum maßgebenden Nachweis zu gelangen.

2.6. Definition von Grenzzuständen

Der Eurocode 5 ist eine europäische Norm auf der Grundlage von Grenzzuständen. Grenzzustände sind Zustände, bei deren Überschreitung das Tragwerk die angenommenen Entwurfsanforderungen nicht mehr erfüllt. Der EC unterscheidet in

- Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Hierunter fallen zum einen Verformungen die die Nutzung bzw. das Erscheinungsbild des Tragwerkes beeinträchtigen und zum anderen Schwingungen welche Schäden am Bauwerk bzw. Unbehagen bei den Benutzern auslösen.

- Grenzzustände der Tragfähigkeit

Hierbei ist die Sicherheit von Personen oder die Sicherheit des Tragwerks betroffen.

Darunter versteht man den Einsturz oder eine andere Form des Versagens eines Tragwerkes bzw. eines Teils davon. Dies kann durch verschiedene Gründe wie zum Beispiel Verlust des Gleichgewichtes, Versagen durch übermäßige Verformung, Verlust der Stabilität, Bruch,... eintreten.

Zur Beurteilung der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit werden Bemessungssituationen angenommen, die für Bauwerk, Bauteil, Querschnitt, Querschnittspunkt und Verbindungsmittel das höchste Beurteilungskriterium (z.B.: Beanspruchung, Verformung,...) ergeben.

Ziel der Bemessung ist eine niedrige Versagenswahrscheinlichkeit. Es soll also eine geringe Wahrscheinlichkeit gegeben sein, dass die Einwirkungen größer sind als die Tragfähigkeit. Dazu werden mit Teilsicherheitsbeiwerten auf der einen Seite die Einwirkungen erhöht und auf der anderen Seite die Widerstände verringert. Die so erhaltenen Bemessungswerte werden gegenübergestellt. Dies lässt sich wie folgt darstellen:

$$S_d \leq R_d \text{ oder } \frac{S_d}{R_d} \leq 1 \quad (4)$$

S_d ... Bemessungswert einer Schnittgröße (z.B. Längskraft, Querkraft, Biegemoment) oder Spannung (z.B. Zug- oder Biegespannung) infolge einer Einwirkung

R_d ...Bemessungswert eines Widerstandes (z.B. Tragfähigkeit eines Bauteils für Zugkräfte)

2.7. Methode der Teilsicherheitsbeiwerte

Bei Nachweisverfahren mit Teilsicherheitsbeiwerten ist zu zeigen, dass in allen maßgebenden Bemessungssituationen bei Ansatz der Bemessungswerte für Einwirkungen oder deren Auswirkungen und für Tragwiderstände keiner der maßgebenden Grenzzustände überschritten wird.

2.7.1. Bemessungswert der Baustoffeigenschaften

Da Holz ein natürlich gewachsener Baustoff ist, weist es bei den mechanischen Eigenschaften große Streuungen auf. Diese Eigenschaften folgen einer statistischen Verteilung. Für die Bemessung werden charakteristische Werte definiert. Dies wäre zum einen der 5 %-Fraktilwert der Grundgesamtheit (X_{05}), also jener Wert der statistischen Verteilung der von 5 % der Fälle unterschritten wird. Dieser Wert wird für Festigkeitskenngrößen sowie für die Rohdichte verwendet. Zum anderen wird der 50 %-Fraktilwert verwendet. Dieser Wert stellt den Mittelwert der Verteilung dar und ihm liegen die Steifigkeitskenngrößen zu Grunde.

Der Teilsicherheitsbeiwert γ_M für eine Baustoffeigenschaft berücksichtigt:

- Ungünstige Abweichungen der Baustoffeigenschaft vom charakteristischen Wert
- Unschärfen im Widerstandsmodell
- Streuung von Probeeigenschaften
- Streuung von maßgebenden Eigenschaften am Bauteil

Tab. 1: Teilsicherheitsbeiwerte γ_M für Baustoffeigenschaften und Beanspruchbarkeiten aus [1]

Grundkombinationen:	
Vollholz	1,3
Brettschichtholz	1,25
LVL, Sperrholz, OSB	1,2
Spanplatten	1,3
Harte Faserplatten	1,3
Mittelharte Faserplatten	1,3
MDF-Faserplatten	1,3
Weiche Faserplatten	1,3
Verbindungen	1,3
Nagelplatten (Stahleigenschaften)	1,25
Außergewöhnliche Kombinationen	1

Des Weiteren ist im Holzbau der Einfluss der Holzfeuchte und der Lasteinwirkungsdauer zu berücksichtigen. Dies erfolgt im EC 5 über den Modifikationsfaktor k_{mod} .

Der Bemessungswert der Festigkeit X_d bzw. der Bemessungswert der Beanspruchbarkeit (Tragfähigkeit) R_d ergibt sich für den Nachweis der Tragfähigkeit unter Berücksichtigung von

- Lasteinwirkungsdauer
- Nutzungsklasse
- Teilsicherheitsbeiwert

zu

$$X_d = k_{\text{mod}} \cdot \frac{X_k}{\gamma_m} \quad (5)$$

$$R_d = k_{\text{mod}} \cdot \frac{R_k}{\gamma_m} \quad (6)$$

2.7.2. Bemessungswert der Beanspruchung

Eine Möglichkeit der Einteilung der Einwirkungen erfolgt nach der zeitlichen Veränderung des Auftretens:

- Ständige Einwirkungen (G): z.B. Eigengewicht von Tragwerken, eingebauten Ausrüstungen oder indirekte Einwirkungen aus Schwinden oder ungleichmäßigen Setzungen
- Veränderliche Einwirkungen (Q), z.B. Nutzlasten auf Decken, Trägern oder Dächern, Wind und Schneelasten
- Außergewöhnliche Einwirkungen (A), z.B. Explosionen oder Fahrzeuganprall

Der Bemessungswert der Beanspruchungen wird einerseits durch die Einwirkung selbst und durch die geometrischen Größen bestimmt.

Einwirkungen können zum einen Kräfte bzw. Lasten (direkte Einwirkungen), oder auch Zwänge, z.B.: Temperatur, Setzungen,...(indirekte Einwirkungen) sein.

Weiters werden Einwirkungen nach der zeitlichen Veränderlichkeit des Auftretens in ständige (G) und veränderliche (Q) unterschieden. So kann dann der Bemessungswert der Einwirkung aus einer Kombination von charakteristischen Werten der ständigen Einwirkungen und der veränderlichen Einwirkungen berechnet werden. Diese Kombination sieht z. B. für den Grenzzustand der Tragfähigkeit folgendermaßen aus

$$S_d = \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{j \geq 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (7)$$

- $\gamma_{G,j}$ Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen
- $\gamma_{Q,i}$ Teilsicherheitsbeiwert für veränderliche Einwirkungen
- $\psi_{0,i}$ Kombinationsbeiwert, der die Wahrscheinlichkeit des gleichzeitigen Auftretens verschiedener veränderlicher Einwirkungen berücksichtigt
- $G_{k,j}$ charakteristischer Wert der ständigen Einwirkungen
- $Q_{k,1}$ charakteristischer Wert jener veränderlichen Einwirkung, welche die größte Beanspruchung hervorruft
- $Q_{k,i}$ charakteristischer Wert der übrigen veränderlichen Einwirkungen

Die Kombinationsbeiwerte sind aus dem Eurocode – Grundlagen der Tragwerksplanung [3] zu entnehmen.

Tab. 2: Empfehlungen für Zahlenwerte für Kombinationsbeiwerte im Hochbau [3]

Einwirkung	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Nutzlasten im Hochbau (siehe EN 1991-1-1)	0,7	0,5	0,3
Kategorie A: Wohngebäude	0,7	0,5	0,3
Kategorie B: Bürogebäude	0,7	0,7	0,6
Kategorie C: Versammlungsbereiche	0,7	0,7	0,6
Kategorie D: Verkaufsflächen	1	0,9	0,8
Kategorie E: Lagerflächen	0,7	0,7	0,6
Kategorie H: Dächer	0	0	0
Schneelasten im Hochbau (siehe EN 1991-1-3)			
Orte bis NN über 1000 m	0,7	0,5	0,2
Orte über NN über 1000 m	0,5	0,2	0
Windlasten im Hochbau (siehe EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0

Für die Kombination von Einwirkungen bei ständigen oder vorübergehenden Bemessungssituationen (Grundkombinationen) sind die Kombinationsbeiwerte $\psi_{0,i}$ zu verwenden.

$\psi_{1,i}$ bzw. $\psi_{2,i}$ werden für außergewöhnliche Bemessungssituationen sowie für Erdbebenfälle und Gebrauchstauglichkeitsnachweise verwendet.

Die unterschiedlichen Kombinationsbeiwerte und auch die unterschiedlichen Klassen der Lasteinwirkungsdauer ergeben nun eine Reihe von Bemessungssituationen.

Die größte Beanspruchung ergibt sich dann, wenn alle ungünstigen Einwirkungen in einer Lastkombination zusammengefasst werden. Holz weist jedoch die Besonderheit der Abhängigkeit der Festigkeitseigenschaften von der Dauer der Lasteinwirkung auf. Dadurch kann eine Lastfallkombination maßgebend werden, die nicht die Betragsmäßig größte Beanspruchung liefert.

Dies kann dann der Fall sein, wenn die Schneelasten im Vergleich zu den Windlasten einen erheblichen Einfluss haben, oder wenn das Eigengewicht im Vergleich zu den Schnee- oder Windlasten sehr groß ist, was aber im Holzbau kaum der Fall sein wird.

Tab. 3: Einwirkungskombinationen nach Eurocode

Kombinationen	g	p	s	w	KLED	k_{mod}
1 g	1,35				ständig	0,6
2 g+p	1,35	1,5			mittel	0,8
3 g+p+s	1,35	1,5	$1,5 \cdot \psi$		kurz ¹⁾	0,9
4 g+p+s	1,35	$1,5 \cdot \psi$	1,5		kurz	0,9
5 g+p+w	1,35	1,5		$1,5 \cdot \psi$	kurz	0,9
6 g+p+w	1,35	$1,5 \cdot \psi$		1,5	kurz	0,9
7 g+p+s+w	1,35	1,5	$1,5 \cdot \psi$	$1,5 \cdot \psi$	kurz	0,9
8 g+p+s+w	1,35	$1,5 \cdot \psi$	1,5	$1,5 \cdot \psi$	kurz	0,9
9 g+p+s+w	1,35	$1,5 \cdot \psi$	$1,5 \cdot \psi$	1,5	kurz	0,9

Hier sind die Kombinationsbeiwerte aus Tab.2 für die jeweilige Belastung einzusetzen.

In [8] wird für diese Überlagerungsregeln auf die DIN 1055-100 verwiesen und darüber hinaus eine Vereinfachung in der DIN 1052 [10] beschrieben.

Es sind dabei nur zwei Fälle zu untersuchen:

- Sämtliche Eigenlasten und die ungünstigste veränderliche Einwirkung
- Sämtliche Eigenlasten und alle ungünstig wirkenden veränderlichen Einwirkungen

Im ersten Fall werden die Eigenlasten mit $\gamma_G = 1,35$ und die veränderliche Einwirkung mit 1,50 multipliziert.

Im zweiten Fall werden alle Einwirkungen mit 1,35 multipliziert.

Tab. 4: Vereinfachte Einwirkungskombinationen nach DIN 1052

Kombinationen	g	p	s	w	KLED	k_{mod}
1 g+p	1,35	1,5			mittel	0,8
2 g+p+s+w	1,35	1,35		1,35	1,35 kurz	0,9

Diese Kombinationen ermöglichen eine wesentliche Vereinfachung des Bemessungsvorganges, führt jedoch gegenüber den Einwirkungskombinationen nach Eurocode zu konservativeren Bemessungsergebnissen.

3. Theoretische Grundlagen

3.1. Tragfähigkeit bei Beanspruchung rechtwinklig zur Stabachse

3.1.1. Johansens Theorie

Die Theorie über die Ermittlung der Tragfähigkeit von stiftförmigen Verbindungsmitteln wie z.B. Stabdübeln, welche im EC 5 Eingang gefunden hat, wurde erstmals von Johansen [11] vorgeschlagen. Dabei wird angenommen, dass sich der Stift und die Bauteile ideal starr-plastisch verhalten. Das stiftförmige Verbindungsmittel wirkt also wie ein starr-plastischer Balken auf einer starr-plastischen Bettung der zu verbindenden Bauteile. Dies führt zu folgender Last-Eindrückungs-Beziehung.

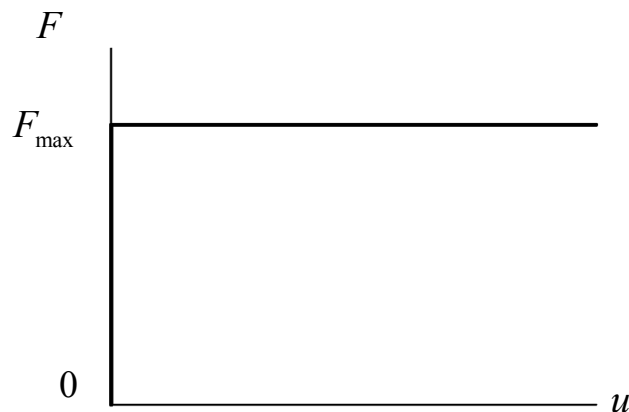


Abb. 4: Vereinfachte Last-Eindrückungs-Beziehung [13]

Durch diese Vereinfachung wird die Wirklichkeit nur näherungsweise erfasst. Die Auswirkungen auf das Ergebnis sind aber gering und die Berechnung wird vereinfacht.

Durch diese Annahmen erhält man nach [6] folgende Möglichkeiten des Tragverhaltens und der Verformung:

- reines Lochleibungsversagen tritt auf; der Stift bleibt gerade; es tritt eine reine Translationsverformung oder eine kombinierte Translations- und Rotationsverformung ein
- Ausbildung von Fließgelenken mit gleichzeitigem Lochleibungsversagen tritt auf; im Stift bilden sich ein oder zwei Fließgelenke aus, außerhalb dieser Fließzonen bleibt der Stift gerade

Spröde Versagensformen, wie z.B. Spaltversagen des Holzes werden ausgeschlossen.

Hierzu können laut [8] folgende Maßnahmen angewandt werden:

- Erhöhen der Mindestabstände der Verbindungsmittel parallel zur Faserrichtung
- Verstärken des Holzes im Anschlussbereich quer zur Faserrichtung durch außen oder innen liegende Verstärkungen
- Vermeiden von vielen in Kraft- und Faserrichtung hintereinander liegenden Verbindungsmitteln
- Verwenden von schlanken Stiften mit einem Verhältnis von Holzdicke zu Stiftdurchmesser von mindestens 6
- Verwenden von Stiften aus Stahl niedriger Festigkeitsklassen

Zwei Effekte, welche zu einer Erhöhung der Tragfähigkeit führen werden von Johansen nicht berücksichtigt. Zum einen ist dies die Reibung zwischen den Stiften und den Holzbauteilen. Zum anderen sind dies die Zugkräfte in den Stiften, welche bei Verformung auftreten.

Im Eurocode 5 werden die Gleichungen zur Ermittlung der Tragfähigkeit durch die folgenden Abbildungen erklärt.

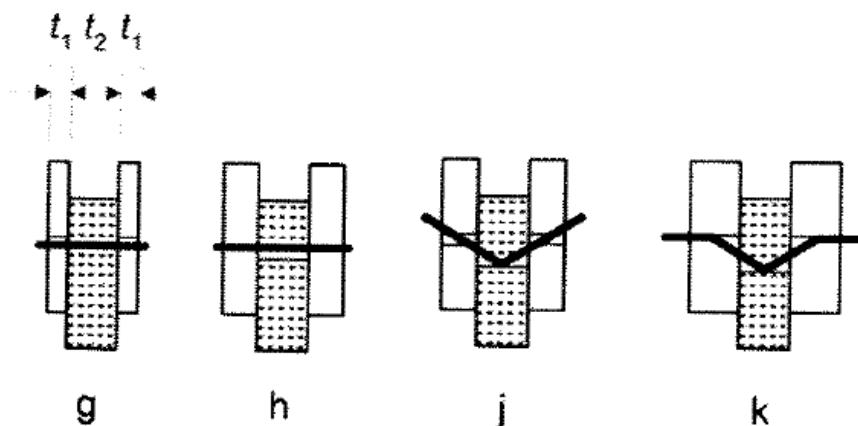


Abb. 5: Versagensmechanismen für zweischnittige Holz- und Holzwerkstoff-Holz-Verbindungen

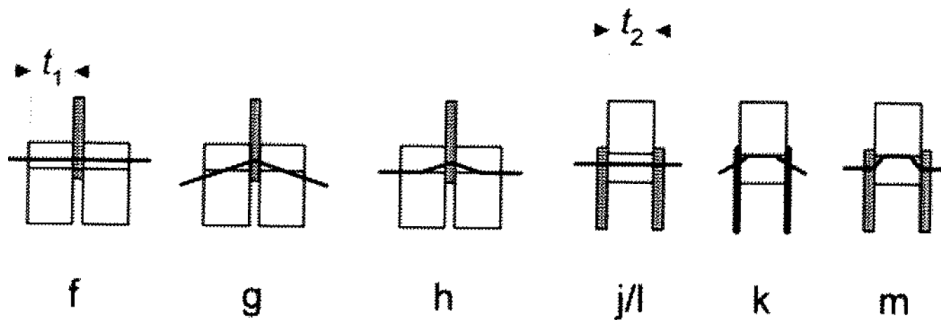


Abb. 6: Versagensmechanismen für zweischnittige Stahlblech-Holz-Verbindungen

Anhand der in Abb. 5 und 6 dargestellten Versagensarten werden die unterschiedlichen Versagensmechanismen beschrieben.

Versagensmechanismus 1:

Hier wird die Lochleibungsfestigkeit in mindestens einem der zu verbindenden Bauteile über die gesamte Länge erreicht. Dies tritt in den Abb. 5 g) und h) sowie in Abb. 6 f), j) und l) auf.

Durch die plastische Eindrückung des Holzes kommt es zu Verformungen, wobei der Stift selbst keine plastische Verformung aufweist und gerade bleibt. Die Tragfähigkeit steigt proportional mit der Lochleibungsfläche an, bei konstantem Verbindungsmitteldurchmesser also proportional zur Schlankheit λ .

Versagensmechanismus 2:

Beim Versagensmechanismus 2 tritt kombiniertes Versagen von Holz- bzw. Holzwerkstoff und Verbindungsmittel auf. Dies tritt in Abb. 5 j) und Abb. 6 g) und k) auf.

Im Mittelholz tritt im Verbindungsmittel ein Fließgelenk auf. Beim Seitenholz tritt durch die Schrägstellung des Stiftes eine plastische Verformung auf, es wird also die Lochleibungsfestigkeit erreicht. Der Zusammenhang zwischen der Tragfähigkeit und der Schlankheit ist bei diesem Versagensmechanismus nicht mehr proportional.

Versagensmechanismus 3:

Bei diesem Versagensmechanismus führt zur größten Tragfähigkeit. Es stellen sich beidseitig Fließgelenke im Verbindungsmittel ein. Dies tritt in Abb. 5 k) sowie in Abb. 6 h) und m) auf.

Bei einer Erhöhung der Schlankheit kann keine weitere Tragfähigkeitssteigerung erzielt werden.

Die Gleichungen zu den einzelnen Versagensfällen nach EC 5 werden jeweils an der Hälfte einer symmetrischen zweischnittigen Verbindung hergeleitet.

Die in den folgenden Herleitungen und Gleichungen verwendeten Formelzeichen sind wie folgt definiert:

- t_1 Holzdicke bzw. Eindringtiefe des Verbindungsmittels **im Seitenholz**
 t_2 Holzdicke bzw. Eindringtiefe des Verbindungsmittels **im Mittelholz**
 $f_{h,1,k}$ charakteristischer Wert der Lochleibungsfestigkeit **im Seitenholz**
 $f_{h,2,k}$ charakteristischer Wert der Lochleibungsfestigkeit **im Mittelholz**
 β Verhältnis der Lochleibungsfestigkeiten der Bauteile zueinander
 $M_{y,Rk}$ charakteristisches Fließmoment des Verbindungsmittels
 d Durchmesser des Verbindungsmittels
 $F_{v,Rk}$ charakt. Wert der Tragfähigkeit pro Scherfuge und Verbindungsmittel
 $F_{ax,Rk}$ charakt. Auszieh Widerstand des Verbindungsmittels

3.1.2. Zweischnittige Holz-Holz-Verbindungen

Herleitung Versagensart g

Die Versagensarten g beschreibt das **Lochleibungsversagen des Seitenholzes**. Aus der Abb. 7 ergibt sich die charakteristische Tragfähigkeit $F_{v,Rk}$ unter der Annahme einer gleichmäßig verteilten Lochleibungsspannung zu

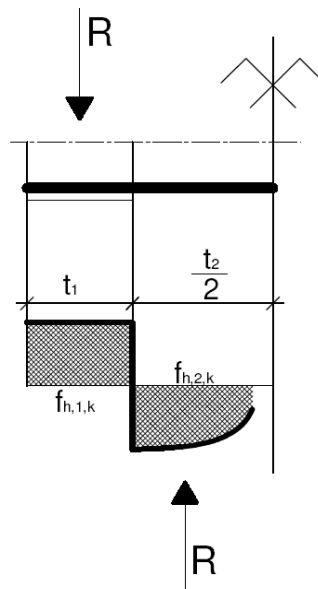


Abb. 7: Versagensart g: Lochleibungsversagen im Seitenholz [13]

$$F_{v,Rk} = f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d \quad (8)$$

Herleitung Versagensart h

Die Versagensarten h beschreibt das **Lochleibungsversagen des Mittelholzes**. Aus der Abb.:8 ergibt sich die charakteristische Tragfähigkeit $F_{v,Rk}$ unter der Annahme einer gleichmäßig verteilten Lochleibungsspannung zu

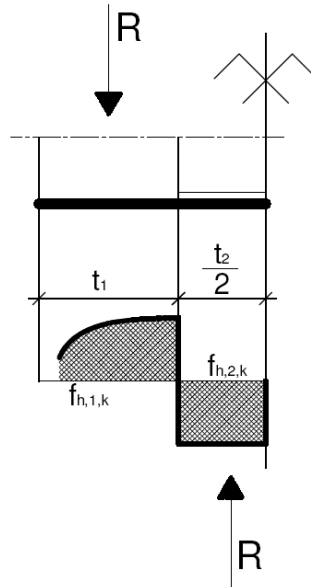


Abb. 8: Versagensart h: Lochleibungsversagen im Mittelholz [13]

$$F_{v,Rk} = 0,5 \cdot f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d \quad (9)$$

Herleitung Versagensart j

Hier tritt ein Fließgelenk im Mittelholz auf. Dadurch stellt sich der Stift schräg und im Seitenholz wird die maximal aufnehmbare Lochleibungsspannung überschritten. Es tritt also **kombiniertes Versagen** auf.

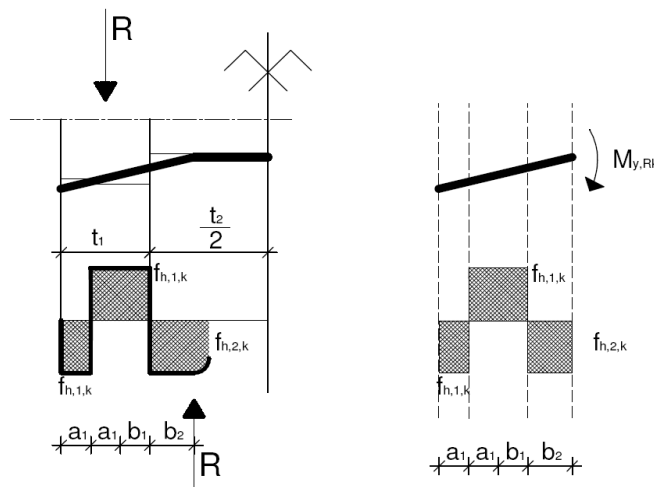


Abb. 9: Versagensart j: kombiniertes Versagen [13]

Die Querkraft im Stift ist am Ort des größten Biegemomentes gleich Null.

Es gilt wiederum

$$F_{v,Rk} = f_{h,1,k} \cdot d \cdot b_1 = f_{h,2,k} \cdot d \cdot b_2 = \beta \cdot f_{h,1,k} \cdot d \cdot b_2 \quad (10)$$

$$b_1 = \beta \cdot b_2 \quad (11)$$

$$M_{y,Rk} = -f_{h,2,k} \cdot d \cdot \frac{b_2^2}{2} + f_{h,1,k} \cdot (b_1 + a_1) \cdot \left(b_2 + \frac{b_1 + a_1}{2} \right) - f_{h,1,k} \cdot d \cdot a_1 \cdot \left(b_1 + b_2 + \frac{3 \cdot a_1}{2} \right) \quad (12)$$

Einsetzen von $f_{h,2,k} = \beta \cdot f_{h,1,k}$ und $a_1 = \frac{t_1 - b_1}{2}$ ergibt:

$$b_1^2 + t_1 \cdot \frac{2 \cdot \beta}{2 + \beta} \cdot b_1 - \frac{\beta \cdot t_1}{2 + \beta} - \frac{M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d} \cdot \frac{4 \cdot \beta}{2 + \beta} = 0 \quad (13)$$

Daraus folgt:

$$b_1 = \frac{t_1}{2 + \beta} \left[\sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] \quad (14)$$

Durch einsetzen von $F_{v,Rk} = f_{h,1,k} \cdot d \cdot b_1$ wird daraus

$$F_{v,Rk} = \frac{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1}{2 + \beta} \left[\sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] \quad (15)$$

Herleitung Versagensart k

Diese Versagensart liefert die **maximale Tragfähigkeit des Verbindungsmittels**. Durch die ausreichende Holzdicke in beiden Bauteilen kommt es zu einer Einspannung des Stabdübels. Dadurch treten je Scherfuge zwei Fließgelenke auf.

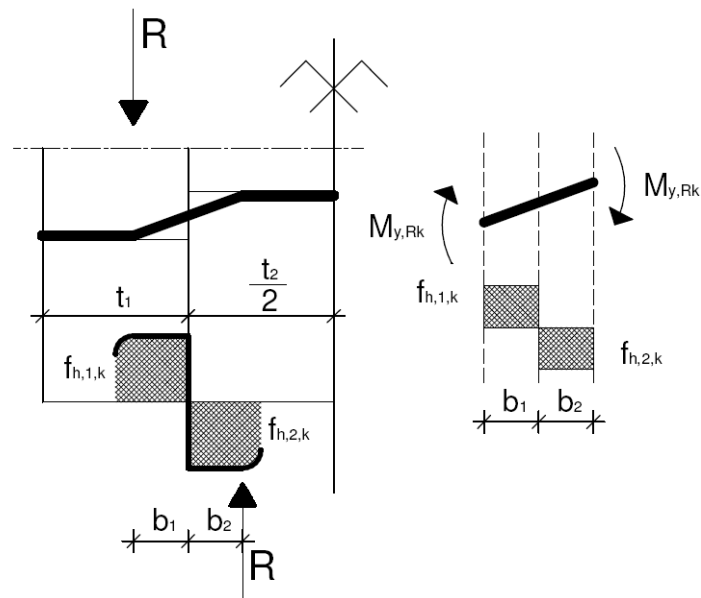


Abb. 10: Versagensart k: Fließgelenkkette [13]

$$M_{y,Rk} + M_{y,Rk} = f_{h,1,k} \cdot d \cdot b_1 \cdot \left(b_2 + \frac{b_1}{2} \right) - \beta \cdot f_{h,1,k} \cdot \frac{b_2^2}{2} \quad (16)$$

$$b_2 = \frac{b_1}{\beta} \quad (17)$$

$$b_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \quad (18)$$

Durch einsetzen von $F_{v,Rk} = f_{h,1,k} \cdot d \cdot b_1$ wird daraus

$$F_{v,Rk} = \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} \quad (19)$$

Im Eurocode 5 sind die Gleichungen zur Berechnung der Tragfähigkeit für zweischnittige Holz - Holz- und Holzwerkstoff-Holz-Verbindungen folgendermaßen angegeben.

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d \quad \text{g (20)} \\ 0,5 \cdot f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d \quad \text{h (21)} \\ 1,05 \cdot \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \cdot \left[\sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad \text{j (22)} \\ 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad \text{k (23)} \end{array} \right.$$

mit

$$\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}} \quad (24)$$

Im Vergleich mit den Formeln die sich nach Johansen ergeben fällt auf, dass die Versagensarten j) mit einem Faktor 1,05 und die Versagensart k) mit dem Faktor 1,15 multipliziert werden. Dies resultiert aus dem Konzept der Teilsicherheitsbeiwerte. Die Bemessungswerte der Tragfähigkeit werden erst nach Ermittlung der charakteristischen Tragfähigkeit pro Scherfuge berechnet. Da die beiden genannten Versagensarten mehr vom Fließmoment als von der Lochleibungsspannung abhängen, aber trotzdem mit den gleichen Teilsicherheitsbeiwerten bzw. Modifikationsfaktoren multipliziert werden, hat man im EC 5 diese Faktoren hinzugefügt. Des Weiteren taucht bei den genannten Versagensarten der Summand $\frac{F_{ax,Rk}}{4}$ auf. Dieser berücksichtigt, dass bei Verformungen des Verbindungsmittels Kräfte in deren Längsachse auftreten, welche die Tragfähigkeit erhöhen (siehe 3.3.1). Diese Erhöhung der Tragfähigkeit wird auch "Seileffekt" bzw. "Einhängeeffekt" genannt.

3.1.3. Zweischnittige Stahlblech-Holz-Verbindungen (Stahlblech als Mittelteil der Verbindung)

Bei zweischnittigen Stahlblech-Holz-Verbindungen ist es von Bedeutung, ob der Mittelteil ein Stahlblech ist, oder ob die beiden Außenteile aus Stahl sind.

Besteht bei Verbindungen der Mittelteil aus einem Stahlblech, kann die Symmetrie der Verbindung das Auftreten eines plastischen Gelenks im Stahlblech ermöglichen. Das Auftreten des Fließgelenkes ist unabhängig von der Stahlblechdicke, setzt allerdings eine ausreichende Tragfähigkeit des Stahlbleches selbst voraus.

Herleitung Versagensart f

Hierbei handelt es sich wieder um **reines Lochleibungsversagen** des Seitenholzes. Unter der Annahme einer gleichmäßig verteilten Lochleibungsspannung ergibt sich die charakteristische Tragfähigkeit zu

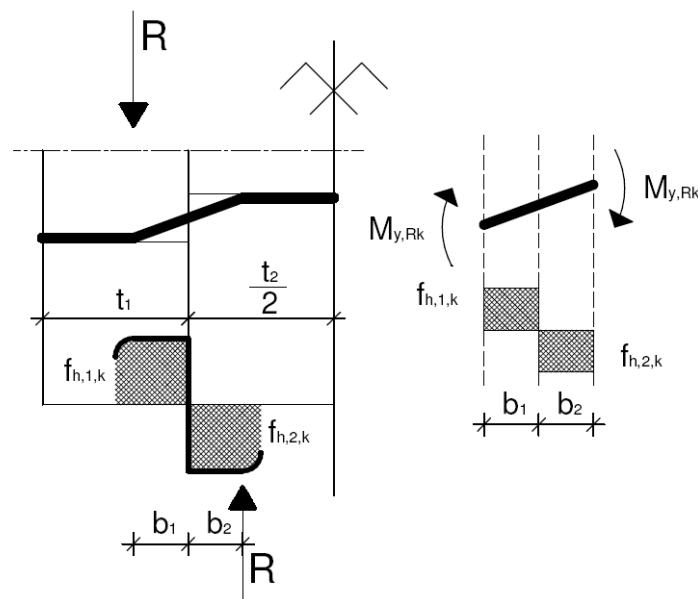


Abb. 11: Versagensart f: Lochleibungsversagen im Holzteil [13]

$$F_{v,Rk} = f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d \quad (25)$$

Herleitung Versagensart g

Durch eine Steigerung der Seitenholzdicke, steigert sich auch die aufnehmbare Kraft im Holzbauteil. Dadurch kommt es zur Ausbildung eines Fließgelenkes in der Scherfuge und in weiterer Folge zur Schiefstellung des Verbindungsmittels. Es tritt also **kombiniertes Versagen** auf.

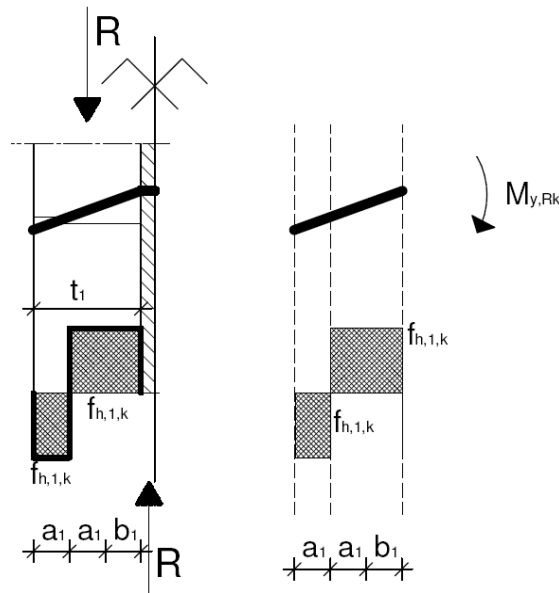


Abb. 12: Versagensart g: kombiniertes Versagen [13]

$$M_{y,Rk} = f_{h,1,k} \cdot d \cdot \frac{b_1^2}{2} + f_{h,1,k} \cdot d \cdot a_1 \cdot \left(t_1 - \frac{3 \cdot a_1}{2} \right) - f_{h,1,k} \cdot d \cdot a_1 \cdot \left(t_1 - \frac{a_1}{2} \right) \quad (26)$$

Einsetzen von $a_1 = \frac{t_1 - b_1}{2}$ ergibt:

$$b_1^2 + 2 \cdot t_1 \cdot b_1 - \left(t_1^2 + \frac{4 \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d} \right) = 0 \quad (27)$$

$$b_1 = t_1 \cdot \left[\sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - 1 \right] \quad (28)$$

$$F_{v,Rk} = f_{h,1,k} \cdot d \cdot b_1 = f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1 \cdot \left[\sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - 1 \right] \quad (29)$$

Herleitung Versagensart h

Eine nochmalige Steigerung der Seitenholzdicke führt zu einer Einspannung im Holzbauteil. Es bilden sich pro Scherfuge zwei Fließgelenke aus. Somit ist die **höchstmögliche Tragfähigkeit** dieser Verbindungsart gegeben.

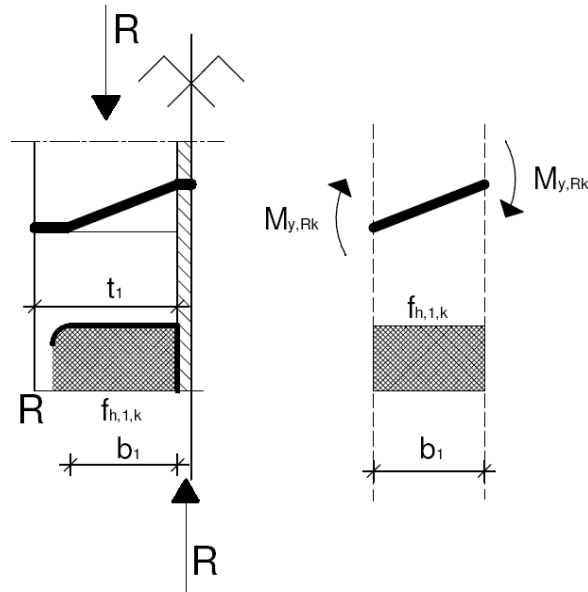


Abb. 13: Versagensart h: Fließgelenkkette [13]

$$2 \cdot M_{y,Rk} = f_{h,1,k} \cdot d \cdot \frac{b_1^2}{2} \quad (30)$$

$$b_1 = 2 \cdot \sqrt{\frac{M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d}} \quad (31)$$

$$F_{v,Rk} = f_{h,1,k} \cdot d \cdot b_1 = 2 \cdot \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} \quad (32)$$

$$F_{v,Rk} = 1,5 \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} \quad (33)$$

Im Eurocode 5 sind die Gleichungen zur Berechnung der Tragfähigkeit für zweischnittige Verbindungen bei denen der Stahlteil den Mittelteil der Verbindung darstellt folgendermaßen angegeben.

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d \quad \text{f (34)} \\ f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d \cdot \left[\sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad \text{g (35)} \\ 2,3 \cdot \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad \text{h (36)} \end{array} \right.$$

Auch hier wird, unter Berücksichtigung des Versagensmechanismus, die Versagensart h) nach Gleichung (36) mit einem Faktor zur Erhöhung der Tragfähigkeit ausgestattet. Auch der ‘‘Seileffekt‘‘ findet hier seine Berücksichtigung.

3.1.4. Zweischnittige Stahlblech-Holz-Verbindungen (Stahlblech als Seitenteil der Verbindung)

Sind die Stahlbleche als Seitenteil der Verbindung ausgeführt, spielt deren Dicke eine wesentliche Rolle. Deshalb kommt es hier zu einer Einteilung in dünne und dicke Stahlbleche.

3.1.4.1 dünne Stahlbleche als Seitenteile einer zweischnittigen Verbindung

Weisen die Stahlbleche eine Dicke auf, welche unter dem halben Durchmesser des Verbindungsmittels liegt, so handelt es sich lt. EC 5 um dünne Stahlbleche.

Bei dünnen Stahlblechen kann nicht davon ausgegangen werden, dass es zu einer Einspannung des Verbindungsmittels im Stahlblech kommt. Deshalb kann sich lediglich im Holzteil ein Fließgelenk ausbilden.

Eine ausreichende Tragfähigkeit der Stahlbleche wird vorausgesetzt.

Für die Herleitungen der Versagensarten wird wieder die Hälfte der zweischnittigen symmetrischen Verbindung herangezogen.

Herleitung Versagensart j

Die erste Versagensart stellt das **reine Lochleibungsversagen** des Mittelholzes dar und ergibt sich zu

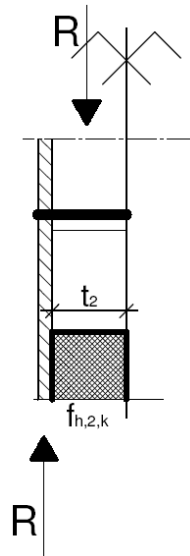


Abb. 14: Versagensart j: Lochleibungsversagen im Mittelholz [13]

$$F_{v,Rk} = 0,5 \cdot f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d \quad (37)$$

Herleitung Versagensart k

Bei dünnen Blechen entsteht keine Einspannung für das Verbindungsmittel. Es bildet sich in der Scherfuge kein Fließgelenk aus und das Verbindungsmittel verdreht sich. Der Holzbauteil weist eine ausreichende Tragfähigkeit auf und ermöglicht das Auftreten eines Fließgelenkes pro Scherfuge (**kombiniertes Versagen**).

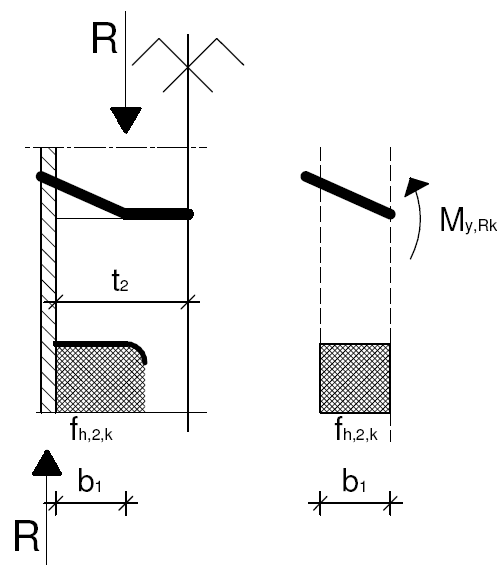


Abb. 15: Versagensart k: kombiniertes Versagen [13]

$$0 = -M_{y,Rk} + f_{h,2,k} \cdot d \cdot \frac{b_2^2}{2} \quad \text{und} \quad b_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,2,k} \cdot d}} \quad (38)$$

$$F_{v,Rk} = f_{h,2,k} \cdot d \cdot b_2 = \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,2,k} \cdot d} \quad (39)$$

Im Eurocode 5 sind die Gleichungen zur Berechnung der Tragfähigkeit für zweischnittige Verbindungen mit dünnen Stahlblechen als Seitenteil der Verbindung folgendermaßen angegeben.

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} 0,5 \cdot f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d & \text{j (40)} \\ 1,15 \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,2,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{k (41)} \end{cases}$$

Hier wird ebenfalls, unter Berücksichtigung des Versagensmechanismus, die Versagensart k mit einem Faktor zur Erhöhung der Tragfähigkeit ausgestattet. Auch der ‘‘Seileffekt‘‘ findet hier seine Berücksichtigung.

3.1.4.1 dicke Stahlbleche als Seitenteile einer zweischnittigen Verbindung

Entspricht die Dicke der Stahlbleche mindestens dem Durchmesser des Verbindungsmittels, so handelt es sich lt. EC 5 um dicke Stahlbleche.

In diesem Fall wird davon ausgegangen, dass es zu einer Einspannung des Verbindungsmittels im Stahlblech kommt und sich Fließgelenke ausbilden.

Eine ausreichende Tragfähigkeit der Stahlbleche wird vorausgesetzt.

Wie bei den Herleitungen zuvor wird die Hälfte einer symmetrischen zweischnittigen Verbindung verwendet.

Herleitung Versagensart I

Die **Lochleibungsfestigkeit** wird auf der gesamten Länge des Mittelholzes überschritten. Die Tragfähigkeit ergibt sich zu

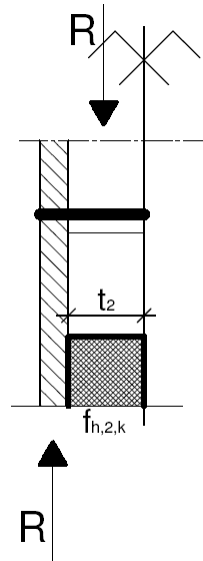


Abb. 16: Versagensart I: Lochleibungsversagen im Mittelholz [13]

$$0,5 \cdot f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d \quad (42)$$

Herleitung Versagensart m

Durch die Verwendung dicker Stahlbleche kann zusätzlich zum Fließgelenk im Holzbauteil ein Fließgelenk in der Scherfuge auftreten, es treten also **zwei Fließgelenke pro Scherfuge** auf.

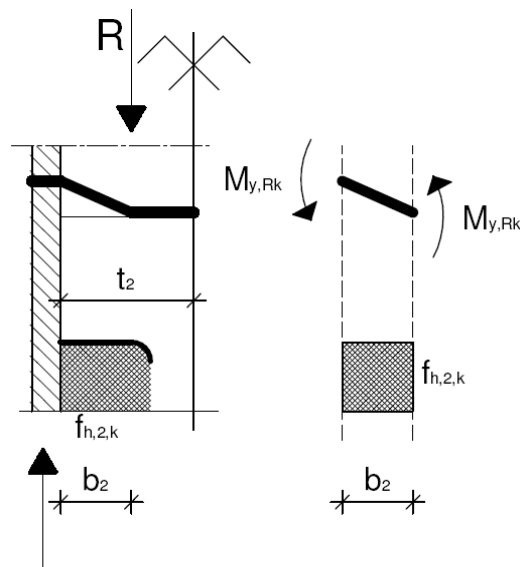


Abb. 17: Versagensart m: Fließgelenkkette [13]

$$2 \cdot M_{y,Rk} = f_{h,2,k} \cdot d \cdot \frac{b_2^2}{2} \quad (43)$$

$$b_2 = 2 \cdot \sqrt{\frac{M_{y,Rk}}{f_{h,2,k} \cdot d}} \quad (44)$$

$$F_{v,Rk} = f_{h,2,k} \cdot d \cdot b_2 = 2 \cdot \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,2,k} \cdot d} \quad (45)$$

$$F_{v,Rk} = 1,5 \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,2,k} \cdot d} \quad (46)$$

Im Eurocode 5 sind die Gleichungen zur Berechnung der Tragfähigkeit für zweischnittige Verbindungen mit dicken Stahlblechen als Seitenteil der Verbindung folgendermaßen angegeben.

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} 0,5 \cdot f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d & \text{l (47)} \\ 2,3 \cdot \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,2,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{m (48)} \end{cases}$$

Die Versagensart m) nach Gleichung (48) wird, wieder unter Berücksichtigung des Versagensmechanismus, mit einem Faktor zur Erhöhung der Tragfähigkeit versehen. Wie bei den vorangegangenen Gleichungen wird auch hier der "Seileffekt" berücksichtigt.

3.1.4.1 Stahlbleche als Seitenteile einer zweischnittigen Verbindung mit einer Dicke zwischen 0,5·d und 1,0·d

Bei Blechdicken zwischen 0,5·d und 1,0·d wird im EC 5 eine geradlinige Interpolation zwischen den Tragfähigkeiten von dünnen und dicken Stahlblechen empfohlen.

3.2. Mehrschnittige Verbindungen

In mehrschnittigen Verbindungen sollte die Tragfähigkeit pro Scherfuge unter der Annahme bestimmt werden, dass jede Scherfuge Teil einer Reihe von zweisechnittigen Verbindungen ist.

Die Gesamttragfähigkeit der mehrschnittigen Verbindung wird also als Summe der Mindesttragfähigkeiten der einzelnen Scherfugen aus den Bemessungsgleichungen für zweisechnittige Verbindungen definiert.

Um in einer mehrschnittigen Verbindung die Tragfähigkeit der einzelnen Scherfugen kombinieren zu können, hat in der Regel der vorherrschende Versagensmechanismus der Verbindungsmittel in der entsprechenden Fuge mit jedem anderen verträglich zu sein.

Die zu verbindenden Bauteile sollten so dimensioniert sein, reines Lochleibungsversagen in keinem Bauteil auftreten kann.

3.3. Sonderfälle

Im nachfolgende werden einige Sonderfälle für die Formeln von Johansen betrachtet.

Für einen Zug- bzw. Druckstoß bei dem die zu verbindenden Teile Materialien aus der gleichen Festigkeitsklasse aufweisen, ergibt sich das Verhältnis der charakteristischen Lochleibungsfestigkeiten β zu 1,0. Für die zu verbindenden Teile müssen der Winkel zwischen Kraft und Faserrichtung sowie die Rohdichte der verwendeten Materialien identisch sein.

Dadurch ergibt sich die Gleichung (22) für Versagensart j) zur Ermittlung der charakteristischen Tragfähigkeiten für zweisechnittige Holz-Holz- und Holzwerkstoff-Holz-Verbindungen zu:

$$F_{v,Rk} = 1,05 \cdot \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{3} \cdot \left[\sqrt{4 + \frac{12 \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (49)$$

3.3.1. Erhöhung der Tragfähigkeit

Die Tragfähigkeit von Verbindungen mit einem Versagensmechanismus welcher das Auftreten von einem oder mehreren Fließgelenken ermöglicht ist in Wirklichkeit höher als durch die Gleichungen von Johansen vorhergesagt. Seine Theorie lässt die Zugkräfte in Längsachse des Verbindungsmittels welche durch die Verformung der Stifte auftreten unberücksichtigt. Doch genau diese Kräfte tragen durch Reibung zwischen Holz und Verbindungsmittel und über Ankerwirkung von z.B.: Unterlegescheiben von Passbolzen zur Erhöhung der Tragfähigkeit bei ("Seileffekt" bzw. "Einhängeeffekt").

Im Eurocode 5 wird der Anteil der Seilwirkung zur Tragfähigkeit nach der Theorie von Johansen addiert. Für den "Seileffekt" wird ein Viertel des charakteristischen Wertes des Ausziehwiderstandes $F_{ax,Rk}$ berücksichtigt. Zusätzlich ist der Anteil der Seilwirkung auf folgende Prozente des Anteils nach der Johansen-Theorie zu begrenzen:

- runde Nägel	15%
- quadratische Nägel	25%
- andere Nägel	50%
- Schrauben	100%
- Bolzen	25%
- Stabdübel	0%

Ist $F_{ax,Rk}$ nicht bekannt, sollte der Anteil aus Seilwirkung zu null angenommen werden

Bei Stabdübeln wird der Ausziehwiderstand wegen der fehlenden Klemmwirkung nicht berücksichtigt.

Passbolzen können wie Bolzen behandelt werden. Die Tragfähigkeit nach Johansen kann also um maximal ein Viertel erhöht werden. Das verschafft Passbolzen einen klaren Vorteil gegenüber Stabdübeln und bedeutet auch eine Aufwertung gegenüber der ÖNORM B 4100-2. Falls der optische Eindruck durch die Passbolzen nicht beeinträchtigt wird, sind diese vom Kriterium der Tragfähigkeit gegenüber Stabdübeln zu bevorzugen.

3.3.2. Auszieh Widerstand

Der Auszieh Widerstand wird entweder durch die Zugfestigkeit des Bolzens oder durch die Tragfähigkeit der Unterlegescheibe bzw. des Stahlbleches (bei Stahlblech-Holz-Verbindungen) bestimmt [1].

Der Auszieh Widerstand in Abhängigkeit der Tragfähigkeit der Unterlegescheibe ergibt sich unter der Annahme eines charakteristischen Wertes der Druckspannung in der Berührungsfläche von $3,0 \cdot f_{c,90,k}$ lt. EC 5 zu

$$F_{ax,Rk} = f_{u,k} \cdot A_D \quad (50)$$

$$F_{ax,Rk} = 3,0 \cdot f_{c,90,k} \cdot A_u \quad (51)$$

A_U Fläche der Unterlegescheibe

A_D Fläche des Verbindungsmittels

$f_{c,90,k}$.. charakteristischer Wert der Druckfestigkeit quer zur Faser

$f_{u,k}$.. charakteristischer Wert der Zugfestigkeit des Verbindungsmittels

Weiters begrenzt der Eurocode 5 die Fläche eines Stahlbleches auf die einer kreisrunden Unterlegescheibe mit dem kleineren Wert aus

- $12 \cdot t$, mit t als Stahlblechdicke;
- $4 \cdot d$; mit d als Bolzendurchmesser

als Durchmesser zu begrenzen.

Bei seitlichen dicken Stahlblechen, welche eine feste Einspannung des Stiftes im Stahlblech hervorrufen, ist die Blechdicke gleich dem Durchmesser des Stiftes. Für die Unterlegescheibe gilt somit $4 \cdot d$ als Kriterium für die Fläche.

Da der Auszieh Widerstand durch den kleineren der Wert aus der Tragfähigkeit der Unterlegescheibe und der Zugfestigkeit des Bolzens begrenzt wird, werden diese beiden Werte gegenübergestellt. Weiters soll der folgende Vergleich zeigen in welcher Größenordnung sich die Auszieh Widerstände bewegen.

Für die Berechnung wurden folgende Annahmen getroffen:

Der Durchmesser der Unterlegescheibe entspricht dem vierfachen Durchmesser des Bolzens.

Das Loch für den Bolzen wird mit einem Spiel von 1 mm angesetzt.

Für die Berechnung der Zugfestigkeit des Bolzens wird der Nenndurchmesser verwendet.

Holzgüte C24 / S10 $f_{c,90,k} = 2,5 \text{ N/mm}^2$

Stahlgüte 4.6 $f_{uk} = 400 \text{ N/mm}^2$

Tab. 5: Auszieh Widerstand $F_{ax,Rk}$

Verbindungsmittel	Unterlegescheibe	Auszieh Widerstand $F_{ax,Rk}$	
		Unterlegescheibe	Zugfestigkeit des Bolzens
\emptyset [mm]	\emptyset [mm]	[kN]	[kN]
6	24	3,10	11,31
8	32	5,55	20,11
10	40	8,71	31,42
12	48	12,58	45,24
16	64	22,43	80,42
20	80	35,10	125,66
24	96	50,61	180,96
30	120	79,16	282,74

Der Auszieh Widerstand infolge der Zugfestigkeit des Bolzens beträgt selbst bei der relativ geringen Stahlgüte von 4.6 ein Vielfaches des Auszieh Widerstandes infolge der Tragfähigkeit der Unterlegescheibe. Zieht man zur Berechnung der Zugfestigkeit des Bolzens den Gewindequerschnitt heran, fällt diese zwar geringer aus, liegt aber immer noch deutlich über der Tragfähigkeit der Unterlegescheibe. Man kann also davon ausgehen, dass der Auszieh Widerstand von der Tragfähigkeit der Unterlegescheibe abhängt.

4. Einflussgrößen

Da Holz ein natürlich gewachsener Baustoff ist, beeinflussen die unterschiedlichsten Faktoren die Tragfähigkeit einer Verbindung.

4.1. Modifikationsbeiwert k_{mod}

Dem Langzeitverhalten von Holz wird durch den sogenannten Modifikationsbeiwert k_{mod} Rechnung getragen. Er ist abhängig von der Holzfeuchtigkeit und von der Lasteinwirkungsdauer.

Die Werte von k_{mod} sind im EC 5 für Vollholz, Brett-schichtholz Furnierschichtholz, Sperrholz, OSB, Spanplatten und Holz-faserplatten (verschiedener Härten) angegeben.

Tab. 6: Werte für k_{mod} [1]

Baustoff	Norm	Nutzungs-klasse	Klasse der Lasteinwirkungsdauer				
			ständige Einwirkung	lange Einwirkung	mittlere Einwirkung	kurze Einwirkung	sehr kurze Einwirkung
Vollholz	EN 14081-1	1	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
		2	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
		3	0,5	0,55	0,65	0,7	0,9
Brett-schicht-holz	EN 14080	1	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
		2	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
		3	0,5	0,55	0,65	0,7	0,9

Da sich Lastkombinationen in der Regel aus verschiedenen Einwirkungen (Eigengewicht, Nutzlasten, Schnee, etc.) zusammensetzen, ist lt. EC 5 in der Regel jener Wert von k_{mod} zu verwenden, welcher der kürzesten Einwirkung entspricht.

4.1.1. Holzfeuchtigkeit

Der Feuchtigkeit des Holzes ist in mehrfacher Hinsicht von Bedeutung:

- Zunahme der Holzfeuchte bewirkt Abnahme der Festigkeit und Steifigkeit
- Hohe Holzfeuchte begünstigt Pilz- und Insektenbefall (Frischholzinsekten)
- Hohe Holzfeuchte beeinträchtigt die Güte der Leimverbindungen
- Wechsel der Holzfeuchte bewirkt Quellen und Schwinden des Holzes.

Die Holzfeuchte wird im Eurocode als die Masse des im Holz enthaltenen Wassers, ausgedrückt als Anteil der Trockenmasse des Holzes definiert.

Im EC 5 werden drei Nutzungsklassen (NKL), welche die Beanspruchung des Holzes durch Feuchtigkeit ausdrücken definiert.

In [8] werden die NKL folgendermaßen beschrieben:

NKL 1

Die Nutzungsklasse 1 ist gekennzeichnet durch einen Feuchtegehalt in den Baustoffen, der einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchte der umgebenden Luft entspricht, die nur für einige Wochen pro Jahr einen Wert von 65 % übersteigt.

Der Nutzungsklasse 1 sind demnach Bauwerke zuzuordnen, welche durch eine geschlossene Hülle vor dem Außenklima geschützt sind. In den meisten Fällen beträgt die Holzfeuchte von Nadelhölzern in geschlossenen beheizbaren Räumen max. 12 %. Auch wenn die Luftfeuchtigkeit in solchen Räumen einige Wochen im Jahr über 65 % liegt, steigt die Holzfeuchte wegen des langsamen Feuchtetransportes im Holz nur langsam an.

NKL 2

Die Nutzungsklasse 2 ist gekennzeichnet durch einen Feuchtegehalt in den Baustoffen, der einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchte der umgebenden Luft, die nur für einige Wochen pro Jahr einen Wert von 85 % übersteigt.

Der Nutzungsklasse 2 sind Bauteile zuzuordnen, welche zwar im Freien stehen, aber einer direkten Bewitterung nicht ausgesetzt sind. In diese Nutzungsklasse können auch geschlossene Bauten fallen, wie z.B.: Gewächshäuser, Wintergärten oder Tierhäuser. Die mittlere Holzfeuchte von Nadelhölzern beträgt dann nicht mehr als 20 %. Selbst wenn über mehrere Wochen im Jahr Klimabedingungen herrschen die zu einer höheren Holzfeuchte führen würden, entsteht wegen des langsamen Feuchtetransportes im Holz nur ein unbedeutender Feuchteanstieg.

NKL 3

Die Nutzungsklasse 3 erfasst Klimabedingungen, die zu höheren Feuchtegehalten als in Nutzungsklasse 2 führen.

Dies trifft eben auf alle Bauteile zu, die der Witterung ungeschützt ausgesetzt sind. Nicht überdachte Balkone und hölzerne Aussichtstürme sind gute Beispiele. Aber auch

Dachkonstruktionen bei offenen Eissporthallen fallen Aufgrund der Kondenswasserbildung an kalten Bauteilen in diese Nutzungsklasse.

In der Önorm B 4100-2 gibt es zwar keine Einteilung in Nutzungsklassen aber es werden maximale Holzfeuchtigkeiten über die Gleichgewichtsfeuchte definiert.

Als Gleichgewichtsfeuchte im Gebrauchszustand gilt die nach einer gewissen Zeitspanne im Mittel sich einstellende Feuchte der Holzes und der Holzwerkstoffe im fertigen Bauwerk. Als Gleichgewichtsfeuchte gelten folgende Werte der Holzfeuchte:

- | | |
|------------------------------------------------------------------------|----------|
| (a) bei allseitig umschlossenen Bauwerken | |
| • mit Heizung | 9 ± 3 % |
| • ohne Heizung | 12 ± 3 % |
| (b) bei überdeckten, offenen Bauwerken | 15 ± 3 % |
| (c) bei Konstruktionen, die der Witterung
allseitig ausgesetzt sind | 18 ± 3 % |

Ist die Holzfeuchte beim Einbau höher als die genannten Werte, so darf dieses Holz nur für Bauwerke verwendet werden, bei denen es nachtrocknen kann und wenn die Schwindverformungen keinen negativen Einfluss auf die Bauteile haben.

Des Weiteren berücksichtigt die Önorm B4100-2 die Feuchtigkeit über die zulässigen Spannungen. Es sind hier die Werte für Spannungen und Moduln abzumindern

- um 15% für Bauteile, die der Witterung allseitig ausgesetzt sind
- um 30% für Bauteile unter andauernder Durchfeuchtung, z.B.: bei im Wasser befindlichen Jochen.

4.1.2. Lasteinwirkungsdauer

Die wichtigsten Faktoren, die einen großen Einfluss auf die Tragfähigkeit von Holzverbindungen mit ständig oder lang einwirkenden Lasten haben sind:

- Der Belastungsgrad
- Die Holzfeuchteänderungen
- Die Art der Verbindungsmittel

Langzeitfestigkeit

Die Dauer der Belastung hat einen Einfluss auf die Festigkeit des Holzes. Gegenüber der Kurzzeitfestigkeit beträgt die Festigkeit von Holz unter Dauerlast nur ca. 60 %. Dies erfordert eine Erfassung der zeitlichen Veränderung der Einwirkungen bei der Bemessung von Bauteilen.

Die ÖNORM berücksichtigt die Abnahme der Festigkeit des Holzes über die Kriechverformungen im Durchbiegungsnachweis bzw. im Verdrehungsnachweis.

Die Kriechverformung darf bei auf Biegung beanspruchten Bauteilen proportional zur elastischen Verformung angenommen werden. Sie ist nachzuweisen, wenn die ständige Last mehr als 50 % der Gesamtlast ausmacht.

Im EC 5 werden zur Berücksichtigung der Lasteinwirkungsdauer fünf Klassen der Lasteinwirkungsdauer (KLED) festgelegt.

Diese Klassen der Lasteinwirkungsdauer berücksichtigen die Zeitperiode in der eine bestimmte Last auf das Tragwerk einwirkt. Sie fließen in die Ermittlung des Modifikationsbeiwertes ein und haben somit Auswirkungen auf die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften der Bauteile.

Tab. 7: Klassen der Lasteinwirkungsdauer [1]

Klasse der Lasteinwirkungsdauer	Größenordnung der akkumulierten Dauer der charakteristischen Lasteinwirkung
ständig	länger als 10 Jahre
lang	6 Monate - 10 Jahre
mittel	1 Woche - 6 Monate
kurz	kürzer als eine Woche
sehr kurz	

Im EC 5 werden weiters Beispiele für die Zuordnung von Einwirkungen zu den Klassen der Lasteinwirkungsdauer angeführt. Ebenfalls wird angemerkt, dass klimabedingte Lasteinwirkungen wie Schnee und Wind in aufgrund der unterschiedlichen Größe ihres Auftretens jeweils im Nationalen Anhang festgelegt werden können.

Tab. 8: Beispiele für die Zuordnung zu Klassen der Lasteinwirkungsdauer [1]

Klasse der Lasteinwirkungsdauer	Größenordnung der akkumulierten Dauer der charakteristischen Lasteinwirkung
ständig	Eigengewicht
lang	Lagerstoffe
mittel	Verkehrslasten, Schnee
kurz	Schnee, Wind
sehr kurz	Wind und außergewöhnliche Einwirkungen

4.2. Die Holzqualität

Im Eurocode 5 werden folgende Anforderungen an die Konstruktionsteile gestellt:

- Baustoffe und Holzwerkstoffe sowie tragende Bauteile sollten nicht unnötigerweise ungünstigeren klimatischen Bedingungen ausgesetzt werden als denjenigen im späteren Gebrauch.
- Bauholz sollte vor dem Einbau möglichst auf die Holzfeuchte getrocknet werden, die der Gleichgewichtsfeuchte im fertigen Bauwerk entspricht. Wenn infolge Schwindens nur geringfügige Auswirkungen zu erwarten sind, oder wenn unvertretbar geschädigte Teile ausgewechselt werden, können höhere Feuchten bei der Errichtung der Konstruktion zugelassen werden, jedoch nur, wenn sichergestellt ist, dass das Bauholz auf die gewünschte Feuchte nachtrocknen kann.

4.2.1. Duktilität

Das Grundmaterial Holz weist für die meisten Beanspruchungsarten (Zug, Biegezug, Schub, Querkzug) ein weitgehend sprödartiges Bruchverhalten auf, d.h. es treten Brüche auf ohne vorher erkennbare größere Verformungen hervorzurufen. Tragwerke mit duktilen Verbindungen sind in der Lage Schnittkräfte umzulagern und dadurch die Reserven von Tragsystemen besser auszunutzen. Die duktile Ausbildung der Verbindungen und hier im speziellen der Stahlteile (Bleche, Stifte usw.) ist praktisch die einzige Möglichkeit des konstruktiven Holzbaues, um duktile Tragkonstruktionen zu erreichen.

4.2.2. Festigkeitssortierung

Die Festigkeits- und Steifigkeitskennwert des Holzes werden nicht mehr wie bisher üblich in der Bemessungsnorm angegeben. Die EN 388 – Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen [5] beschreibt den Übergang folgendermaßen:

In einem System von Festigkeitsklassen werden Sortierklassen und Holzarten mit ähnlichen Festigkeitseigenschaften in Klassen zusammengefasst, innerhalb derer die Austauschbarkeit sichergestellt ist. Dies erlaubt dem Ingenieur, eine bestimmte Festigkeitsklasse festzulegen und die charakteristischen Festigkeitswerte dieser Klasse seiner statischen Berechnung zugrunde zu legen.

Die Vorteile dieses Systems von Festigkeitsklassen sind:

- zusätzliche Holzarten/Sortierklassen können jederzeit in das System aufgenommen werden, ohne bestehende Regelungen für Bauholz zu beeinflussen.
- zum Zeitpunkt der Erstellung der Entwurfsberechnungen braucht der Ingenieur die Kosten und Verfügbarkeit von alternativen Holzarten und Sortierklassen nicht zu beachten. Er braucht nur die Festigkeitswerte einer bestimmten Klasse zu verwenden und danach diese Klasse festzulegen. Anschließend kann er aus vorliegenden Angeboten die geeignetste und wirtschaftlichste Holzart/Sortierklasse auswählen. Wenn eine bestimmte Holzart für ein Projekt nicht geeignet ist (z.B. aus Gründen der Dauerhaftigkeit) muss dies aus der Festlegung klar hervorgehen.
- Durch die Festigkeitsklassen können die Lieferanten eine größere Auswahl an Bauholz anbieten, als wenn die Holzart und Sortierklasse festgelegt wären.

Durch den Sortierprozess sollen folgende Eigenschaften erreicht werden:

- Bildung von Klassen mit abgestuften und zuverlässig erreichbaren Kennwerten (“Trennschärfe“)
- Geringere Streuung der Kennwerte innerhalb dieser Klassen gegenüber dem unsortierten Ausgangsmaterial (“Homogenisierung“)

BAUHOLZ

Die Festigkeitsklassen für Bauholz sind in der ÖNORM EN 338 – Bauholz für tragende Zwecke geregelt [5].

In dieser Norm erfolgt eine grundsätzliche Unterscheidung in Laubholz auf der einen Seite sowie Nadel und Pappelholz auf der anderen Seite. Laubholz wird in sechs Festigkeitsklassen unterteilt und bei Nadel bzw. Pappelholz erfolgt eine Einteilung in 12 Festigkeitsklassen.

Tab. 9: Festigkeitsklassen für Bauholz - charakteristische Werte [5]

	Pappel und Nadelholz														Laubholz					
	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50	D30	D35	D40	D50	D60	D70		
Festigkeitseigenschaften (in N/mm ²)																				
Biegung	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50	30	35	40	50	60	70		
Zug Parallel	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30	18	21	24	30	36	42		
Zug rechtwinkelig	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,9		
Druck parallel	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29	23	25	26	29	32	34		
Druck rechtwinkelig	2	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2	8	8,4	8,8	9,7	10,5	13,5		
Schub	1,7	1,8	2	2,2	2,4	2,5	2,8	3	3,4	3,8	3,8	3,8	3	3,4	3,8	4,6	5,3	6		
StEIFIGKEITSEIGENSCHAFTEN (in kN/m ²)																				
Mittelwert des Elastizitätsmoduls parallel	7	8	9	9,5	10	11	11	12	13	14	15	16	10	10	11	14	17	20		
5-%-Quantile des Elastizitätsmoduls parallel	4,7	5,4	6	6,4	6,7	7,4	8	8	8,7	9,4	10	10,7	8	8,7	9,4	11,8	14,3	16,8		
Mittelwert des Elastizitätsmoduls rechtwinkelig	0,23	0,27	0,3	0,32	0,33	0,37	0,38	0,4	0,43	0,47	0,5	0,53	0,64	0,69	0,75	0,93	1,13	1,33		
Mittelwert des Schubmoduls	0,44	0,5	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1	0,6	0,65	0,7	0,88	1,06	1,25		
Rohdichte (in kg/m ³)																				
Rohdichte	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460	530	560	590	650	700	900		
Mittelwert der Rohdichte	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550	640	670	700	780	840	1080		

Im Allgemeinen können zwischen den bisherigen Sortierklassen und den neuen Festigkeitsklassen folgende Zuordnungen getroffen werden.

Tab. 10: Bauholz - Zuordnung der Sortierklassen zu den Festigkeitsklassen [15]

Festigkeitsklasse nach ÖNORM EN 338	Sortierklasse nach ÖNORM DIN 4074-1
C 16	S 7 / MS 7
C 24	S 10 / MS 10
C 30	S13
C 35	MS 13
C 40	MS 17

BRETTSCHICHTHOLZ

Die Festigkeitsklassen für Brettschichtholz sind in der ÖNORM EN 1194 – Holzbauwerke – Brettschichtholz – Festigkeitsklassen und Bestimmung charakteristischer Werte [4] angegeben. Hier wird zwischen homogenem und kombiniertem Brettschichtholz unterschieden, wobei jeweils eine Unterteilung in vier Festigkeitsklassen erfolgt.

Homogenes Brettschichtholz weist einen Querschnitt auf, der aus Lamellen der gleichen Sortierklasse (Festigkeitsklasse) und Holzart (oder Holzartkombinationen) besteht.

Kombiniertes Brettschichtholz hat einen Querschnitt, dessen innere und äußere Lamellen unterschiedlichen Sortierklassen (Festigkeitsklassen und Holzarten oder Holzartenkombinationen) angehören.

Tab. 11: Festigkeitsklassen für homogenes und kombiniertes Brett-schichtholz – charakteristische Werte [4]

	homogenes Brett-schichtholz				kombiniertes Brett-schichtholz				
	GL 24h	GL 28h	GL 32h	GL 36h	GL 24c	GL 28c	GL 32c	GL 36c	
	Festigkeitseigenschaften (in N/mm²)								
Biegung	$f_{m,g,k}$	24	28	32	36	24	28	32	36
Zug Parallel	$f_{t,0,g,k}$	16,5	19,5	22,5	26	14	16,5	19,5	22,5
Zug rechtwinkelig	$f_{t,90,g,k}$	0,4	0,45	0,5	0,6	0,35	0,4	0,45	0,5
Druck parallel	$f_{c,0,g,k}$	24	26,5	29	31	21	24	26,5	29
Druck rechtwinkelig	$f_{c,90,g,k}$	2,7	3	3,3	3,6	2,4	2,7	3	3,3
Schub	$f_{v,g,k}$	2,7	3,2	3,8	4,3	2,2	2,7	3,2	3,8
Steifigkeitseigenschaften (in kN/m²)									
Mittelwert des Elastizitätsmoduls parallel	$E_{0,g,mean}$	11,6	12,6	13,7	14,7	11,6	12,6	13,7	14,7
5-%-Quantile des Elastizitätsmoduls parallel	$E_{0,g,05}$	9,4	10,2	11,1	11,9	9,4	10,2	11,1	11,9
Mittelwert des Elastizitätsmoduls rechtwinkelig	$E_{90,g,mean}$	0,39	0,42	0,46	0,49	0,32	0,39	0,42	0,46
Mittelwert des Schubmoduls	$G_{g,mean}$	0,72	0,78	0,85	0,91	0,59	0,72	0,78	0,85
Rohdichte (in kg/m³)									
Rohdichte	$\rho_{g,k}$	380	410	430	450	350	380	410	430

Auch hier kann eine Zuordnung von Sortierklasse und Festigkeitsklasse vorgenommen werden [15].

Tab. 12: Brettschichtholz - Zuordnung der Sortierklassen zu den Festigkeitsklassen [15]

Festigkeitsklasse nach ÖNORM EN 1194	Brettschichtholzklasse nach ÖNORM B 4100-2
GL 24h	BS 11 Typ 1
GL 28h	BS 14 Typ 1
GL 32h	BS 16 Typ 1
GL 36h	BS 18 Typ 1

4.2.3. Einfluss der Rohdichte

Ein steigender Wert der Rohdichte hat positive Auswirkungen auf die Festigkeitseigenschaften des Holzes und damit auch auf die Lochleibungsfestigkeit. Wie in Abschnitt 4.3 gezeigt wird, geht die Rohdichte bei Holz und Holzwerkstoffen direkt proportional in die Formel für die Lochleibungsfestigkeit ein.

Damit kann bei der Berechnung der Tragfähigkeit von Stabdübelverbindungen nach EC 5 die Lochleibungsfestigkeit über die verwendete Holzart bzw. den verwendeten Holzwerkstoff gesteuert werden.

Die ÖNORM B 4100-2 kennt eine solche Möglichkeit der Steigerung der Lochleibungsfestigkeit nicht.

4.2.4. Zulässige Spannungen

Die Werte der zulässigen Spannungen nach ÖNORM B 4100-2 gelten nur bei Erfüllung folgender Voraussetzungen:

- a) Die statische Berechnung, die konstruktive Planung und die Ausführung müssen nach den anerkannten Regeln der Technik durchgeführt werden.
- b) Die Überwachung der Ausführung und die Abnahme müssen durch eine anerkannte Fachkraft erfolgen (Planvermerk).
- c) Gebrauchtes Bauholz ist der tatsächlichen Güte entsprechend zu bewerten.

Weiters sind unter bestimmten Situationen verschiedene Erhöhungen bzw. Abminderungen von zulässigen Spannungen vorgesehen.

Herabsetzung der zul. Spannungen

Die Werte für Spannungen und Moduln sind wie folgt abzumindern [2]:

- um 15 % (siehe 3.3.2.4.(1)(c)): Für Bauteile, die der Witterung allseitig ausgesetzt sind;
- um 30 %: Für Bauteile unter andauernder Durchfeuchtung, z.B.: bei im Wasser befindlichen Jochen.

Erhöhung der zul. Spannungen [2]

- Bei Überlagerung mit Kurzzeiteinwirkungen wie Windlasten gemäß ÖNORM B 4014-1, Turngeräteleisten und Instandsetzungslasten dürfen die Spannungen um 25 % erhöht werden. Ungeachtet dessen ist ein zusätzlicher Nachweis ohne Kurzzeitlasten ohne heranziehen erhöhter Spannungen zu führen.
- Wenn ein zusätzlicher Nachweis zufolge der Einwirkungen von Erdbebenkräften gemäß ÖNORM B 4015 und außergewöhnlicher Einwirkungen gemäß ÖNORM B 4016 zu führen ist, dürfen die zulässigen Spannungen um 100 % erhöht werden.
- Falls im Sinne der ÖNORM B 3800-4 der Nachweis der Tragfähigkeit nach Ablauf der geforderten Brandwiderstandsdauer zu führen ist, dürfen die zulässigen Spannungen für den verbleibenden Restquerschnitt um 125 % erhöht werden. Dabei darf die Abbrandgeschwindigkeit nach ÖNORM B 3800-4 angenommen werden.

4.3. Lochleibungsfestigkeit

Unter Lochleibungsfestigkeit versteht man die mittlere Spannung bei Höchstlast unter einem steifen, geraden Verbindungsmittel, welches in einem Rechteckprobekörper aus Holz eingebaut ist. Die Verbindungsmittelachse hat rechtwinkelig zur Probekörperoberfläche zu verlaufen. Für das Verbindungsmittel selbst gilt, dass es rechtwinkelig zu seiner Achse beansprucht wird. Wenn der Probekörper bricht oder die Eindrückung des Verbindungsmittels größer als 5 mm ist, ist die Höchstlast erreicht.

Die Lochleibungsfestigkeit ist abhängig von:

- Der Rohdichte der Hölzer
- Dem Verbindungsmitteldurchmesser
- Dem Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung
- Der Reibung zwischen Verbindungsmittel und Holz

- Der Schlankheit der Verbindungsmittel

Weiters hängt die Lochleibungsfestigkeit von

- Dem Verbindungsmitteltyp
- Von der Herstellung der Verbindung
- Von der Oberflächenbeschaffenheit des Verbindungsmittels ab.

Aufgrund all dieser unterschiedlichen Einflüsse macht es Sinn die Lochleibungsfestigkeit nicht als reine Materialeigenschaft zu betrachten sondern auch als eine Systemeigenschaft.

Um trotz dieser vielen Einflussgrößen vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, wurde im Eurocode 5 die Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit nach dem EN 383 und EN 14358 festgelegt. In diesen Normen sind alle Einzelheiten des Prüfverfahrens geregelt.

Stabdübel und Bolzenverbindungen

Mit zunehmender Stabdübelschlankheit nimmt die mittlere Lochleibungsfestigkeit des Holzes ab. Verursacht wird dieser Abfall durch die stärkere Verformung des Stabdübels und der daraus resultierenden ungleichmäßigeren Verteilung des Lochleibungsdruckes.

Für Stabdübel, Passbolzen und Bolzen mit Durchmessern bis zu 30 mm kann die charakteristische Lochleibungsfestigkeit des Holzes wie folgt berechnet werden:

Tab. 13: charakteristische Werte der Lochleibungsfestigkeiten [1]

Holzprodukt	Lochleibungsfestigkeit $f_{h,0,k}$
Holz und Furnierschnittholz (LVL)	$f_{h,0,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k$
Sperrholz	$f_{h,k} = 0,11 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k$
Spanplatten	$f_{h,k} = 50 \cdot d^{-0,6} \cdot t^{0,2}$

d.....Durchmesser des Stiftes im [mm]

ρ_k Rohdichte des Holzes bzw. Holzwerkstoffes in [kg/m³]

t..... Dicke des Holzwerkstoffes

$f_{h,0,k}$Lochleibungsfestigkeit in [N/mm²]

Der Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung hat bei Deckfurnieren und Decklagen von Sperrholz und Span- bzw. OSB-Platten keinen Einfluss auf die Lochleibungsfestigkeit.

Bei Holz und Furnierschnittholz hingegen muss die Abweichung der Kraft von der Faserrichtung berücksichtigt werden.

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (52)$$

Der Faktor k_{90} stellt das Verhältnis der Festigkeit in Faserrichtung ($f_{h,0}$) zur Festigkeit rechtwinkelig zur Faserrichtung ($f_{h,90}$) dar:

$$k_{90} = \frac{f_{h,0}}{f_{h,90}} \quad (53)$$

Aufgrund von Untersuchungen an der Universität Karlsruhe wurden vereinfachte Beziehungen für k_{90} entwickelt. Sie berücksichtigen, dass dieser Verhältniswert mit steigendem Stiftdurchmesser zunimmt:

$$k_{90} = \begin{cases} 1,35 + 0,015 \cdot d & \text{für Nadelhölzer} \\ 1,30 + 0,015 \cdot d & \text{für Furnierschnitthölzer} \\ 0,90 + 0,015 \cdot d & \text{für Laubhölzer} \end{cases}$$

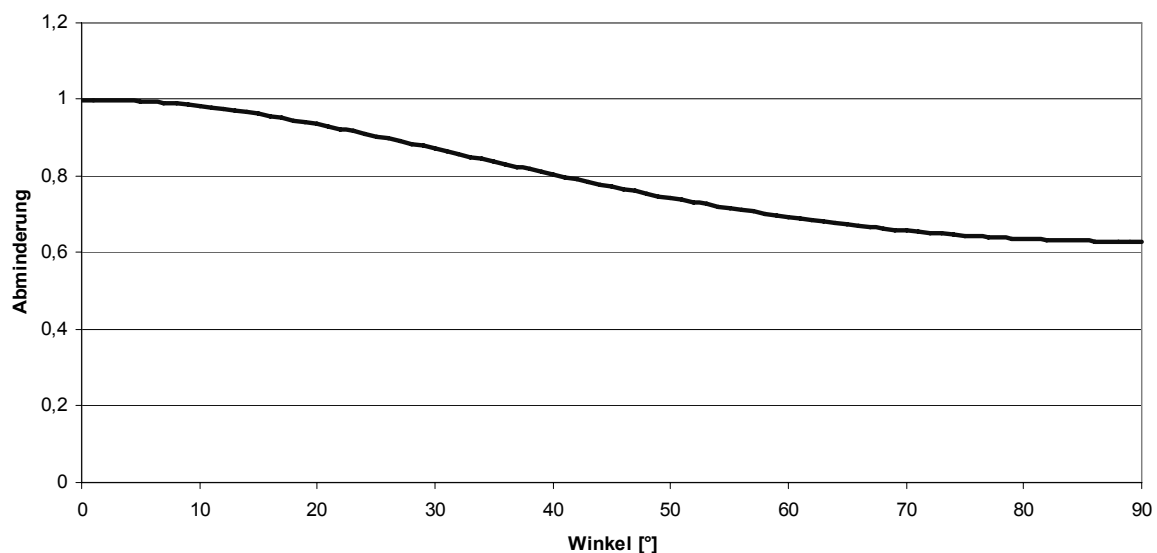


Abb. 18: Abminderung der Lochleibungsfestigkeit infolge des Winkels

Bei einem rechtwinkligen Anschluss der Hölzer beträgt die Lochleibungsfestigkeit nur noch ca. 63 % des Wertes bei gleichgerichteter Kraft- und Faserrichtung.

4.4. Stabdübel und Passbolzen

Die Vergleichsrechnungen dieser Arbeit konzentrieren sich auf Stabdübel- und Passbolzenverbindungen.

Stabdübel sind kreisrunde zylindrische Stäbe ohne Kopf aus Stahl, mit glatter und fallweise auch gerillter Oberfläche. Stabdübel werden passgenau in vorgebohrte Löcher eingebaut und für die Übertragung von Kräften rechtwinkelig zur Stabdübelachse verwendet.

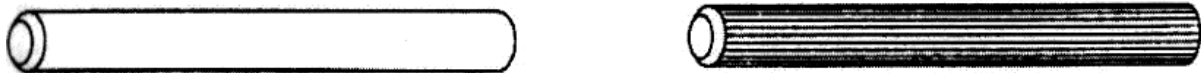


Abb. 19: Stabdübel aus Stahl (verzinkt, verchromt) oder Edelstahl [20]

Passbolzen sind Stabdübel mit Kopf und Mutter bzw. beidseitiger Mutter und Unterlegescheibe.



Abb. 20: Passbolzen mit beidseitiger Mutter [20]

bzw. mit Kopf und Mutter [20]

Stabdübel haben sich zur Übertragung von großen Kräften als sehr geeignet erwiesen. Weiters ist diese Art der Verbindung wirtschaftlich und leicht herstellbar. In großen Stabdübelanschlüssen kann es notwendig sein, einige Stabdübel durch Passbolzen zu ersetzen, um eine bessere Formstabilität zu gewährleisten. Stabdübelverbindungen sind im Vergleich zu Bolzenverbindungen steif. Daher sollten Bolzenverbindungen überall dort vermieden werden, wo es auf gute Formbeständigkeit der Konstruktion ankommt.

4.4.1. Vorschriften des EC 5

Der kleinste Durchmesser der Stabdübel beträgt 6 mm. Die Toleranz für den Durchmesser von Stabdübeln betragen $-0/+0,1$ mm. Vorgebohrte Löcher in den Holzbauteilen sollten keinen größeren Durchmesser haben als den des Stabdübels.

Baumkanten, Risse, Äste oder andere Wuchsunregelmäßigkeiten sind im Bereich einer Verbindung derart zu begrenzen, dass die Tragfähigkeit der Verbindung nicht verringert wird.

4.4.2. Vorschriften der ÖNORM

Stabdübel sind müssen eine Mindestgüte von S 235 gem. ÖNORM EN 10025 aufweisen.

Der Durchmesser der Verbindungsmittel hat zwischen 8 mm und 30 mm zu liegen.

- (1) Die zulässigen Übertragungskräfte für mechanische Verbindungsmittel sind für Nadelholz der Sortierklasse S7 und MS 7 um 30 % herabzusetzen.
- (2) Die zulässigen Übertragungskräfte müssen erforderlichenfalls zufolge Feuchtigkeit herabgesetzt werden.
- (3) Bei Verwendung von Stahllaschen zur Verbindung von Holzbauteilen dürfen die zulässigen Übertragungskräfte von Schraubenbolzen, Stabdübeln und Passbolzen, Holzschrauben und Nägeln um 25 % erhöht werden.
- (4) Bei Schraubenbolzen, Stabdübeln und Passbolzen sowie Holzschrauben mit $d_s > 10$ mm sind für Kraftangriff rechtwinkelig zur Faserrichtung die zulässigen Übertragungskräfte um 25 % herabzusetzen. Bei schrägem Kraftangriff gilt:

$$F_{zul} = F_{//,zul} \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{360}\right) \quad (54)$$

wobei α den Winkel zwischen Kraft und Faserrichtung darstellt.

- (5) Wegen der Spaltzuggefahr des Holzes ist für mehrere in Krafrichtung angeordnete Verbindungsmittel die wirksame Anzahl n_{eff} zu bestimmen
- (6) Bei auf Zug parallel zur Faser beanspruchten Querschnitten mit auf Abscheren stiftförmigen Verbindungsmitteln darf die Bestimmung des Holz-Nettoquerschnittes im Bereich der Verbindung nur die durch die äußersten Verbindungsmitteln begrenzte Nettoquerschnittsfläche in Rechnung gestellt werden. Einreihige Anordnungen sind zu vermeiden.
- (7) Für Schraubenbolzen und Stabdübel bzw. Passbolzen mit einem Durchmesser ≥ 24 mm müssen die Werte für $\sigma_{1,zul}$ um 10 % abgemindert werden.

4.4.3. Tragfähigkeit nach Önorm B4100-2

Die Berechnung der Tragfähigkeit erfolgt hier mit der folgenden Tabelle.

Tab. 14: Werte zur Berechnung der zulässigen Übertragungskräfte von Schraubenbolzen-, Stabdübel- bzw. Passbolzen- und Holzschraubenverbindungen [2]

	Holzart	Stabdübel und Passbolzen		Schraubenbolzen	
		$\sigma_{1,zul}$	Festwert B	$\sigma_{1,zul}$	Festwert B
		N/mm ²			
einschnittig	Vollholz und BSH aus Nadelholz	4,0	23,0	4,0	17,0
	Eiche, Buche	5,0	27,0	5,0	20,0
zweischnittig	Vollholz und BSH aus	Mittelholz			
	Eiche, Buche	8,5	51,0	8,5	38,0
	Vollholz und BSH aus	Seitenholz			
	Eiche, Buche	10,0	60,0	10,0	45,0
	Vollholz und BSH aus	5,5	33,0	5,5	26,0
	Eiche, Buche	6,5	39,0	6,5	30,0

Die zulässige Übertragungskraft $N_{b,zul}$ in N beträgt für den Kraftangriff in Faserrichtung, unabhängig von der Sortierklasse des Holzes [2]:

$$N_{b,zul} = \sigma_{1,zul} \cdot a \cdot d_b \quad (55)$$

Aber höchstens

$$N_{b,zul} = B \cdot d_b^2 \quad (56)$$

Hierin bedeuten:

- $\sigma_{1,zul}$... zulässige mittlere Lochleibungsspannung des Holzes bzw. des Holzwerkstoffes gemäß der Tabelle in [N/mm²]
 a.....Holzdicke bzw. Bettungslänge in [mm]
 d_bDurchmesser des Verbindungsmittels in [mm]
 B.....Festwert in [N/mm²] nach Tabelle

Des Weiteren sind in [2] folgende Angaben gemacht:

- Bei der Berechnung der Verbindung mit Hilfe der Tabelle und den angegebenen Formeln, kann der Nachweis der Biegespannungen in den Verbindungsmitteln entfallen.
- Die Tabelle ist für mehrschnittige Verbindungen sinngemäß anzuwenden.
- Entspricht die Länge der Stabdübel nicht mindestens der Gesamtdicke der zu verbindenden Hölzer, so ist die effektive Bettungslänge zu verwenden.

- Eine Verbindung muss zur Erzielung ausreichender Klemmwirkung aus mindestens vier Scherflächen bestehen. Dabei müssen mindestens zwei Stabdübel oder Passbolzen vorhanden sein.

Für die Ausführung der Verbindung insbesondere für die Herstellung der Löcher gilt:

- Bohrdurchmesser für Schraubenbolzen
 Nenndurchmesser der Schrauben + 1mm
- Bohrdurchmesser für Stabdübel und Passbolzen
 Nenndurchmesser in Holz und
 Nenndurchmesser + 1 mm in Stahlblech

Für händisch hergestellte Stabdübel- und Passbolzenverbindungen dürfen die Bohrungen erst nach dem Zusammenfügen der Bauteile hergestellt werden.

4.5. Mechanische Eigenschaften der Verbindungsmittel

4.5.1. Bestimmung des Fließmomentes M_y

Der Biege­widerstand des Verbindungsmittels aus Stahl wird durch das Fließmoment dargestellt.

Das Fließmoment ist definiert als das Biegemoment bei der tatsächlichen Versagenslast, z.B. infolge spröden Bruchs, die das Verbindungsmittel bei der Prüfung aufnehmen kann oder das Biegemoment bei einer Verformung des Verbindungsmittels von 45°. Bei einer Verformung von 45° wird eine vollständige Plastifizierung des Stiftes angenommen. Der kleinere Wert ist maßgebend [17].

Die charakteristischen Werte des Fließmomentes sind lt. EC 5 in Übereinstimmung mit EN 409 und EN 14358 zu bestimmen.

Für Bolzen, Passbolzen und Stabdübel ist der charakteristische Wert des für das Fließmoment im EC 5 wie folgt angegeben:

$$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6} \quad (57)$$

Dabei ist

$M_{y,Rk}$ charakteristischer Wert des Fließmomentes in N/mm

$f_{u,k}$ charakteristischer Wert der Zugfestigkeit in N/mm²

d Durchmesser des Klammerschaftes in mm

Die üblicherweise verwendeten Festigkeitsklassen von Passbolzen sind in [14] folgendermaßen angegeben:

Tab. 15: charakteristische Werte für Fließspannung $f_{y,k}$ und Zugfestigkeit $f_{u,k}$ für Schraubenbolzen und Passbolzen [14]

Festigkeitsklasse		4.6	4.8	5.6	5.8	8.8
$f_{y,k}$	N/mm ²	240	320	300	400	640
$f_{u,k}$	N/mm ²	400	400	500	500	800

Die Bezeichnung x.y kennzeichnet mit x die charakteristische Zugfestigkeit $f_{u,k}$ in N/mm² und mit y/10 das Verhältnis der charakteristischen Fließgrenze $f_{y,k}$ zur charakteristischen Zugfestigkeit.

So weist zum Beispiel ein Passbolzen mit der Bezeichnung 4.8 eine charakteristische Zugfestigkeit von $f_{u,k} = 400$ N/mm² und eine charakteristische Fließgrenze von $f_{y,k} = 400 \cdot 8/10 = 320$ N/mm² auf.

Bolzen und Passbolzen sind mit Unterlegescheiben zwischen Holz und Kopf bzw. Mutter einzubauen.

In der nächsten Tabelle sind die Eigenschaften des Stahles, der die für die Bemessung von Stabdübeln verwendet wird, zusammengestellt. Abhängig von den Abmessungen der Verbindung oder der Art der Montage können Stabdübel durch Passbolzen oder Stäbe mit Endgewinde ersetzt werden, um die Bauteile zusammenzuhalten.

Im Allgemeinen werden Bolzen und Stabdübel in zwei- oder mehrschnittigen Verbindungen eingesetzt.

Tab. 16: charakteristische Werte für Fließspannung $f_{y,k}$ und Zugfestigkeit $f_{u,k}$ für Stabdübel [15]

Festigkeitsklasse		S 235	S 275	S 355
f_y	N/mm ²	235	275	355
$f_{u,k}$	N/mm ²	360	430	510

Unter Verwendung der Festigkeitswerte für Stabdübel soll gezeigt werden, dass die Wahl eines größeren Stabdübeldurchmessers das Fließmoment entscheidend erhöht, da der Durchmesser mit der 2,6ten Potenz in die Berechnung des charakteristischen Fließmomentes eingeht.

Tab. 17: $M_{y,Rk}$ in Nmm

d [mm]	Stahlgüte		
	S 235	S 275	S 355
	$f_{u,k}$ [N/mm ²]		
	360	430	510
6	11.392	13.608	16.139
8	24.069	28.749	34.098
10	42.996	51.356	60.910
12	69.071	82.501	97.850
16	145.927	174.302	206.730
20	260.676	311.363	369.292
24	418.768	500.195	593.254
30	748.064	893.521	1.059.758

Die Erhöhung der Stahlgüte geht linear in die Berechnung des Fließmomentes ein. Der Übergang von Stahl der Güte S 235 auf S 275 bringt eine Verbesserung des Fließmomentes um den 19 Prozent und bei Stahl der Güte S 355 sind es sogar 42 Prozent.

Das folgende Diagramm veranschaulicht, dass im Bereich größerer Stabdübeldurchmesser, etwa ab Durchmesser 20 mm, eine höhere Stahlfestigkeit eine erhebliche Steigerung des charakteristischen Fließmomentes $M_{y,Rk}$ bringt.

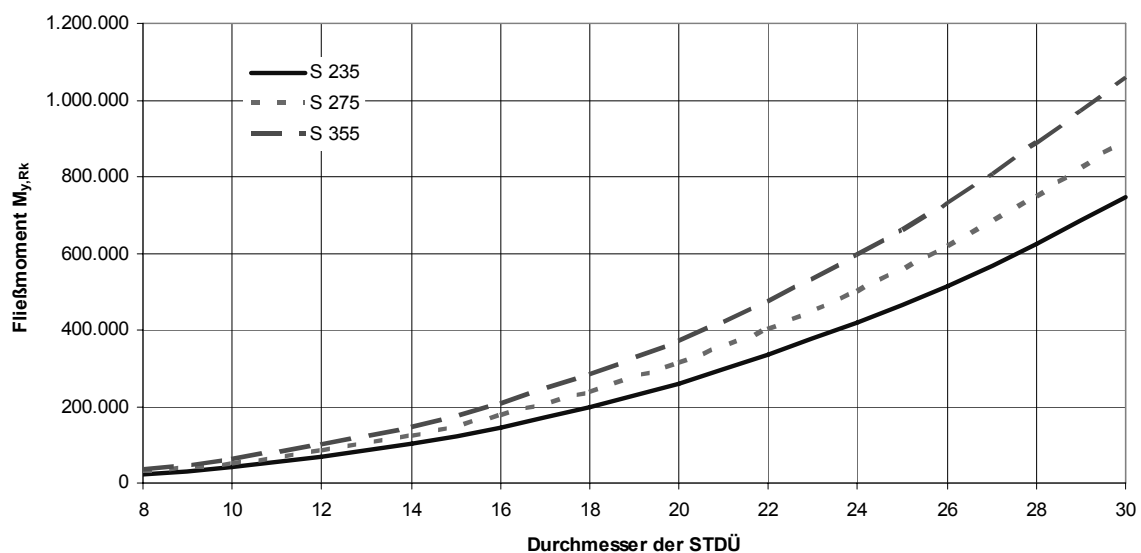


Abb. 21: Fließmoment in Abhängigkeit von Stahlgüte und Durchmesser

4.6. Schlankheit der Verbindungsmittel

Die Schlankheit des Verbindungsmittels hat unmittelbaren Einfluss auf die Versagensart. Sie ist definiert durch das Verhältnis der Holzdicke zum Durchmesser des Stabdübels.

Bei kleinen Schlankheiten stellt sich der erste Versagensmechanismus, das Lochleibungsversagen, ein. Mit einer Vergrößerung der Schlankheit wird das kombinierte Versagen, Lochleibung und Fließmoment, erreicht. Durch eine weitere Steigerung der Schlankheit des Stabdübels kommt es zu Versagensmechanismus drei, dem Versagen des Stabdübels durch die Ausbildung einer Fließgelenkkette.

Für die Ermittlung der Tragfähigkeit $F_{v,Rk}$ pro Scherfuge und Verbindungsmittel darf für die Stifte unter Biegebeanspruchung ideal plastisches Materialverhalten angenommen werden.

Plastisches Verhalten der Stifte kann durch Verwendung verhältnismäßig schlanker Verbindungsmittel erreicht werden.

4.7. Durchmesser der Verbindungsmittel und Holzdicken

Die Biegesteifigkeit eines Verbindungsmittels ist vom Durchmesser abhängig. Aus einer größeren Biegesteifigkeit ergibt sich auch eine gleichmäßigere Verteilung der Lochleibungsspannung im Holzbauteil [19]. Wobei die Abweichung von einem rechnerischen Mittelwert im Seitenholz größer ist als im Mittelholz.

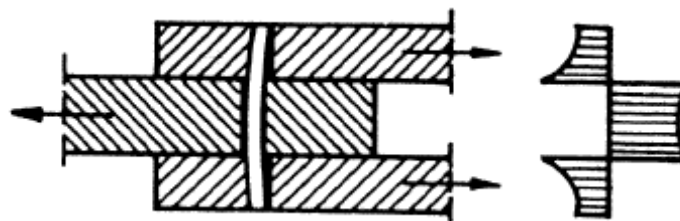


Abb. 22: Verformung und Spannungsverlauf [19]

Für eine gleichmäßigere Verteilung der Lochleibungsspannung sollten also größere Durchmesser der Verbindungsmittel, also kleine Schlankheiten, gewählt werden. Dem steht jedoch die Forderung nach kleinen Durchmessern zur optimalen Ausnutzung der Verbindungsmittel und zur Vermeidung des Spaltens des Holzes gegenüber.

4.7.1. Zweischnittige Holz-Holz-Verbindung

Anhand der Gleichungen zur Ermittlung der Tragfähigkeiten lässt sich nun für die einzelnen Normen ein „ideales“ Verhältnis der Holzdicke zu den Durchmessern der Verbindungsmittel errechnen.

Die Tragfähigkeit einer Stiftverbindung ist abhängig von der Schlankheit a/d .

Die optimale Mindestholzdicke ergibt sich in der Önorm folgendermaßen:

$$B \cdot d^2 =_{zul} \sigma_1 \cdot a \cdot d \quad (58)$$

$$\frac{a}{d} = \frac{B}{_{zul} \sigma_1} = \frac{51}{8,5} = 6,0 \quad (59)$$

Das ideale Verhältnis der Mittelholzdicke zum Stabübeldurchmesser beträgt also 6,0. Bei diesem Wert ist die maximale Tragfähigkeit des Stabdübels erreicht. Eine Erhöhung der Holzdicke bringt keine Erhöhung der Tragfähigkeit des Stabdübels.

Die zugehörige Seitenholzdicke lässt sich ebenfalls ermitteln:

$$_{zul} \sigma_{1,mitte} \cdot a_{mitte} \cdot d =_{zul} \sigma_{1,seite} \cdot 2 \cdot a_{seite} \cdot d \quad (60)$$

$$\frac{a_{mitte}}{a_{seite}} = \frac{2 \cdot_{zul} \sigma_{1,seite}}{_{zul} \sigma_{1,mitte}} = \frac{2 \cdot 5,5}{8,5} \approx \frac{1,30}{1} \quad (61)$$

Aus diesem Verhältnis ergibt sich, dass jedes Seitenholz rund 77 % der Dicke des Mittelholzes hat. Die Summe der Seitenhölzer hat also etwa die 1,54 – fache Stärke des Mittelholzes.

Da die Önorm B 4100-2 ab Stabdübeln mit einem Durchmesser größer 24 mm eine Abminderung der zulässigen Lochleibungsspannung um 10% vorsieht, ändert sich dieses Verhältnis.

$$B \cdot d^2 =_{zul} \sigma_1 \cdot a \cdot d \cdot 0,9 \quad (62)$$

$$\frac{a}{d} = \frac{B}{_{zul} \sigma_1 \cdot 0,9} = \frac{51}{8,5 \cdot 0,9} = 6,67 \quad (63)$$

Das Verhältnis Seitenholzdicke zu Mittelholzdicke bleibt gleich, da die Abminderung auch auf das Seitenholz anzuwenden ist.

Jene Mindestholzdicke, die erforderlich ist um im EC 5 das Auftreten eine Fließgelenkes zu erzeugen kann durch gleichsetzten der Versagensarten eins und drei ermittelt werden.

$$0,5 \cdot f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d = 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} \quad (64)$$

$$f_{h,1,k} = \frac{f_{h,2,k}}{\beta} \quad (65)$$

$$t_2 = 2 \cdot 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot M_{y,k}}{\beta \cdot f_{h,2,k} \cdot d}} \quad (66)$$

$$t_2 = 1,15 \cdot \frac{4}{\sqrt{1 + \beta}} \cdot \sqrt{\frac{M_{y,k}}{f_{h,2,k} \cdot d}} \quad (67)$$

Die Mindestholzdicken sind also im EC 5 von den Materialeigenschaften abhängig.

Weiters lässt sich kein direkter Zusammenhang von Seiten- und Mittelholzdicke wie in der Önorm herstellen.

Da das Seitenholz neben dem reinen Lochleibungsversagen und dem reinen Stabdübelversagen auch die kombinierte Versagensart beeinflusst, wird die optimale Seitenholzdicke zur Erreichung der höchsten Tragfähigkeit des Stabdübels durch gleichsetzten der Versagensarten j) (kombiniertes Versagen) und k) (Fließgelenkkette) gefunden.

$$1,05 \cdot \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \cdot \left[\sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] = 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} \quad (68)$$

mit $k_M = \frac{t_1}{\sqrt{\frac{M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d}}}$ vereinfacht sich die Gleichung zu

$$\frac{1,05}{2 + \beta} \cdot \left[\sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta)}{k_M^2}} - \beta \right] = 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \frac{\sqrt{2}}{k_M} \quad (69)$$

$$\sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta)}{k_M^2}} = \frac{1,15}{1,05} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \frac{\sqrt{2}}{k_M} \cdot (2 + \beta) + \beta \quad (70)$$

$$k_M \sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta)}{k_M^2}} = \frac{1,15}{1,05} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot (2 + \beta) + \beta \cdot k_M \quad (71)$$

$$k_M^2 \cdot 2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + 4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) = \frac{1,15^2}{1,05^2} \cdot \frac{2 \cdot 2 \cdot \beta}{1 + \beta} \cdot (2 + \beta)^2 + 2 \cdot \frac{1,15}{1,05} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot (2 + \beta) \cdot \beta \cdot k_M + \beta^2 \cdot k_M^2 \quad (72)$$

$$k_M^2 - k_M \cdot 2 \cdot \frac{1,15}{1,05} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 2 \cdot \beta}{1 + \beta}} + \frac{4 \cdot \left(-\frac{1,15}{1,05} (2 + \beta) + 1 + \beta \right)}{1 + \beta} = 0 \quad (73)$$

$$k_M = \frac{1,15}{1,05} \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot \beta}{1 + \beta}} \pm 2,365665 \quad (74)$$

Die Mindestholzdicke für das Seitenholz ergibt sich zu

$$t_1 = \left(2,1905 \cdot \sqrt{\frac{\beta}{1 + \beta}} + 2,365665 \right) \cdot \sqrt{\frac{M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d}} \quad (75)$$

Auch hier sind die Mindestholzdicken von den Materialeigenschaften abhängig. ohne die Faktoren 1,05 bzw. 1,15 würde sich folgendes ergeben:

$$k_M = \sqrt{\frac{4 \cdot \beta}{1 + \beta}} \pm 2 \quad (76)$$

$$t_1 = \left(2 \cdot \sqrt{\frac{\beta}{1 + \beta}} + 2 \right) \cdot \sqrt{\frac{M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d}} \quad (77)$$

Für $\beta = 1$ (gleiche Holzart, Winkel $\alpha = 0$) ergibt sich ein Verhältnis von

$$\frac{t_2}{t_1} = \frac{3,25269}{3,9145824} \approx \frac{1}{1,2} \quad (78)$$

Im EC 5 muss, wenn die Hölzer am Minimum gehalten werden, jedes Seitenholz die 1,2 – fache Dicke des Mittelholzes haben um den 3. Versagensmechanismus zu erreichen.

Die folgende Tabelle zeigt für den jeweiligen Stabdübeldurchmesser die erforderlichen Mindestholzdicken um reines Stabdübelversagen hervorzurufen.

Zur Berechnung der Mindestholzdicken wurden folgende Eingangsparameter gewählt:

Stahlgüte S 235 $f_{uk} = 360 \text{ N/mm}^2$

Holzgüte C 24 $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$

$\beta = 1$ (gleiche Lochleibungsfestigkeiten für Seiten- und Mittelholz; Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung 0°)

Tab. 18: Mindestholzdicken im EC 5 und in der ÖNORM B4100-2 bei zweischnittigen Holz-Holzverbindungen

Ø	EC 5			ÖNORM		
	SH	MH	Summe	SH	MH	Summe
6	33	28	93	28	36	92
8	42	35	119	38	48	124
10	51	42	144	47	60	154
12	60	50	170	56	72	183
16	77	64	218	75	96	246
20	94	78	266	93	120	305
24	111	92	314	124	160	407
30	138	115	391	155	200	509

Die Mindestdicken der Hölzer wurden jeweils aufgerundet.

Es zeigt sich, dass die Summen der Mindestholzdicken bei kleinen Durchmessern in beiden Normen etwa auf gleichem Niveau liegen. Vergleicht man allerdings die Mittelholzdicken, so fällt auf, dass die Werte nach EC 5 um 1/3 geringer sind als jene der Önorm. Bei den Seitenholzdicken liegt der EC 5 bis zu Stabdübeln mit einem Durchmesser von 20 mm über den Werten der Önorm. Dies ergibt sich vor allem aus dem zusätzlichen Versagensmechanismus, welcher die Kombination von Lochleibungsversagen und auftreten eines Fließgelenkes berücksichtigt. Ab Durchmessern ≥ 24 mm sind die Mindestseitenholzdicken nach EC 5 immer unter jenen der Önorm. Dies ist auf die Abminderung der zulässigen Lochleibungsspannung um 10 % in der ÖNORM zurückzuführen. Die Werte der Mindestholzdicken laut EC 5 stellen unterste Grenzen für das Erreichen der höchsten Tragfähigkeit eines Stabdübels dar. In der Praxis würde eine Verbindung mit Mindestholzdicken eher unwirtschaftlich sein, da z.B. bei einem Durchmesser von 10 mm das Mittelholz 42 mm und die Seitenhölzer zusammen mit 102 mm mehr als doppelt so breit sind.

Jede Steigerung der Holzdicken bringt keine Erhöhung der Tragfähigkeit der Verbindung.

Die Mindestholzdicken sind für Stähle mit höherer Zugfestigkeit und Hölzer anderer Festigkeitsklassen leicht aus der obigen Tabelle ermittelbar. Die angegebenen Holzdicken sind mit dem Faktor

$$\sqrt{\frac{f_{u,k} \cdot 350}{360 \cdot \rho_k}} \quad (79)$$

zu multiplizieren.

Die durch eine Erhöhung der Stahlgüte bewirkte Vergrößerung der Tragfähigkeit des Stabdübels bewirkt auch eine Vergrößerung der Kräfte welche durch Lochleibungsdruck übertragen werden müssen. Hochfeste Stähle erfordern daher größere Mindestholzdicken.

Die Wahl einer höheren Festigkeitsklasse des Holzes hat den umgekehrten Effekt und die Mindestholzdicken werden kleiner.

Da die Mindestdicke des Mittelholzes gegenüber der Önorm so gering ausfällt, wird überprüft, ob das Versagen des Nettoquerschnittes hier maßgebend wird.

Untersucht wird eine zweischnittige Holz-Holz-Verbindung mit zwei Stabdübeln $\varnothing 10$ mm unter Einhaltung der Mindestabstände. Die Holzgüte wird mit C24 und die Stahlgüte mit S 235 angenommen.

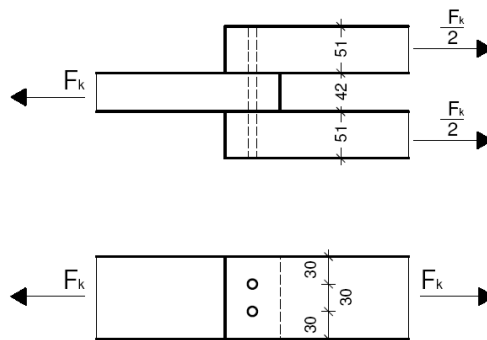


Abb. 23: Zugstoß

Der Nettoquerschnitt des Mittelholzes ergibt sich zu

$$A_{Netto} = b \cdot h_{Netto} \quad (80)$$

$$A_{Netto} = 4,2 \cdot (3 \cdot 3,0 - 2 \cdot 1,0) = 28,70 \text{ cm}^2$$

Daraus lässt sich die charakteristische Tragfähigkeit des Nettoquerschnittes errechnen

$$R_{k,Netto} = A_{Netto} \cdot f_{t,0,k} \quad (81)$$

$$R_{k,Netto} = 28,70 \cdot 1,40 = 40,18 \text{ kN}$$

Die charakteristische Tragfähigkeit pro Scherfläche der Verbindungsmittel errechnet sich aus:

$$F_{v,Rk} = 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} \quad (82)$$

$$F_{v,Rk} = 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 1}{1 + 1}} \cdot \sqrt{2 \cdot 42996 \cdot 25,83 \cdot 10} = 5419,87 \text{ N} \approx 5,42 \text{ kN}$$

Da die Verbindung aus vier Scherflächen besteht, beträgt die charakteristische Tragfähigkeit 21,68 kN.

Die Tragfähigkeit des Nettoquerschnittes wird also nicht erreicht. Die Verbindung besteht allerdings nur aus zwei Stabdübeln. Durch die strengen Abminderungsvorschriften des EC 5 für in Kraft- und Faserrichtung hintereinander liegende Verbindungsmittel wird die Tragfähigkeit des Nettoquerschnittes bei je drei hintereinander liegenden Stabdübeln, also bei sechs Stück, überschritten.

4.7.2. Zweischnittige Stahl-Holz-Verbindung

dünnes Stahlblech als Seitenteil der Verbindung

Die Mindestholzdicke des Mittelholzes bei dünnen Stahlblechen errechnet sich durch gleichsetzen der beiden möglichen Versagensarten:

$$0,5 \cdot f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d = 1,15 \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot f_{h,2,k} \cdot d} \quad (83)$$

$$t_2 = 2 \cdot 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot M_{y,k}}{f_{h,2,k} \cdot d}} \quad (84)$$

$$t_2 = 2,3 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{M_{y,k}}{f_{h,2,k} \cdot d}} \quad (85)$$

Nach der Önorm gilt weiterhin bis zu Durchmessern von 24 mm das Sechsfache und darüber das 6,67 - fache des Durchmessers des Stabdübels als Mindestholzdicke.

Die folgende Tabelle zeigt für den jeweiligen Stabdübeldurchmesser die erforderlichen Mindestholzdicken um reines Stabdübelversagen hervorzurufen.

Es wurden folgende Eingangsparameter gewählt:

Stahlgüte S 235 $f_{uk} = 360 \text{ N/mm}^2$

Holzgüte C 24 $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$

Tab. 19: Mindestholzdicken im EC 5 und in der ÖNORM B4100-2 bei zweischnittigen Stahl-Holz-Verbindungen mit außenliegendem dünnem Stahlblech

Ø	EC 5	ÖNORM
	MH	MH
6	28	36
8	35	48
10	42	60
12	50	72
16	64	96
20	78	120
24	92	160
30	115	200

Die erforderlichen Holzdicken nach EC 5 liegen um mindestens 25% unter jenen der ÖNORM.

Das erforderliche Verhältnis t/d liegt unter 6,0, also unter den Werten der Önorm.

Für andere Stahl- bzw. Holzgüten gelten die gleichen Ausführungen wie bei zweischnittigen Holz- Holz- Verbindungen.

dicke Stahlblech als Seitenteil der Verbindung

Die Ermittlung der Mindestholzdicke erfolgt wie beim dünnen Stahlblech.

$$0,5 \cdot f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d = 2,3 \cdot \sqrt{M_{y,k} \cdot f_{h,2,k} \cdot d} \quad (86)$$

$$t_2 = 4,6 \cdot \sqrt{\frac{M_{y,k}}{f_{h,2,k} \cdot d}} \quad (87)$$

Die folgende Tabelle zeigt für den jeweiligen Stabdübeldurchmesser die erforderlichen Mindestholzdicken um reines Stabdübelversagen hervorzurufen.

Es wurden folgende Eingangsparameter gewählt:

Stahlgüte S 235 $f_{uk} = 360 \text{ N/mm}^2$

Holzgüte C 24 $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$

Tab. 20: Mindestholzdicken im EC 5 und in der ÖNORM B4100-2 bei zweischnittigen Stahl-Holz-Verbindungen mit außenliegendem dickem Stahlblech

Ø	EC 5	ÖNORM
	MH	MH
6	39	36
8	50	48
10	60	60
12	70	72
16	90	96
20	110	120
24	131	160
30	162	200

Bei außenliegendem dicken Stahlblech bewegen sich die Mindestholzdicken von EC 5 und Önorm bis zu Stabdübeldurchmessern von 12 mm etwa auf gleichem Niveau. Bei größeren Durchmessern liegt die ÖNORM immer über den Werten des EC 5. Die Schlankheit von sechs wird im EC 5 bei kleineren Durchmessern etwas überschritten und bei Durchmessern ab 10 mm unterschritten.

Im Vergleich zum dünnen außenliegenden Stahlblech wird die Mindestholzdicke aber auch der Tragwiderstand um den Faktor $\sqrt{2}$ erhöht.

Für andere Stahl- bzw. Holzgüten gelten die gleichen Ausführungen wie bei zweischnittigen Holz- Holz- Verbindungen.

Stahlblech jeder Dicke als Mittelteil der Verbindung

Hier wird die Mindestholzdicke durch gleichsetzen des Versagens mit einem und mit zwei Fließgelenken pro Scherfuge ermittelt.

$$f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d \cdot \left[\sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y,k}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - 1 \right] = 2,3 \cdot \sqrt{M_{y,k} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} \quad (88)$$

$$k_M = \frac{t_1}{\sqrt{\frac{M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d}}} \quad (89)$$

$$\sqrt{2 + \frac{4}{k_M^2}} = 2,3 \cdot \frac{1}{k_M} + 1 \quad (90)$$

$$k_m^2 - 4,6 \cdot k_M + 4 - 2,3^2 = 0 \quad (91)$$

$$k_M = 4,87 \quad (92)$$

$$t_1 = 4,87 \cdot \sqrt{\frac{M_{y,k}}{f_{h,1,k} \cdot d}} \quad (93)$$

Die folgende Tabelle zeigt für den jeweiligen Stabdübeldurchmesser die erforderlichen Mindestholzdicken um reines Stabdübelversagen hervorzurufen.

Es wurden folgende Eingangsparameter gewählt:

Stahlgüte S 235 $f_{uk} = 360 \text{ N/mm}^2$

Holzgüte C 24 $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$

Tab. 21: Mindestholzdicken im EC 5 und in der ÖNORM B4100-2 bei zweischnittigen Stahl-Holz-Verbindungen mit mittigem Stahlblech jeder Dicke

Ø	EC 5	ÖNORM
	SH	SH
6	41	36
8	52	48
10	63	60
12	74	72
16	95	96
20	116	120
24	138	160
30	172	200

Wie schon bei den zweischnittigen Holz-Holz-Verbindungen verlangt der EC 5 auch hier bei kleineren Durchmessern bis 12 mm eine größere Mindestholzdicke als die Önorm. Vor allem bei den großen Durchmessern ab 24 mm liegt der EC 5 weit unter den Mindestholzdicken der Önorm. Grund dafür ist die Abminderung der zulässigen Lochleibungsspannung in der Önorm B 4100-2 um zehn Prozent.

Für andere Stahl- bzw. Holzgüten gelten die gleichen Ausführungen wie bei zweischnittigen Holz- Holz- Verbindungen.

4.8. Verbindungsmittelabstände

Die geringe Querkzugfestigkeit des Holzes erfordert, dass gewisse Abstände vom Verbindungsmittel zum Querschnittsrand und auch unter den Verbindungsmitteln eingehalten werden. Nur so kann die Ermittelte Tragfähigkeit auch erreicht werden.

Der Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung sowie die Lage der Verbindungsmittel zu den Bauteilrändern bestimmen die Abstände.

Die Anordnung stiftförmiger Verbindungsmittel in einer Verbindung hat auch einen großen Einfluss auf die Lochleibungsfestigkeit. Der Eurocode 5 fordert deshalb Mindestwerte für die Abstände in Faserrichtung und rechtwinkelig dazu sowie für die Endabstände in Faserrichtung und die Randabstände rechtwinkelig zur Faserrichtung mit Unterscheidung in beanspruchte und unbeanspruchte Ränder.

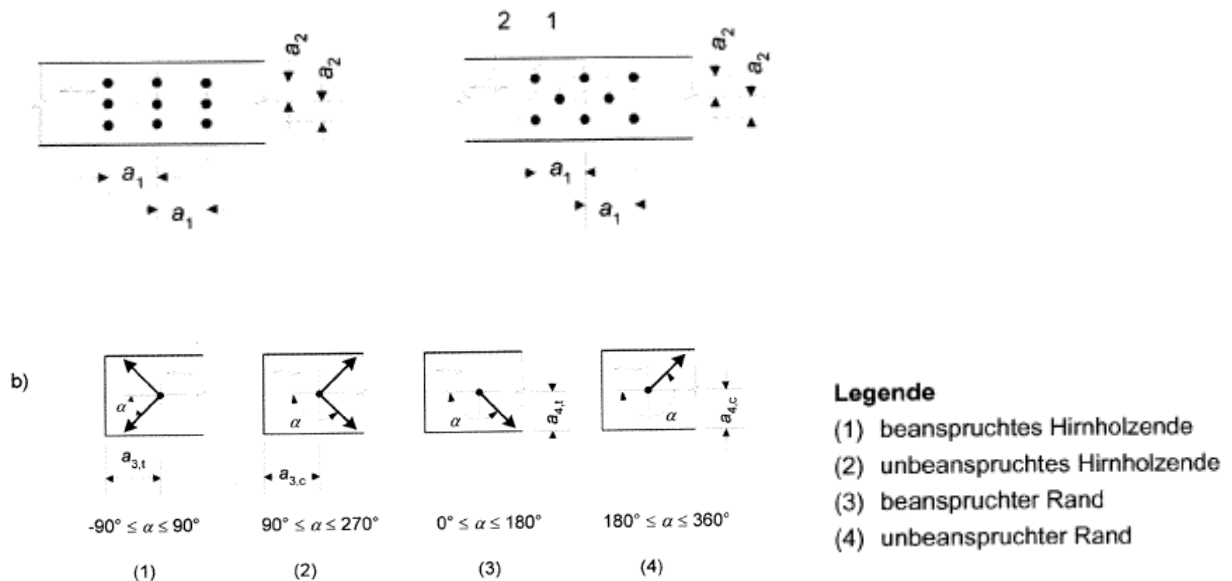


Abb. 24: Abstände der Verbindungsmittel untereinander und von den Rändern; Definitionen und Bezeichnungen

Tab. 22.: Mindestabstände von Stabdübeln lt. EC 5 [1]

Abstände	Winkel	Mindestabstände
a_1 (in Faserrichtung)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$(3+2 \cos\alpha)d$
a_2 (rechtwinkelig zur Faserrichtung)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$3d$
$a_{3,t}$ (beanspruchtes Hirnholzende)	$-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	$\max(7d; 80 \text{ mm})$
$a_{3,c}$ (unbeanspruchtes Hirnholzende)	$90^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$	$\max[(a_{3,t} \sin\alpha); 3d]$
	$150^\circ \leq \alpha \leq 210^\circ$	$3d$
	$210^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$	$\max[(a_{3,t} \sin\alpha); 3d]$
$a_{4,t}$ (beanspruchter Rand)	$0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$	$\max[(2+2\sin\alpha); 3d]$
$a_{4,c}$ (unbeanspruchter Rand)	$180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$3d$

Wie aus diesen Aufstellungen zu erkennen ist, hängen die Randabstände sowohl vom Verbindungsmitteldurchmesser als auch vom Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung ab.

In der Önorm B 4100-2 werden die Mindestabstände durch folgende Abbildung definiert.

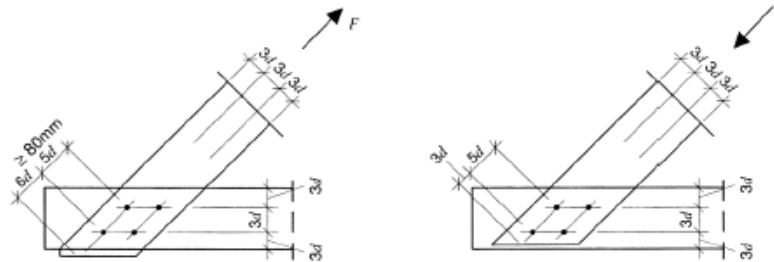


Abb. 25: Mindestabstände von Stabdübeln lt. ÖNORM B 4100-2 [2]

In den folgenden Abbildungen wird ein Vergleich der Mindestabstände lt. EC 5 und ÖNORM B 4100-2 von Stabdübeln in einer Verbindung dargestellt.

Der Abstand a_1 definiert den Abstand zwischen den Verbindungsmitteln innerhalb einer Reihe in Faserrichtung des Holzes, wobei der Kraftangriff aus jeder beliebigen Richtung erfolgen kann.

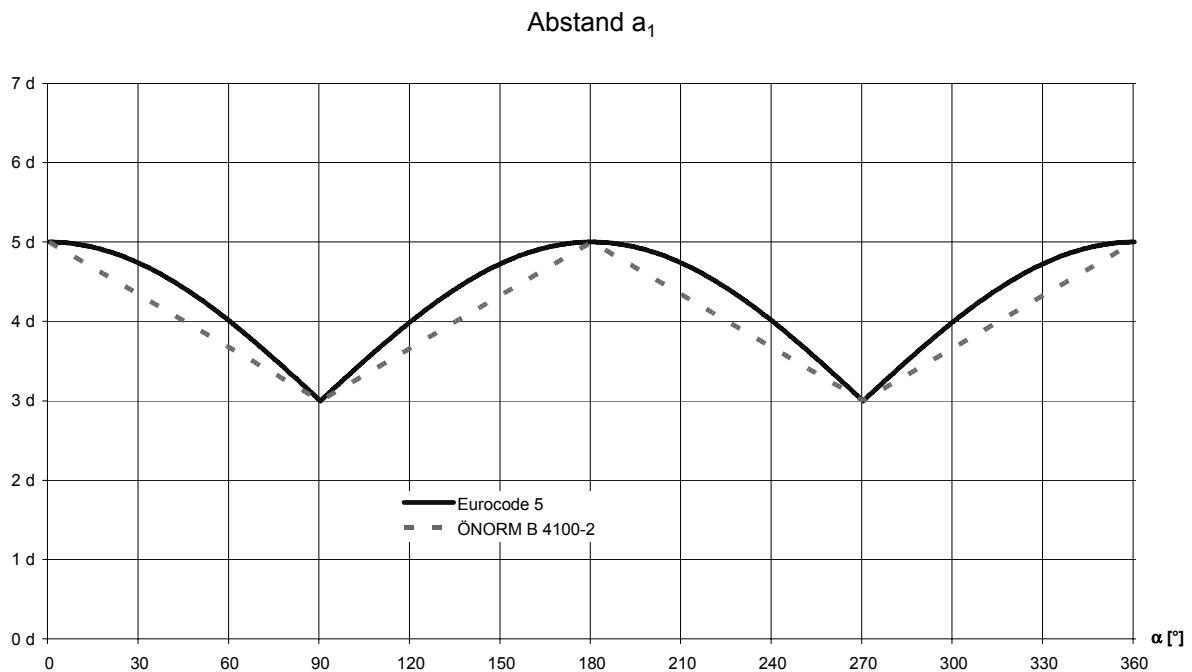


Abb. 26: Abstand a_1

Wie aus der obenstehenden Abbildung ersichtlich ist, liegen die geforderten Abstände des Eurocode 5 immer geringfügig über jenen der ÖNORM B 4100-2. Nur bei Anschlüssen in welchen Kraft- und Faserrichtung parallel ($5 \cdot d$) sind oder in rechtem Winkel zueinander stehen ($3 \cdot d$) stimmen die Werte der beiden Normen überein.

Der Abstand a_2 definiert den Abstand der rechtwinkelig zur Faserrichtung zwischen der Verbindungsmittelreihen, wobei der Kraftangriff wieder aus jeder beliebigen Richtung erfolgen kann.

In diesem Fall stimmen die beiden Normen überein und der Abstand beträgt konstant $3 \cdot d$.

Der Abstand a_3 definiert die mindeste Entfernung der Verbindungsmittel vom Hirnholzende. Wobei hier zwischen beanspruchtem und unbeanspruchtem Hirnholzende unterschieden wird.

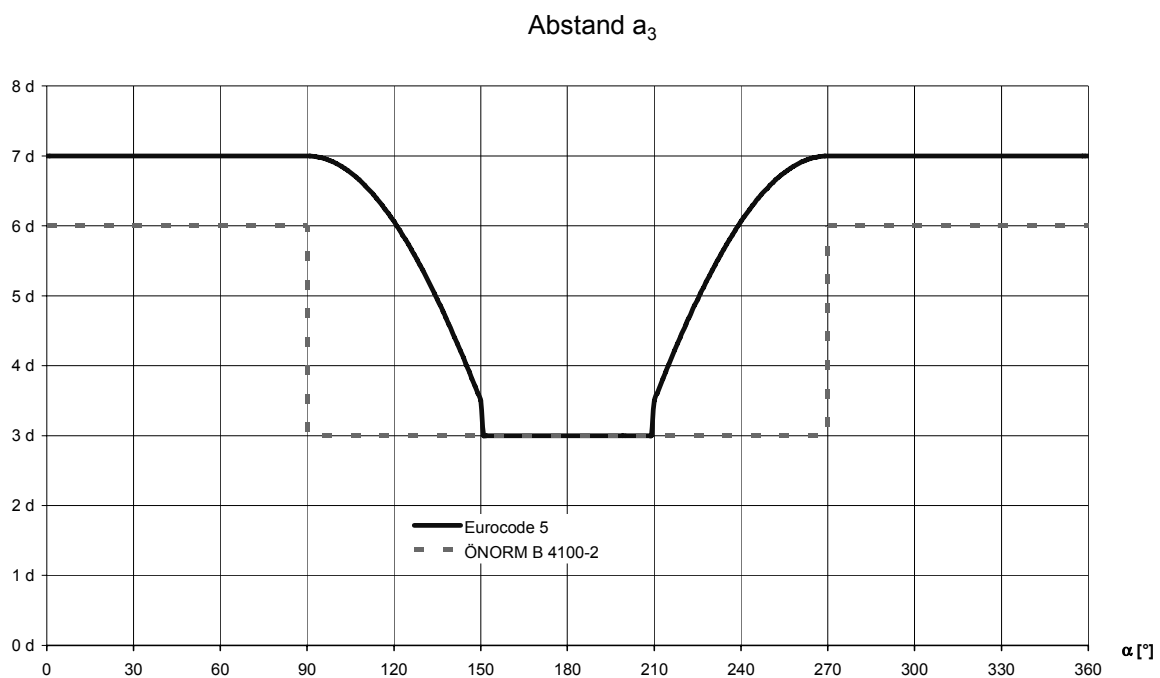


Abb. 27: Abstand a_3

Hier sieht der Eurocode strengere Vorschriften vor als die ÖNORM. Lediglich im Bereich des unbeanspruchten Hirnholzes decken sich die Mindestabstände. Ansonsten müssen bei Berechnung nach Eurocode größere Abstände in Kauf genommen werden. Im Eurocode wurde sozusagen ein Übergangsbereich zwischen beanspruchtem und unbeanspruchtem Hirnholz geschaffen. In diesem Bereich kann sich der geforderte Mindestabstand mehr als verdoppeln.

Der Abstand a_4 definiert den Abstand der Verbindungsmittel vom beanspruchten bzw. unbeanspruchten Rand. In der folgenden Darstellung stellt der Bereich von 0° bis 180° den beanspruchten Rand und der Bereich von 180 bis 360° den unbeanspruchten Rand dar.

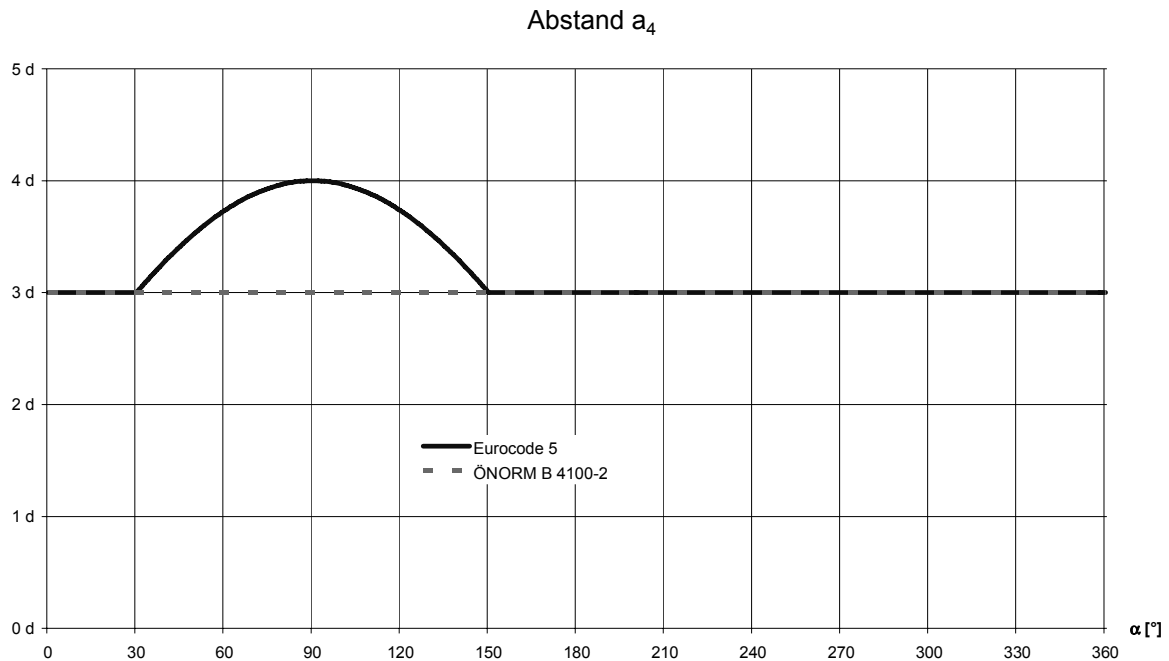


Abb. 28: Abstand a_4

Im Eurocode 5 erhöht sich bei 90° der Abstand a_4 vom belasteten Rand, da in diesem Bereich die Querschnittsgefahr abgedeckt werden muss.

Die durch die stiftförmigen Verbindungen erforderlichen Abstände hängen vom Durchmesser des Verbindungsmittels sowie auch in einigen Fällen vom Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung ab.

4.9. Berücksichtigung der Verbindungsmittelanzahl

Bei Anschlüssen mit mehreren Stabdübeln in Kraft- und Faserrichtung hintereinander ist die Anzahl der wirksamen Verbindungsmittel aufgrund der Spaltneigung des Holzes zu reduzieren.

Die im Eurocode angegebenen Formelwerke zur Berechnung der Tragfähigkeit der Verbindungsmittel gelten jeweils nur für ein einzelnes Verbindungsmittel. Um nun die Tragfähigkeit der gesamten Verbindung zu erhalten, sind die einzelnen Tragwiderstände der Verbindungsmittel, unter Berücksichtigung eines Abminderungsfaktors, aufzusummieren. Dieser Abminderungsfaktor ist auch aufgrund der Tatsache notwendig, da zulässige Lochspiele und Herstellungsungenauigkeiten zu unterschiedlichen Kraftaufteilungen führen.

Bei einer Reihe von n Stabdübeln in Faserrichtung sollte die Tragfähigkeit, für die Kräfte in Faserrichtung des Holzes, in dieser Richtung mit einer wirksamen Bolzenanzahl n_{ef} berechnet werden.

$$n_{ef} = \min \left\{ \begin{array}{l} n \\ n^{0,9} \cdot \sqrt[4]{\frac{a_1}{13 \cdot d}} \end{array} \right. \quad (94)$$

a_1 Abstand in Faserrichtung

d Verbindungsmitteldurchmesser

n Anzahl der Stabdübel in einer Reihe

Die Tragfähigkeit ist im Eurocode wie in der Önorm bereits ab zwei Verbindungsmitteln welche in übereinstimmender Kraft- und Faserrichtung hintereinander liegen abzumindern. Die Önorm begrenzt die maximale Anzahl an Stabdübeln hintereinander auf sechs Stück. Der Eurocode sieht so eine Begrenzung nicht vor.

Abminderung infolge n-effektiv

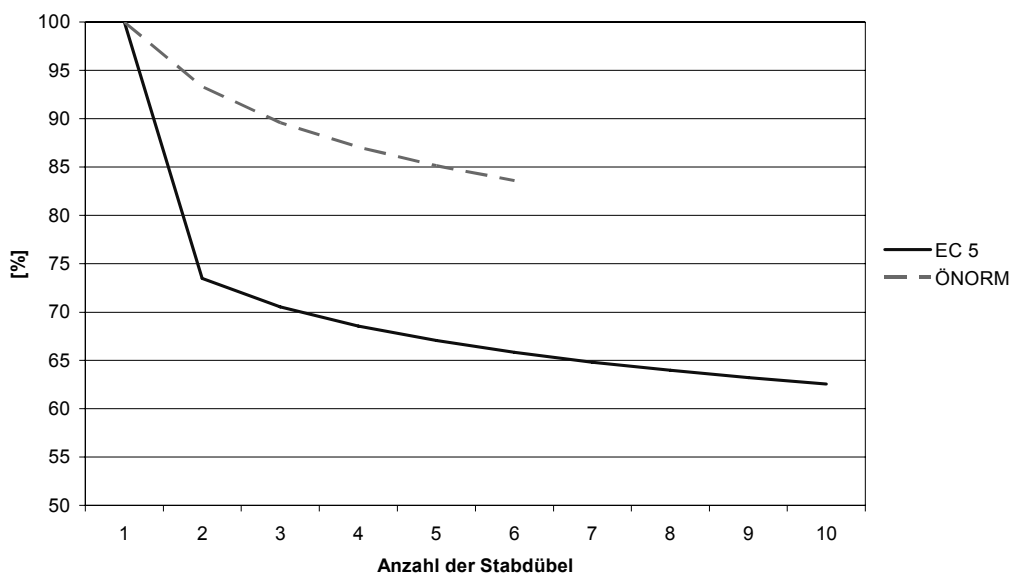


Abb. 29: Effektive Anzahl der Verbindungsmittel nach EC 5 und ÖNORM b 4100-2

Wie aus der obigen Abbildung ersichtlich ist, fällt der Wert der Tragfähigkeit nach EC 5 bei einer Einhaltung des Mindestabstandes von $5 \cdot d$ bei zwei Stabdübeln bereits auf unter 75%.

Bei Kräften rechtwinkelig zur Faserrichtung ist die wirksame Anzahl der Verbindungsmittel anzunehmen zu

$$n_{ef} = n \quad (95)$$

Bei Winkeln zwischen 0° und 90° sind Zwischenwerte linear einzuschalten.

Die folgende Tabelle gibt Aufschluss über die Abminderung der Verbindungsmittellanzahl in Faserrichtung und normal dazu.

Tab. 23: Abminderung der Verbindungsmittellanzahl in Prozent

Anzahl	2		3		4		5		6	
	α [$^\circ$]		α [$^\circ$]		α [$^\circ$]		α [$^\circ$]		α [$^\circ$]	
EC 5	0	90	0	90	0	90	0	90	0	90
[%]	1,47	2	2,12	3	2,74	4	3,35	5	3,95	6
ÖNORM	1,87	2	2,69	3	3,48	4	4,26	5	5,02	6
[%]	73,48	100,00	70,56	100,00	68,56	100,00	67,04	100,00	65,83	100,00
ÖNORM	1,87	2	2,69	3	3,48	4	4,26	5	5,02	6
[%]	93,30	100	89,60	100	87,06	100	85,13	100	83,60	100

Der Eurocode berücksichtigt in Faserrichtung also lediglich 78,75 Prozent der von der Önorm berücksichtigten Verbindungsmittel. Dies gilt aber nur bei der Einhaltung der Mindestabstände von 5d in Faserrichtung.

Falls es möglich ist, ist es empfehlenswert die Verbindungsmittelabstände zu erhöhen. Dadurch erhöht sich die effektive Anzahl der wirksamen Stabdübel und somit auch die Tragfähigkeit.

Tab. 24: Erhöhungsfaktor für eine Steigerung des Mindestabstandes in Faserrichtung nach EC 5

a_1	5d	6d	7d	8d	9d	10d	11d	12d	13d
$\sqrt[4]{\frac{a_1}{13 \cdot d}}$	0,79	0,82	0,86	0,89	0,91	0,94	0,96	0,98	1,00
Faktor	1,00	1,05	1,09	1,12	1,16	1,19	1,22	1,24	1,27

Bei einer Erhöhung des Mindestabstandes a_1 in Faserrichtung von 5·d auf zum Beispiel 8·d wird die wirksame Anzahl der Verbindungsmittel um 12 Prozent gesteigert.

Der effektive Bemessungswert der Tragfähigkeit errechnet sich wie folgt

$$R_{ef,d} = n_{ef} \cdot R_d \quad (96)$$

$R_{ef,d}$effektiver Bemessungswert der Tragfähigkeit für eine Reihe von n in Faserrichtung hintereinander liegenden Verbindungsmitteln

n_{ef} wirksame Anzahl von in Faserrichtung hintereinander liegenden Verbindungsmitteln

R_d Bemessungswert der Tragfähigkeit je Verbindungsmittel

Auch die Önorm sieht wegen der Spaltgefahr eine Abminderung der in Kraft- und Faserrichtung hintereinander liegenden Anzahl der Verbindungsmittel vor.

die wirksame Anzahl n_{eff} wie folgt zu bestimmen

$$n_{eff} = n_{red} \cdot \frac{90 - \alpha}{90} + n \cdot \frac{\alpha}{90} \quad (97)$$

wobei

$$n_{red} = n^{0,9} \quad (98)$$

gilt.

- n_{eff} wirksame Anzahl der Verbindungsmittel in Faserrichtung
 n_{red} verbindungsmittelspezifische Anzahl der Verbindungsmittel in Faserrichtung
 n Anzahl der in Faserrichtung hintereinander angeordneten Verbindungsmittel
 α Winkel zwischen Kraft und Faserrichtung

5. Vergleich Eurocode 5 zur ÖNORM B 4100-2

5.1. Annahmen

Das Rechenmodell von Johansen geht unter anderem von folgenden Vereinfachungen aus:

- Ideal elastisch – plastische Arbeitslinie des Holzes unter Lochleibungsspannung
- Die Verankerungskräfte zwischen Holz und Verbindungsmittel werden nicht berücksichtigt
- Ein Spaltversagen der einzelnen Hölzer ist ausgeschlossen

Sind wesentliche Einflussparameter mit Einwirkung auf deren Trag- und Verformungsverhalten bekannt, kann durch gezielte Änderung an der konstruktiven Ausbildung eine Verbesserung der Tragfähigkeit erreicht werden. Für den Vergleich Eurocode – ÖNORM sind jedoch weitere Vereinfachungen bzw. Annahmen zu treffen

- $\alpha = 0^\circ$ (Winkel zwischen Last- und Faserrichtung), d.h. es handelt sich um einen geraden Stoß
- $\beta = 1$ (Verhältnis der Lochleibungsfestigkeiten $f_{h,2}/f_{h,1}$), d.h. beide Hölzer des Anschlusses haben die gleiche Rohdichte
- die Verbindungsmittel sind senkrecht zur Faser angeordnet
- alle Rand und Zwischenabstände werden gemäß Eurocode eingehalten
- bei Holz-Holz-Verbindungen beträgt die Seitenholzdicke 77% der Mittelholzdicke

Für eine anschauliche Gegenüberstellung der beiden Normen wird ein fiktiver Teilsicherheitsbeiwert ermittelt.

Bei nur einer veränderlichen Einwirkung gilt

$$S_d = \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} \quad (99)$$

wobei $\gamma_{Q,1} = 1,5$ und $\gamma_{G,j} = 1,35$ ist.

Für den Widerstand gilt:

$$R_d = k_{\text{mod}} \cdot \frac{R_k}{\gamma_M} \quad (100)$$

Über die Gleichung

$$S_k \cdot \gamma_f = \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} \quad (101)$$

Kann der fiktive Teilsicherheitsbeiwert γ_f für verschiedene Lastkombinationen ermittelt werden.

Tab. 25. Fiktiver Teilsicherheitsbeiwert

G/Q	G	Q	Sd	γ_f
0,25	0,20	0,80	1,47	1,47
0,50	0,33	0,67	1,45	1,45
1,00	0,50	0,50	1,43	1,43
1,50	0,60	0,40	1,41	1,41
2,00	0,67	0,33	1,40	1,40

Wie aus obiger Tabelle ersichtlich, bewegt sich γ_f in einer engen Bandbreite. Für die weiteren Betrachtungen wir mit einem Verhältnis G/Q von 1,00 und somit mit $\gamma_f = 1,43$ weitergerechnet.

5.2. Bruchmodell nach Eurocode 5

Die charakteristische Tragfähigkeit eines Verbindungsmittels in einer Verbindung wird mit Hilfe der Bemessungsformeln, die auf der Theorie von Johansen basieren, ermittelt. Am Beispiel einer zweischnittigen Holz-Holz-Verbindung wird der Zusammenhang zwischen Schlankheit und Tragfähigkeit gezeigt.

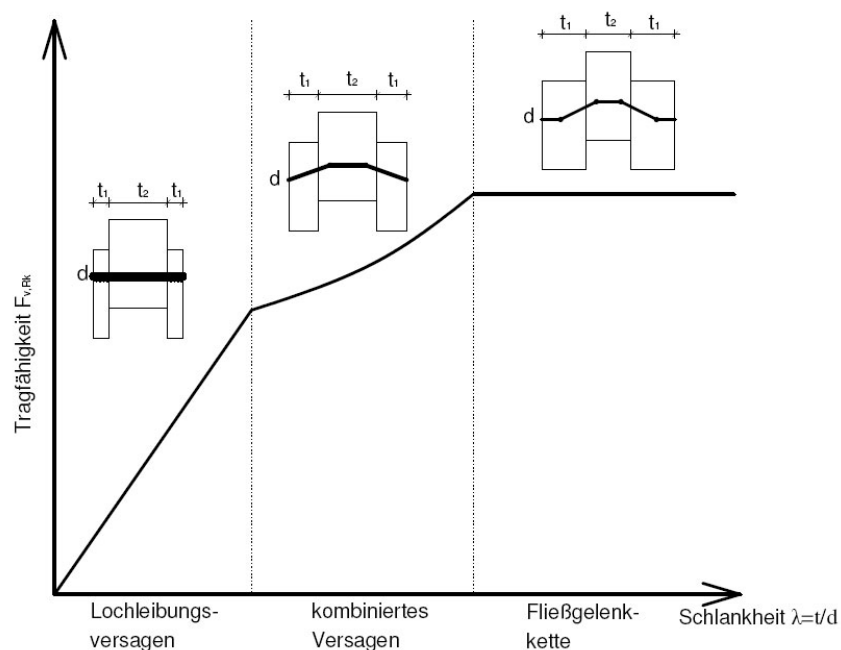


Abb. 30: Versagensmechanismus in Abhängigkeit von der Schlankheit

Im ersten Bereich liegt eine kleine Schlankheit vor. Hier wird die Tragfähigkeit durch die Festigkeit des Holzes und die geometrischen Abmessungen bestimmt. Es tritt Lochleibungsversagen ein.

Wird die Schlankheit gesteigert, also die Holzdicke im Verhältnis zum Stabdübeldurchmesser gesteigert, treten Fließgelenke im Mittelholz auf. Im Seitenholz wird die Lochleibungsfestigkeit überschritten. Es tritt also kombiniertes Versagen auf.

Durch eine weitere Erhöhung der Seitenholzdicke kann auch hier ein Fließgelenk auftreten. Es bildet sich eine Fließgelenkkette aus. Somit ist die höchstmögliche Tragfähigkeit des Stabdübels erreicht. Eine weitere Steigerung der Holzdicken bringt keine Erhöhung der Tragfähigkeit.

5.3. Sicherheitsbeiwert

Im Folgenden soll untersucht werden, wie sich eine unterschiedliche Anwendung der Teilsicherheitsbeiwerte und Modifikationsbeiwerte auswirkt.

Methode A

Der Bemessungswert wird am Ende der Berechnung ermittelt.

Der charakteristische Wert pro Scherfuge ist nach den Formeln in Kapitel 3 zu ermitteln.

Der Bemessungswert einer Scherfuge ergibt sich im EC 5 folgendermaßen:

$$R_d = k_{\text{mod}} \cdot \frac{F_{v,Rk}}{\gamma_m} \quad (102)$$

R_k charakteristischer Wert der Tragfähigkeit

R_d Bemessungswert der Tragfähigkeit pro Scherfuge

$F_{v,Rk}$ charakteristische Tragfähigkeit pro Scherfuge einer Verbindung

k_{mod} Modifikationsbeiwert

γ_M Teilsicherheitsbeiwert für Verbindungen

Methode B

Eine andere Möglichkeit ist es, Tragfähigkeit pro Scherfuge mit den Bemessungswerten der Lochleibungsfestigkeit und des Fließmomentes zu ermitteln. Die Teilsicherheitsbeiwerte werden zu Beginn der Bemessung eingerechnet.

$$M_{y,Rd} = \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_M} \quad (103)$$

$$f_{h,1,d} = \frac{f_{h,1,k} \cdot k_{\text{mod}}}{\gamma_M} \quad (104)$$

Der Teilsicherheitsbeiwert für das Material beträgt lt. EC 3 [18] für Stahl 1,10 und für Holz 1,30.

Die Erhöhungen für die zweite (1,05) und dritte Versagensart (1,15) werden dafür vernachlässigt.

$$F_{v,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,d} \cdot t_1 \cdot d \quad (105) \\ 0,5 \cdot f_{h,2,d} \cdot t_2 \cdot d \quad (106) \\ \frac{f_{h,1,d} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \cdot \left[\sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,Rd}}{f_{h,1,d} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rd}}{4} \quad (107) \\ \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,Rd} \cdot f_{h,1,d} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rd}}{4} \quad (108) \end{array} \right.$$

Der Bemessungswert einer Scherfuge ergibt sich somit zu:

$$R_d = F_{v,Rd} \quad (109)$$

Diese beiden Bemessungswerte werden nun dem charakteristischen Wert der Tragfähigkeit pro Scherfuge nach Johansen gegenübergestellt. Es werden also keine Teilsicherheitsfaktoren, Erhöhungsbeiwerte (1,05 und 1,15) und Modifikationsbeiwerte verwendet.

So erhält man für jeweils einen „gesamten Teilsicherheitsbeiwert“ der Beanspruchbarkeit γ_s .

Unter der Annahme, dass die Lochleibungsfestigkeiten der zu verbindenden Hölzer gleich groß ist ($\beta = 1,0$) ergeben sich folgende Sicherheitsbeiwerte.

A Bemessungswert am Schluss (EC 5)

B Bemessungswert am Anfang

Tab. 26: Gegenüberstellung der Sicherheitsbeiwerte

Versagen	k _{mod}									
	1,10		0,90		0,80		0,70		0,60	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
Lochleibung	1,18	1,18	1,44	1,44	1,63	1,63	1,86	1,86	2,17	2,17
Kombination	1,11	1,16	1,35	1,35	1,52	1,48	1,73	1,64	2,02	1,85
Fließgelenke	1,03	1,14	1,26	1,26	1,41	1,34	1,61	1,43	1,88	1,54

Keine Unterschiede zwischen den beiden Methoden gibt es beim reinen Lochleibungsversagen. Der Sicherheitsbeiwert ist für den jeweiligen Modifikationsfaktor gleich.

Bei der zweiten Versagensart ist γ_s nicht konstant, liegt aber bei beiden Methoden zwischen der ersten und dritten Versagensart. Darum wurde hier der Mittelwert angegeben.

Beim reinen Stabdübelversagen liefert der EC 5 für Modifikationsfaktoren über 0,9 ein kleineres γ_s . Aber bei k_{mod} - Werten unter 0,9 hat die zweite Methode die kleineren „gesamten Teilsicherheitsbeiwerte“.

Der überwiegende Teil der Stabdübelverbindungen wird mit Modifikationsbeiwerten von 0,9 oder 1,1 zu rechnen sein. In diesem Bereich ist die Methode nach EC 5 im Vorteil gegenüber der zweiten Methode.

Für Modifikationsbeiwerte unter 0,9 kann es durchaus interessant sein, die Tragfähigkeit nach der zweiten Methode zu berechnen.

Für die weiteren zweischnittigen Verbindungen mit Stahlblechen gelten die gleichen „gesamten Teilsicherheitsbeiwerte“ wie für zweischnittige Holz-Holz-Verbindung.

5.4. Vergleichsrechnung Stabdübel

5.4.1. Zweischnittige Holz-Holz-Verbindung

Der folgende Vergleich stellt die Tragfähigkeit je eines Stabdübels einer zweischnittigen Verbindung aus Holz dar. Dabei wurden die einzelnen Stabdübeldurchmesser gegenübergestellt.

Als Eingangsparameter wurden $k_{\text{mod}} = 0,9$ (NKL 1, KLED kurz), Stahl der Güte S235 mit $f_{\text{uk}} = 360 \text{ N/mm}^2$ und Holz der Güte S10/C24 mit einer charakteristischen Rohdichte von $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$ gewählt.

Tragfähigkeit je eines Stabdübels

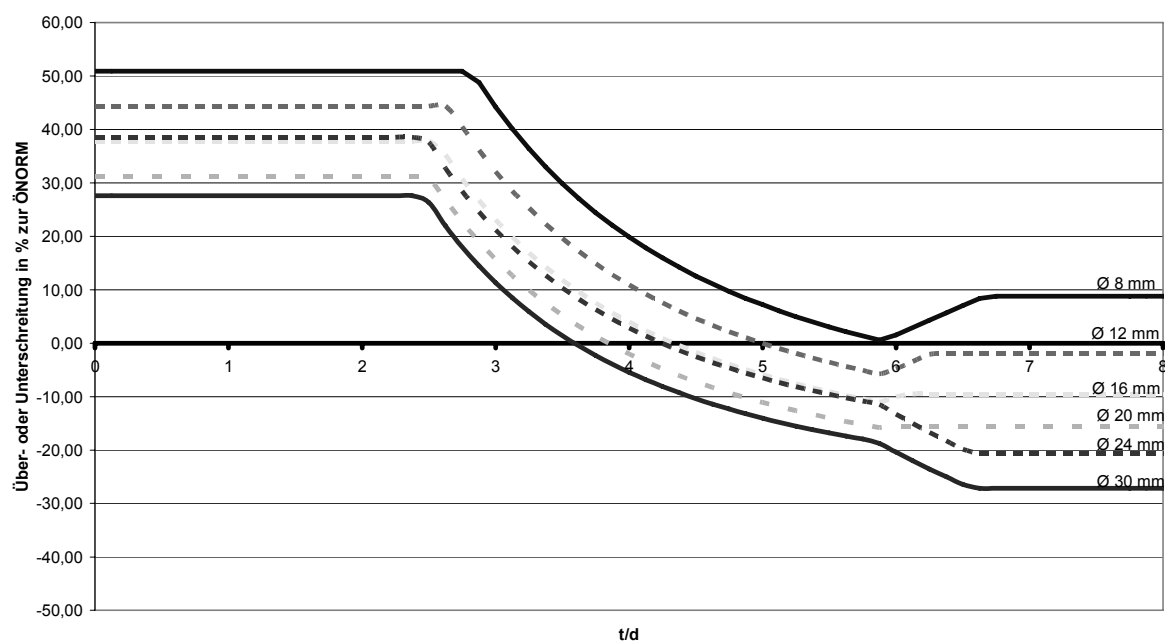


Abb. 31: Über- bzw. Unterschreitung der Tragfähigkeit je eines Stabdübels nach EC 5 im Vergleich zur Önorm

Die Abszisse stellt die Tragfähigkeit nach Önorm dar. Bei Überschreitungen weist die Berechnung nach EC 5 höhere, und bei Unterschreitung geringere Werte für die Tragfähigkeit auf.

Aus dem Diagramm geht deutlich hervor, dass der Eurocode kleinere Stabdübeldurchmesser bevorzugt. Während der Stabdübel mit einem Durchmesser von 8 mm über den Tragfähigkeitswerten der ÖNORM liegt, kann der Stabdübel mit einem Durchmesser von 30 mm die Werte der ÖNORM nur bei sehr geringen Holzdicken (Lochleibungsversagen)

überschreiten. Im Bereich des Versagensmechanismus 3 bleibt der Stabdübel mit Durchmesser 30 mm um mehr als 27 % hinter der ÖNORM zurück.

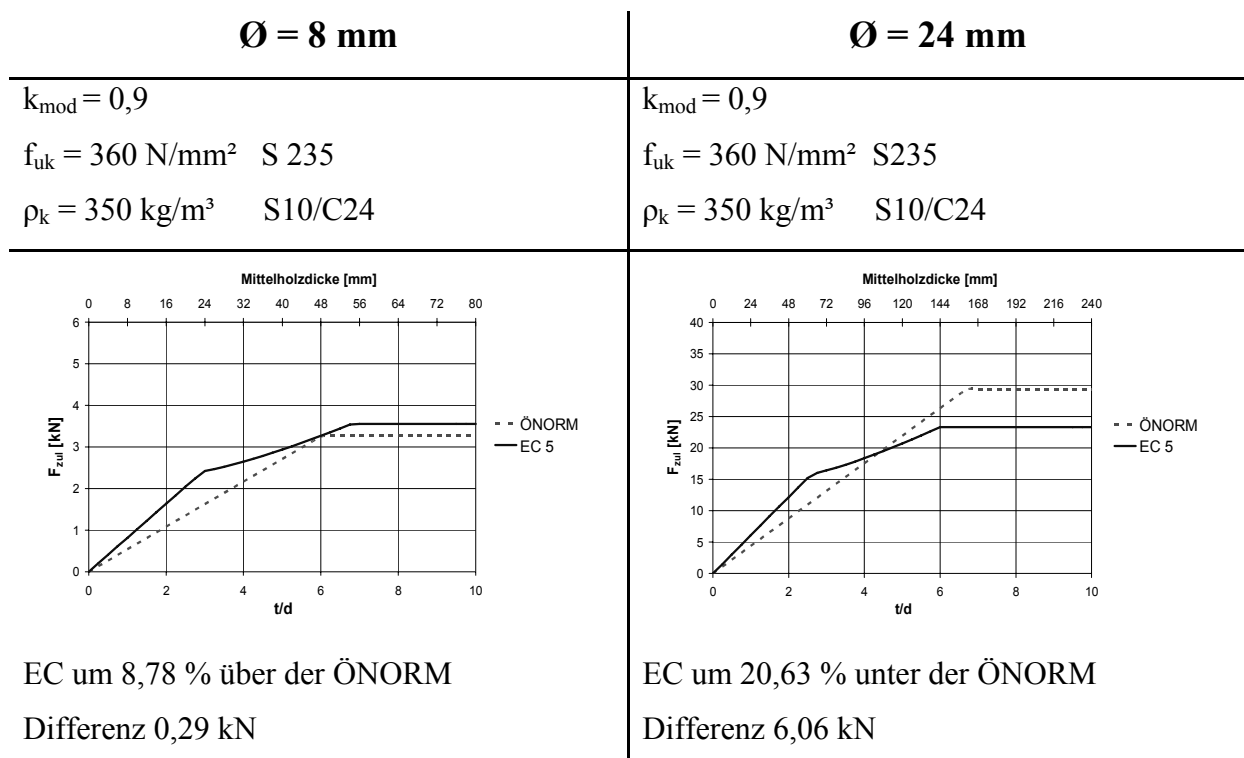
Zuerst wird die Tragfähigkeit je **eines** Stabdübels einer zweischnittigen Verbindung untersucht. Dabei sollen die unterschiedlichen Einflussfaktoren wie Holzgüte, Stahlgüte und Modifikationsbeiwert variiert werden.

Die zweischnittigen Holz-Holz-Verbindungen weisen jeweils die gleichen Holzgüten auf, also Hölzer gleicher Festigkeitsklasse. Die Untersuchung beschränkt sich auf Zugstöße, der Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung beträgt also 0° . Durch den Winkel von 0° und die gleichen Festigkeitsklassen ergibt sich das Verhältnis der Lochleibungsfestigkeiten β zu 1,00. Die Abmessungen der Bauteile werden bei konstant gehaltenem Stabdübeldurchmesser gesteigert. Die Schlankheit λ stellt das Verhältnis der Mittelholzdicke zum Stabdübeldurchmesser dar. Die Dicke eines Seitenholzes beträgt 77 % der Dicke des Mittelholzes.

Die Auswertung erfolgt für einen kleinen Durchmesser (8 mm) und einen großen Durchmesser (24 mm)

Für die anschließende Diskussion der Tragfähigkeiten wird jeweils die dritte Versagensart (Ausbildung von zwei Fließgelenken pro Scherfuge) herangezogen.

Tab. 27: Vergleich von zweischnittigen Holz-Holz-Verbindungen mit je einem Stabdübel unter einem Winkel $\alpha = 0^\circ$

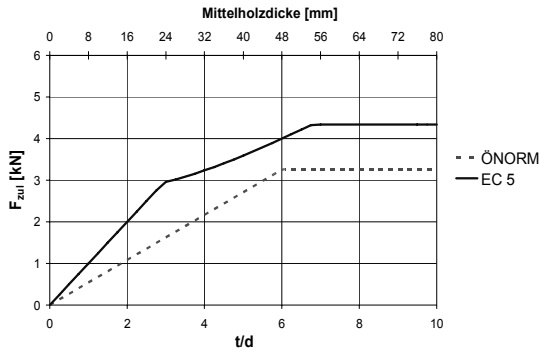


Als erstes wird der Modifikationsfaktor auf 1,10 gesteigert. Dies ist in den Nutzungsklassen 1 und 2 bei sehr kurzer Beanspruchung möglich. Unter sehr kurze Beanspruchungen kann man z.B.: Windböen einordnen.

$k_{mod} = 1,1$

$f_{uk} = 360 \text{ N/mm}^2$ S 235

$\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$ S10/C24



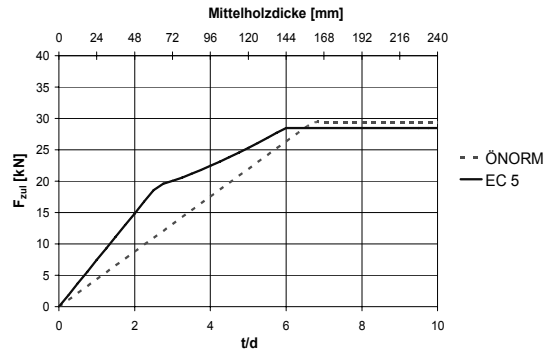
EC um 32,96 % über der ÖNORM

Differenz 1,08 kN

$k_{mod} = 1,1$

$f_{uk} = 360 \text{ N/mm}^2$ S 235

$\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$ S10/C24



EC um 2,99 % unter der ÖNORM

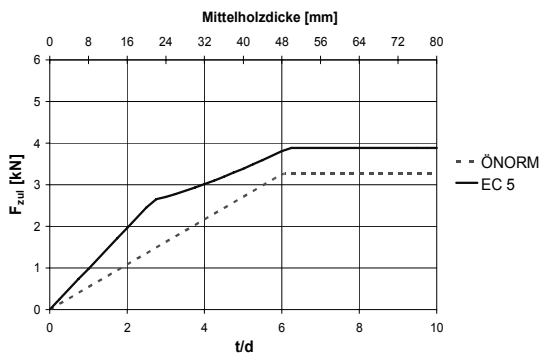
Differenz 0,88 kN

Nun erfolgt eine Steigerung der Festigkeitsklasse des Holzes von C24 auf C 40. Dies entspricht nach Önorm etwa einer Steigerung von S10 auf MS17.

$k_{mod} = 0,9$

$f_{uk} = 360 \text{ N/mm}^2$ S 235

$\rho_k = 420 \text{ kg/m}^3$ MS17/C40



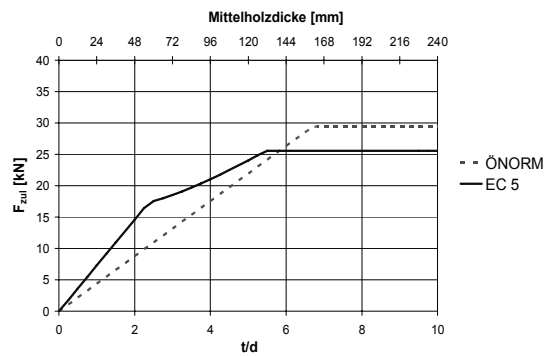
EC um 19,17 % über der ÖNORM

Differenz 0,63 kN

$k_{mod} = 0,9$

$f_{uk} = 360 \text{ N/mm}^2$ S 235

$\rho_k = 420 \text{ kg/m}^3$ MS17/C40



EC um 13,06 % unter der ÖNORM

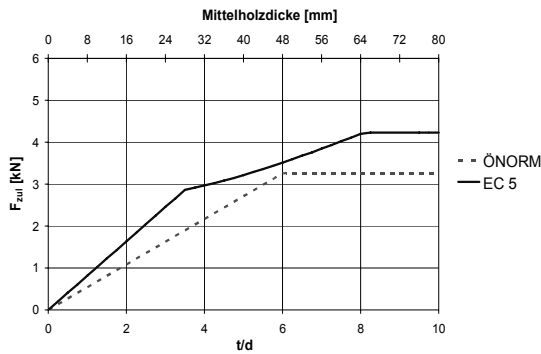
Differenz 3,84 kN

Die Stahlgüte der Stabdübel wird von S235 auf S 355 gesteigert.

$k_{mod} = 0,9$

$f_{uk} = 510 \text{ N/mm}^2$ S 355

$\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$ S10/C24

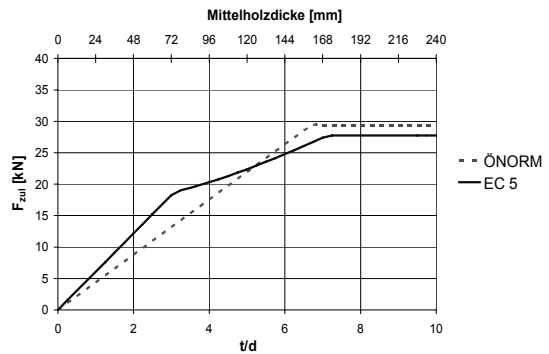


EC um 29,48 % über der ÖNORM
Differenz 0,96 kN

$k_{mod} = 0,9$

$f_{uk} = 510 \text{ N/mm}^2$ S 355

$\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$ S10/C24



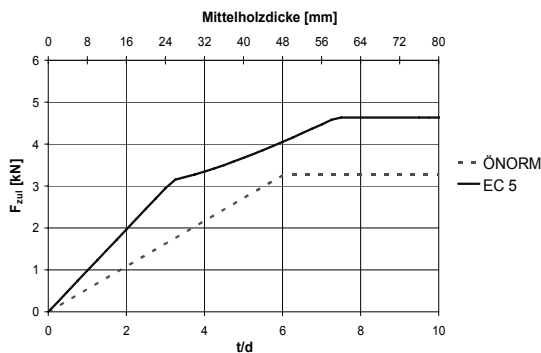
EC um 5,53 % unter der ÖNORM
Differenz 1,62 kN

Der folgende Vergleich zeigt die Auswirkungen der Kombination einer höheren Stahlgüte und einer besseren Festigkeitsklasse.

$k_{mod} = 0,9$

$f_{uk} = 510 \text{ N/mm}^2$ S 355

$\rho_k = 420 \text{ kg/m}^3$ MS17/C40

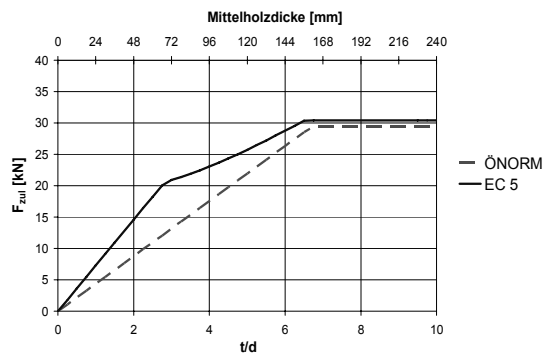


EC um 41,84 % über der ÖNORM
Differenz 1,37 kN

$k_{mod} = 0,9$

$f_{uk} = 510 \text{ N/mm}^2$ S 355

$\rho_k = 420 \text{ kg/m}^3$ MS17/C40



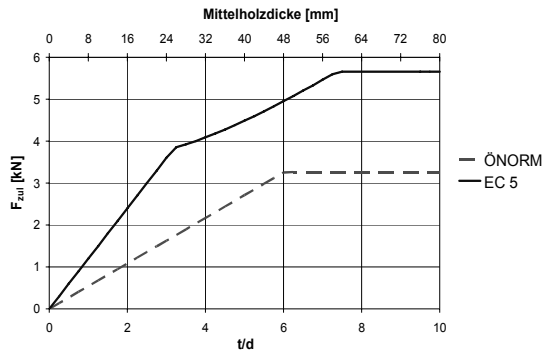
EC um 3,49 % über der ÖNORM
Differenz 1,02 kN

Zum Schluss wird für alle drei Eingangsparameter der erhöhte Wert angesetzt.

$$k_{\text{mod}} = 1,1$$

$$f_{\text{uk}} = 510 \text{ N/mm}^2 \quad \text{S 355}$$

$$\rho_k = 420 \text{ kg/m}^3 \quad \text{MS17/C40}$$



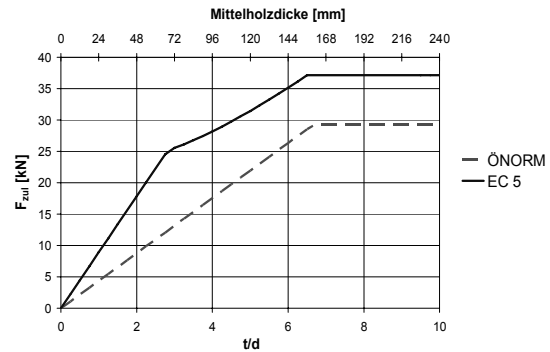
EC um 73,36 % über der ÖNORM

Differenz 2,39 kN

$$k_{\text{mod}} = 1,1$$

$$f_{\text{uk}} = 510 \text{ N/mm}^2 \quad \text{S 355}$$

$$\rho_k = 420 \text{ kg/m}^3 \quad \text{MS17/C40}$$



EC um 26,48 % über der ÖNORM

Differenz 7,78 kN

Die Tabelle zeigt folgendes:

- Stabdübel mit kleineren Durchmessern weisen im Vergleich zur ÖNORM eine wesentlich höhere Tragfähigkeit auf.
- während bei einem Stabdübel DN 8 mm die Tragfähigkeit der ÖNORM in jedem untersuchten Fall übertroffen wird, ist die bei DN 24 mm durch eine alleinige Anhebung der Stahlgüte oder der Holzgüte nicht möglich. Erst die Aufwertung beider Materialeigenschaften erhöht die Tragfähigkeit des Stabdübels bei Berechnung nach EC 5 über jene der ÖNORM.
- eine Veränderung der Parameter bringt auch eine Veränderung des Verhältnisses t/d ab dem der Versagensmechanismus 3 maßgebend wird
- auch für Stabdübel unterschiedlicher Durchmesser gilt jeweils ein anderes Verhältnis t/d ab dem die höchste Stufe der Tragfähigkeit erreicht wird.

Von den zur Auswahl stehenden Parametern, lässt sich die Stahlgüte am einfachsten ändern. Eine Änderung der Holzgüte ist möglich, wird aber im Vergleich zur Verwendung anderer Stähle erhebliche Mehrkosten verursachen.

Der Modifikationsfaktor k_{mod} ist durch die äußeren Einflüsse bestimmt und kann somit nicht zur Erhöhung der Tragfähigkeit verändert werden.

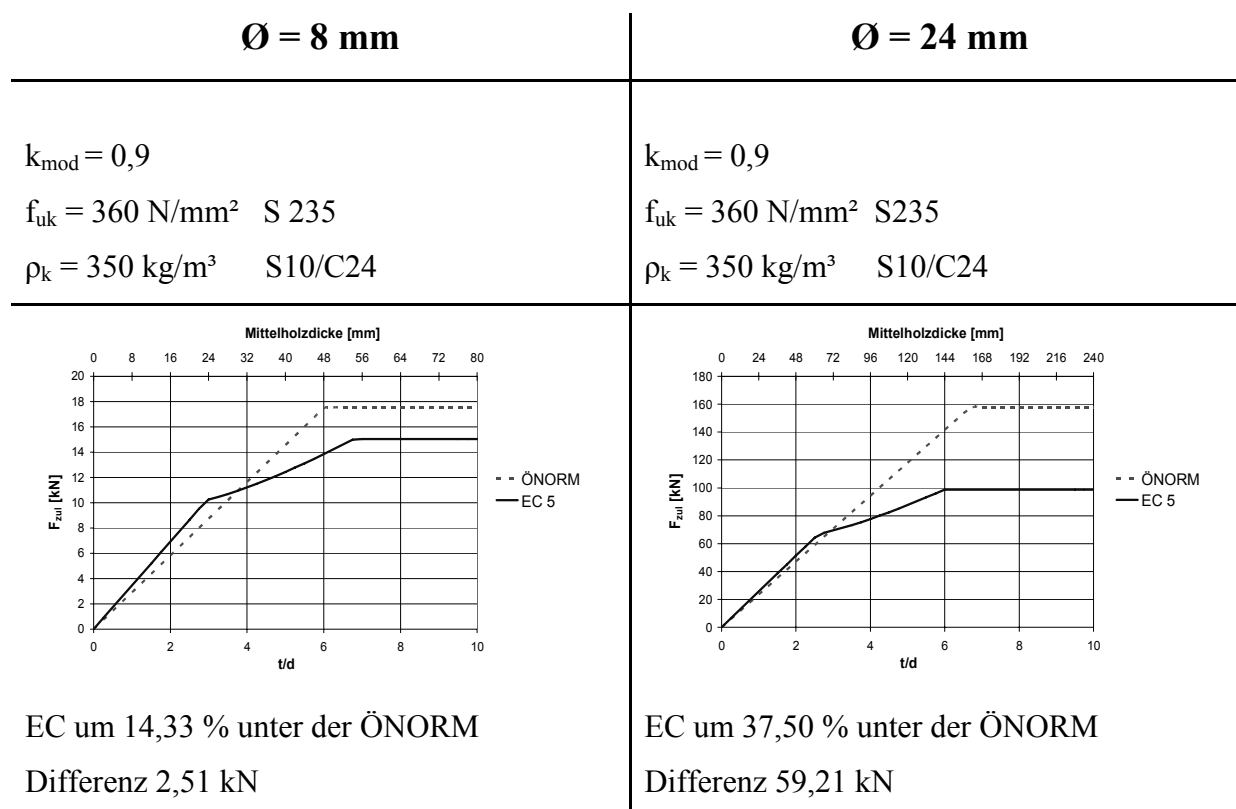
Für alle folgenden Vergleichsrechnungen wird jeweils die Grundkombination herangezogen und mit Stabdübeln der Güte S 355 verglichen.

Die Tatsache, dass sich das Verhältnis d/t mit der Änderung der Parameter bzw. des Durchmessers ändert, lässt eine Berechnung der Tragfähigkeit mit einer Tabelle ähnlich der ÖNORM B 4200-2 nicht zu.

Die vorangegangene Untersuchung berücksichtigte immer nur einen einzelnen Stabdübel. In einer Verbindung wirken aber mehrere Stabdübel zusammen.

Sind die Stabdübel in einer Reihe parallel zur Kraft- und Faserrichtung angeordnet muss eine Abminderung der wirksamen Anzahl der Stabdübel erfolgen. Für die folgende Vergleichsrechnung wird eine **Verbindung mit sechs Stabdübeln** angenommen (2 Reihen mit je 3 Stabdübeln in Faserrichtung hintereinander). Weiters werden unter den Verbindungsmitteln die Mindestabstände eingehalten um so die Kleinstwerte für die effektive Anzahl der wirksamen Stabdübel zu erhalten. Das Verhältnis der Lochleibungsfestigkeiten beträgt weiterhin 1,0 (gleiche Festigkeitsklasse der zu verbindenden Hölzer und ein Winkel von 0° zwischen Kraft- und Faserrichtung).

Tab. 28: Vergleich von zweischnittigen Holz-Holz-Verbindungen mit je sechs Stabdübeln unter einem Winkel $\alpha = 0^\circ$



$$k_{\text{mod}} = 0,9$$

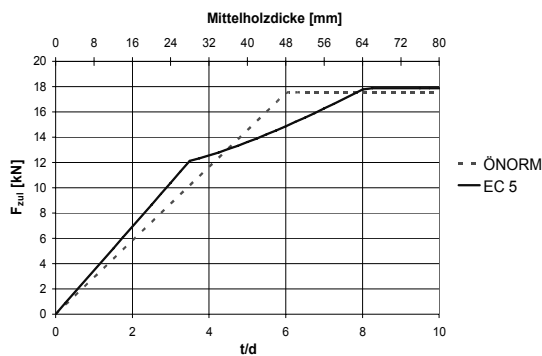
$$f_{\text{uk}} = 510 \text{ N/mm}^2 \quad \text{S 355}$$

$$\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3 \quad \text{S10/C24}$$

$$k_{\text{mod}} = 0,9$$

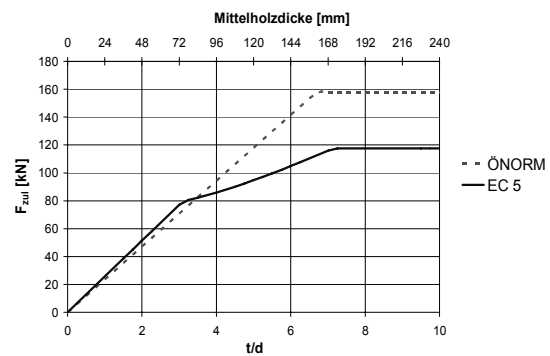
$$f_{\text{uk}} = 510 \text{ N/mm}^2 \quad \text{S 235}$$

$$\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3 \quad \text{S10/C24}$$



EC um 1,97 % über der ÖNORM

Differenz 0,34 kN



EC um 25,61 % unter der ÖNORM

Differenz 40,43 kN

Da die effektive Anzahl der wirksamen Stabdübel im EC 5 wesentlich mehr abgemindert wird als in der Önorm, fallen die übertragbaren Kräfte zum Teil erheblich unter die Werte der Önorm. Dieser Effekt tritt vor allem bei größeren Durchmessern auf. Wie die Tabelle zeigt, liegt eine Verbindung mit sechs Stabdübeln bei der Tragfähigkeit um 59,21 kN hinter der ÖNORM zurück.

Eine Erhöhung der Tragfähigkeit nach EC 5 kann man nun erzielen indem man die Abstände der Verbindungsmittel in Faserrichtung erhöht. Der für die Berechnung angenommene Mindestabstand von 5d muss zum Erreichen der vollen Tragfähigkeit auf 13d gesteigert werden. Es ist jedoch zu bedenken, dass diese Verbindung dann viel Platz verbraucht und den Holzbedarf erheblich steigert.

Eine Andere Möglichkeit die Tragfähigkeit zu steigern, ist es Querszugverstärkungen, wie zum Beispiel eingeklebte Gewindestangen, einzubauen.

Anschlüsse unter einem Winkel von 90°

Die Önorm sieht vor, dass bei Stabdübeln mit einem Durchmesser größer 10 mm die zulässigen Übertragungskräfte bei Kraftangriffen schräg zur Faser abzumindern sind.

Im EC 5 wird diese Abminderung für alle Durchmesser bereits bei der Ermittlung der Lochleibungsfestigkeit vorgenommen.

Für beide Normen gilt, dass bei Kraftangriff unter einem Winkel von 90° mit der tatsächlichen Anzahl der Verbindungsmittel zu rechnen ist. Für Winkel zwischen 0° und 90° ist die Anzahl der wirksamen Stabdübel zu interpolieren.

Tab. 29: Vergleich von zweischichtigen Holz-Holz-Verbindungen mit je einem Stabdübel unter einem Winkel $\alpha = 90^\circ$

$\varnothing = 8 \text{ mm}$	$\varnothing = 24 \text{ mm}$
<p>$k_{\text{mod}} = 0,9$ $f_{\text{uk}} = 360 \text{ N/mm}^2 \text{ S 235}$ $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3 \text{ S10/C24}$</p>	<p>$k_{\text{mod}} = 0,9$ $f_{\text{uk}} = 360 \text{ N/mm}^2 \text{ S235}$ $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3 \text{ S10/C24}$</p>
<p>EC um 19,26 % unter der ÖNORM Differenz 0,63 kN</p>	<p>EC um 30,48 % unter der ÖNORM Differenz 6,71 kN</p>
<p>$k_{\text{mod}} = 0,9$ $f_{\text{uk}} = 510 \text{ N/mm}^2 \text{ S 355}$ $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3 \text{ S10/C24}$</p>	<p>$k_{\text{mod}} = 0,9$ $f_{\text{uk}} = 510 \text{ N/mm}^2 \text{ S 355}$ $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3 \text{ S10/C24}$</p>
<p>EC um 3,90 % unter der ÖNORM Differenz 0,13 kN</p>	<p>EC um 17,25 % unter der ÖNORM Differenz 3,80 kN</p>

Unter einem Winkel von 90° kann der EC 5 die Tragfähigkeit der ÖNORM in den durchgeführten Untersuchungen nicht mehr erreichen.

5.4.2. Zweischnittige Stahl-Holz-Verbindung (Stahlblech in der Mitte)

Hier gibt es keine Unterscheidung in dünnes oder dickes Stahlblech, da ein Stahlblech jeder Dicke als Mittelteil einer Zweischnittigen Verbindung ein Fließgelenk im Stabdübel hervorruft. Zuerst wird die Tragfähigkeit je **eines** Stabdübels einer zweischnittigen Verbindung untersucht. Die Auswertung erfolgt für einen kleinen Durchmesser (8 mm) und einen großen Durchmesser (24 mm). Ansonsten gelten die gleichen Annahmen wie bei den zweischnittigen Holz-Holz-Verbindungen.

Für die anschließende Diskussion der Tragfähigkeiten wird jeweils die dritte Versagensart (Ausbildung von vier Fließgelenken) herangezogen.

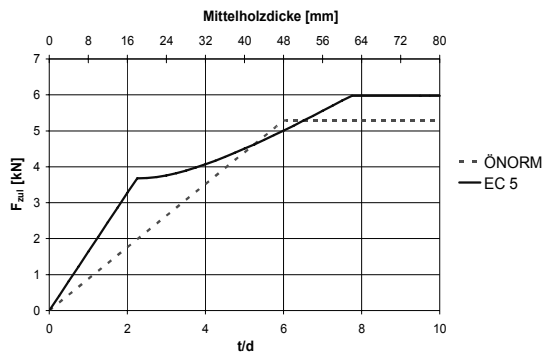
Tab. 30: Vergleich von zweischnittigen Stahl-Holz-Verbindungen (Stahlblech in der Mitte) mit je einem Stabdübel unter einem Winkel $\alpha = 0^\circ$

$\varnothing = 8 \text{ mm}$	$\varnothing = 24 \text{ mm}$
$k_{\text{mod}} = 0,9$ $f_{\text{uk}} = 360 \text{ N/mm}^2$ S 235 $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$ S10/C24	$k_{\text{mod}} = 0,9$ $f_{\text{uk}} = 360 \text{ N/mm}^2$ S235 $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$ S10/C24
EC um 4,90% unter der ÖNORM Differenz 0,26 kN	EC um 30,61 % unter der ÖNORM Differenz 14,55 kN

$$k_{\text{mod}} = 0,9$$

$$f_{\text{uk}} = 510 \text{ N/mm}^2 \quad \text{S 355}$$

$$\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3 \quad \text{S10/C24}$$



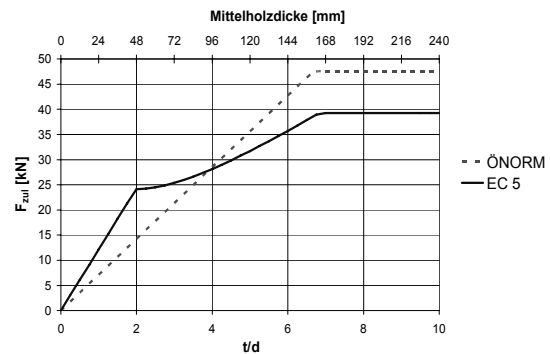
EC um 13,20 % über der ÖNORM

Differenz 0,70 kN

$$k_{\text{mod}} = 0,9$$

$$f_{\text{uk}} = 510 \text{ N/mm}^2 \quad \text{S 355}$$

$$\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3 \quad \text{S10/C24}$$



EC um 17,41 % unter der ÖNORM

Differenz 8,27 kN

Die Holzbauteile werden in dieser Art der Verbindung als Seitenhölzer gerechnet. Da der EC 5 mit dem Schiefstellen des Stabdübels eine zusätzliche Versagensform einführt, wird das Seitenholz gegenüber der Önorm "abgewertet". Dadurch liegt im vorangegangenen Vergleich lediglich der Stabdübel mit einem Durchmesser von 8 mm und der auf S 355 erhöhten Stahlgüte über den Tragfähigkeitswerten der Önorm.

Die folgende Untersuchung wird für Anschlüsse unter einem Winkel von 90° mit mittigem Stahlblech geführt.

Tab. 31: Vergleich von zweischnittigen Stahl-Holz-Verbindungen (Stahlblech in der Mitte) mit je einem Stabdübel unter einem Winkel $\alpha = 90^\circ$

$\varnothing = 8 \text{ mm}$	$\varnothing = 24 \text{ mm}$
$k_{\text{mod}} = 0,9$ $f_{\text{uk}} = 360 \text{ N/mm}^2$ S 235 $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$ S10/C24	$k_{\text{mod}} = 0,9$ $f_{\text{uk}} = 360 \text{ N/mm}^2$ S235 $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$ S10/C24
EC um 21,56 % unter der ÖNORM Differenz 1,14 kN	EC um 29,25% unter der ÖNORM Differenz 10,42 kN
$k_{\text{mod}} = 0,9$ $f_{\text{uk}} = 510 \text{ N/mm}^2$ S 355 $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$ S10/C24	$k_{\text{mod}} = 0,9$ $f_{\text{uk}} = 510 \text{ N/mm}^2$ S 355 $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$ S10/C24
EC um 6,64% unter der ÖNORM Differenz 0,35 kN	EC um 15,79 % unter der ÖNORM Differenz 5,63 kN

Bei Anschlüssen unter 90° liegt die Tragfähigkeit in den durchgeführten Untersuchungen immer über jener des EC 5. Hier fällt auf, dass kleine Durchmesser im Vergleich zur Önorm an Tragfähigkeit verlieren, und große Durchmesser die Differenz verringern können.

Um den Rahmen der Vergleichsrechnungen nicht zu sprengen, wird auf den Vergleich von mehreren Stabdübeln verzichtet. Da sich an der Berechnung nichts ändert, ist der EC 5 auch hier gegenüber der Önorm im Nachteil. Es ist also ratsam Maßnahmen zur Erhöhung der effektiven Verbindungsmittellanzahl zu treffen.

5.4.3. Zweischnittige Stahl-Holz-Verbindung (dünnem Stahlblech seitlich)

Bei zweischnittigen Holz-Stahlblech-Verbindungen mit innen liegenden Hölzern und seitlich anliegenden Stahlblechen, wird unterschieden in dünne und dicke Stahlbleche. Dünne Stahlbleche liegen vor, wenn das Blech maximal die Dicke des halben Stabdübeldurchmessers erreicht ($t/d \leq 0,5$).

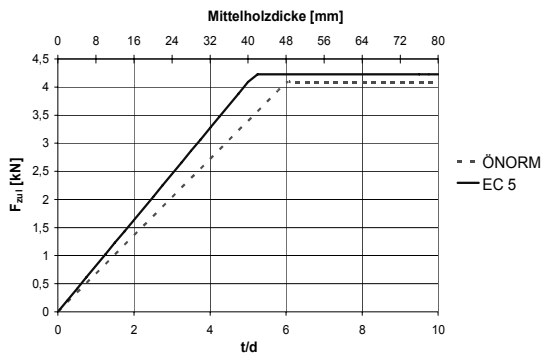
Diese Verbindung ist auf jeden Fall durch zusätzliche Verbindungsmittel mit Klemmwirkung zu sichern. Es können statt Stabdübeln auch Passbolzen verwendet werden. Für den folgenden Vergleich werden nur Stabdübel verwendet, um auch Vergleiche zu den anderen Verbindungsarten herstellen zu können.

Tab. 32: Vergleich von zweischnittigen Stahl-Holz-Verbindungen (dünnem Stahlblech seitlich) mit je einem Stabdübel unter einem Winkel $\alpha = 0^\circ$

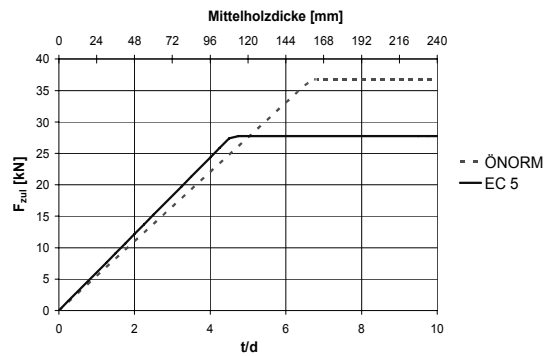
$\varnothing = 8 \text{ mm}$	$\varnothing = 24 \text{ mm}$
$k_{\text{mod}} = 0,9$	$k_{\text{mod}} = 0,9$
$f_{\text{uk}} = 360 \text{ N/mm}^2$ S 235	$f_{\text{uk}} = 360 \text{ N/mm}^2$ S 235
$\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$ S10/C24	$\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$ S10/C24
EC um 12,97 % unter der ÖNORM Differenz 0,53 kN	EC um 36,50 % unter der ÖNORM Differenz 13,40 kN

$k_{mod} = 0,9$
 $f_{uk} = 510 \text{ N/mm}^2$ S 355
 $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$ S10/C24

$k_{mod} = 0,9$
 $f_{uk} = 510 \text{ N/mm}^2$ S 355
 $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$ S10/C24



EC um 3,58% über der ÖNORM
 Differenz 0,15 kN



EC um 24,43 % unter der ÖNORM
 Differenz 8,97 kN

Wieder kann lediglich der kleine Durchmesser mit erhöhter Stahlgüte die Tragfähigkeit der Önorm übertreffen.

Die folgende Untersuchung wird für Anschlüsse unter einem Winkel von 90° mit seitlichen dünnen Stahlblechen geführt. Für eine ausreichende Klemmwirkung ist zu sorgen.

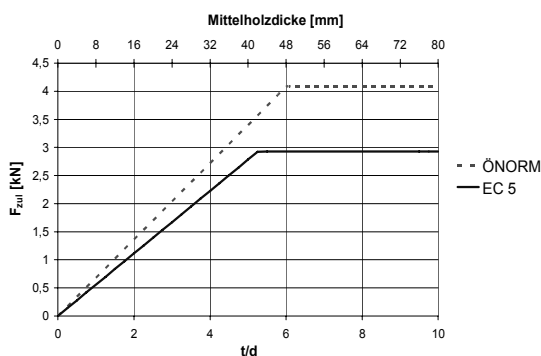
Tab. 33: Vergleich von zweischnittigen Stahl-Holz-Verbindungen (dünnem Stahlblech seitlich) mit je einem Stabdübel unter einem Winkel $\alpha = 90^\circ$

Ø = 8 mm

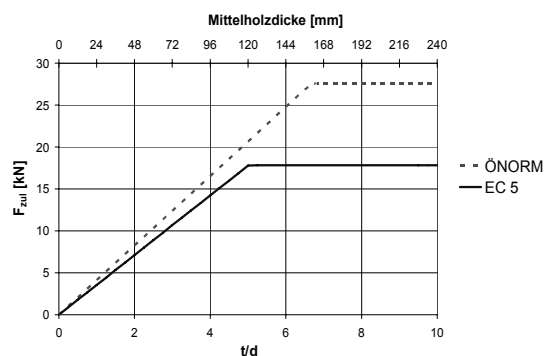
Ø = 24 mm

$k_{mod} = 0,9$
 $f_{uk} = 360 \text{ N/mm}^2$ S 235
 $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$ S10/C24

$k_{mod} = 0,9$
 $f_{uk} = 360 \text{ N/mm}^2$ S235
 $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$ S10/C24



EC um 28,22 % unter der ÖNORM
 Differenz 1,15 kN

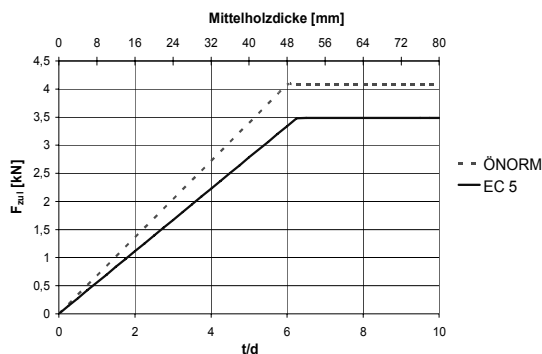


EC um 35,26 % unter der ÖNORM
 Differenz 9,71 kN

$$k_{\text{mod}} = 0,9$$

$$f_{\text{uk}} = 510 \text{ N/mm}^2 \quad \text{S 355}$$

$$\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3 \quad \text{S10/C24}$$

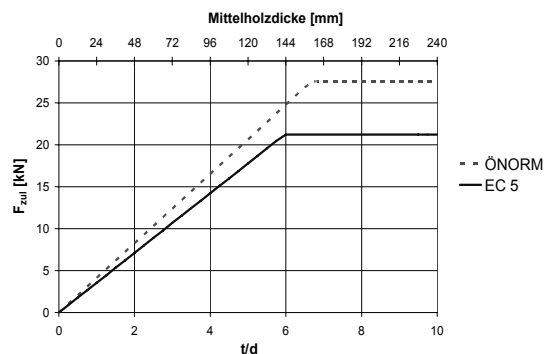


EC um 14,57 % unter der ÖNORM
Differenz 0,81 kN

$$k_{\text{mod}} = 0,9$$

$$f_{\text{uk}} = 510 \text{ N/mm}^2 \quad \text{S 355}$$

$$\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3 \quad \text{S10/C24}$$



EC um 22,94 % unter der ÖNORM
Differenz 6,32 kN

Bei Anschlüssen unter 90° liegt die Tragfähigkeit des EC 5 in den untersuchten Fällen immer unter jener der Önorm. Wie schon beim mittigen Stahlblech kann der große Stabdübeldurchmesser im Vergleich zum Anschluss unter 0° die Differenz zur Önorm verringern. Der kleine Stabdübeldurchmesser verliert in diesem Vergleich zwar an Boden, liegt aber an der Differenz in Prozenten gemessen vor dem großen Durchmesser.

5.4.4. Zweischnittige Stahl-Holz-Verbindung (dickes Stahlblech seitlich)

Dicke Bleche sind gleich dick oder dicker als der Durchmesser des Stabdübels ($t/d \geq 1$).

In beiden Fällen darf die Toleranz der Lochdurchmesser maximal $0,1d$ betragen.

Die Werte zwischen dünnen und dicken Blechen sind durch geradlinige Interpolation zu bestimmen.

Zuerst wird die Tragfähigkeit je **eines** Stabdübels einer zweischnittigen Verbindung untersucht. Die Auswertung erfolgt für einen kleinen Durchmesser (8 mm) und einen großen Durchmesser (24 mm).

Für eine ausreichende Klemmwirkung ist auch hier zu sorgen.

Für die anschließende Diskussion der Tragfähigkeiten wird jeweils die dritte Versagensart (Ausbildung von vier Fließgelenken) herangezogen.

Tab. 34: Vergleich von zweischnittigen Stahl-Holz-Verbindungen (dickes Stahlblech seitlich) mit je einem Stabdübel unter einem Winkel $\alpha = 0^\circ$

$\varnothing = 8 \text{ mm}$	$\varnothing = 24 \text{ mm}$
$k_{\text{mod}} = 0,9$ $f_{\text{uk}} = 360 \text{ N/mm}^2$ S 235 $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$ S10/C24	$k_{\text{mod}} = 0,9$ $f_{\text{uk}} = 360 \text{ N/mm}^2$ S235 $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$ S10/C24
EC um 23,07 % über der ÖNORM Differenz 0,94 kN	EC um 10,20 % unter der ÖNORM Differenz 3,75 kN
$k_{\text{mod}} = 0,9$ $f_{\text{uk}} = 510 \text{ N/mm}^2$ S 355 $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$ S10/C24	$k_{\text{mod}} = 0,9$ $f_{\text{uk}} = 510 \text{ N/mm}^2$ S 355 $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$ S10/C24
EC um 46,49 % über der ÖNORM Differenz 1,90 kN	EC um 6,88 % über der ÖNORM Differenz 2,52 kN

Bei dieser Art der Verbindung übertrifft der EC 5 die Tragfähigkeitswerte der Önorm teilweise erheblich. Auch bei großen Durchmessern kann die Tragfähigkeit der Önorm, allerdings nur mit erhöhter Stahlgüte, übertroffen werden.

Die zweischnittigen Stahl-Holz-Verbindungen sind also die einzigen untersuchten, welche die Önorm in solchem Ausmaß erreichen und auch übertreffen.

Die folgende Untersuchung wird für Anschlüsse unter einem Winkel von 90° mit seitlichen dünnen Stahlblechen geführt. Für eine ausreichende Klemmwirkung ist zu sorgen.

Tab. 35: Vergleich von zweischnittigen Stahl-Holz-Verbindungen (dickes Stahlblech seitlich) mit je einem Stabdübel unter einem Winkel $\alpha = 90^\circ$

$\varnothing = 8 \text{ mm}$	$\varnothing = 24 \text{ mm}$
$k_{\text{mod}} = 0,9$ $f_{\text{uk}} = 360 \text{ N/mm}^2$ S 235 $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$ S10/C24	$k_{\text{mod}} = 0,9$ $f_{\text{uk}} = 360 \text{ N/mm}^2$ S235 $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$ S10/C24
EC um 1,51 % über der ÖNORM Differenz 0,06 kN	EC um 8,44 % unter der ÖNORM Differenz 2,32 kN
$k_{\text{mod}} = 0,9$ $f_{\text{uk}} = 510 \text{ N/mm}^2$ S 355 $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$ S10/C24	$k_{\text{mod}} = 0,9$ $f_{\text{uk}} = 510 \text{ N/mm}^2$ S 355 $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$ S10/C24
EC um 20,82 % über der ÖNORM Differenz 0,85 kN	EC um 8,98 % über der ÖNORM Differenz 2,47 kN

Auch bei Anschlüssen unter einem Winkel von 90° wird die Tragfähigkeit nach Önorm bei Berechnung nach EC 5 oft erreicht und auch überschritten.

5.5. Wirtschaftlichkeit

Auch die Wirtschaftlichkeit von Verbindungen ist bei der Wahl der Verbindungsmittel zu berücksichtigen.

Neben den Kosten für das Verbindungsmittel selbst fallen natürlich auch Kosten für die Herstellung der Verbindung an. Einige Punkte die zu einer Reduktion der Herstellkosten beitragen können sind:

- Wenige unterschiedliche Verbindungsmittel verwenden
- Verbindungen möglichst gleich ausführen
- Standardisierte Verbindungsmittelsysteme statt Sonderlösungen
- Gleiche Stahlblechdicken, Dübeldurchmesser..... verwenden

Auf der Baustelle werden dadurch die erforderlichen Verbindungsmittel überschaubarer.

6. Möller-Diagramme

Die teils umfangreichen Formeln des EC 5 können grafisch aufbereitet werden. Wolfgang Weber [9] zeigt in seiner Arbeit ein sogenanntes Möller-Diagramm. T. Möller hat als erster die Formeln von Johansen grafisch, in den nach ihm benannten Diagrammen, dargestellt.

Mit Hilfe der Möller Diagramme kann man mit wenigen Eingangsparametern sofort erkennen welche Versagensart vorliegt.

Da die Diagramme die Beiwerte des EC 5 noch nicht berücksichtigen, wurden diese für die vorliegende Arbeit modifiziert. Des Weiteren wurden auch unterschiedliche Verhältnisse der Lochleibungsfestigkeiten berücksichtigt ($\beta > 1$, bzw. $\beta < 1$).

6.1. Zweischnittige Holz-Holz-Verbindungen

Unter Zuhilfenahme zweier Parameter k_M^* und k_M kann die maßgebliche Versagensart sofort aus dem Diagramm abgelesen werden, wobei

$$k_M^* = \frac{k_M \cdot t_2}{t_1} \quad \text{und} \quad k_m = \frac{t_1}{\sqrt{\frac{M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d}}} \quad \text{sind. Weiters gilt } \beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}}.$$

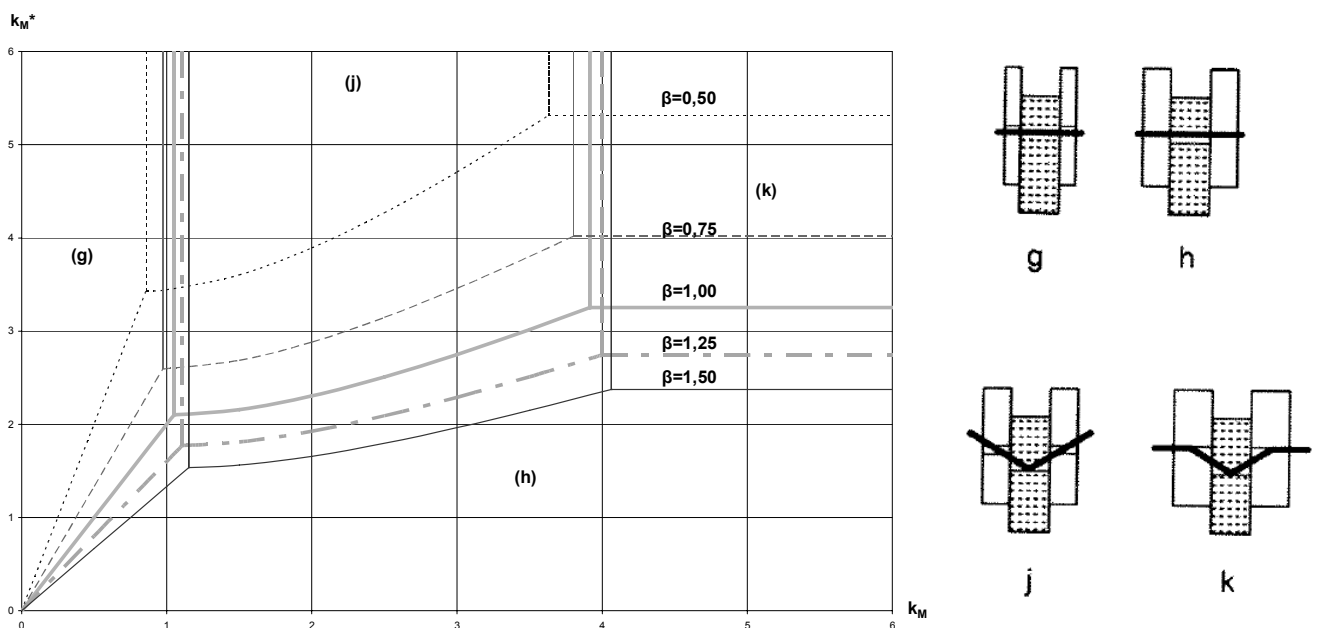


Abb. 32: modifiziertes Möller-Diagramm für zweischnittige Holz-Holz-Verbindungen

Die Formeln für die verschiedenen Versagensarten werden folgendermaßen adaptiert:

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{ll} f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d & \text{g) (110)} \\ 0,5 \cdot f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d & \text{h) (111)} \\ 1,05 \cdot \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \cdot \left[\sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta)}{k_M^2}} - \beta \right] & \text{j) (112)} \\ 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \frac{\sqrt{2}}{k_M^2} \cdot f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d & \text{k) (113)} \end{array} \right.$$

Die ersten beiden Versagensarten g) und h) nach den Gleichungen (110) und (111), sie beschreiben das reine Lochleibungsversagen, können einfach durch einsetzen in die obigen Formeln berechnet werden.

Die Versagensarten j) und k) nach den Gleichungen (112) und (113) können entweder ebenfalls durch einsetzen in die Formeln berechnet werden oder mit den folgenden Diagrammen bestimmt werden.

Der schon für das modifizierte Möller-Diagramm benötigte Parameter k_M wird auf der Abszisse aufgetragen und mit der Kurve des passenden β -Wertes geschnitten. Danach kann man an der Ordinate den Tragfähigkeitsfaktor k_R ablesen.

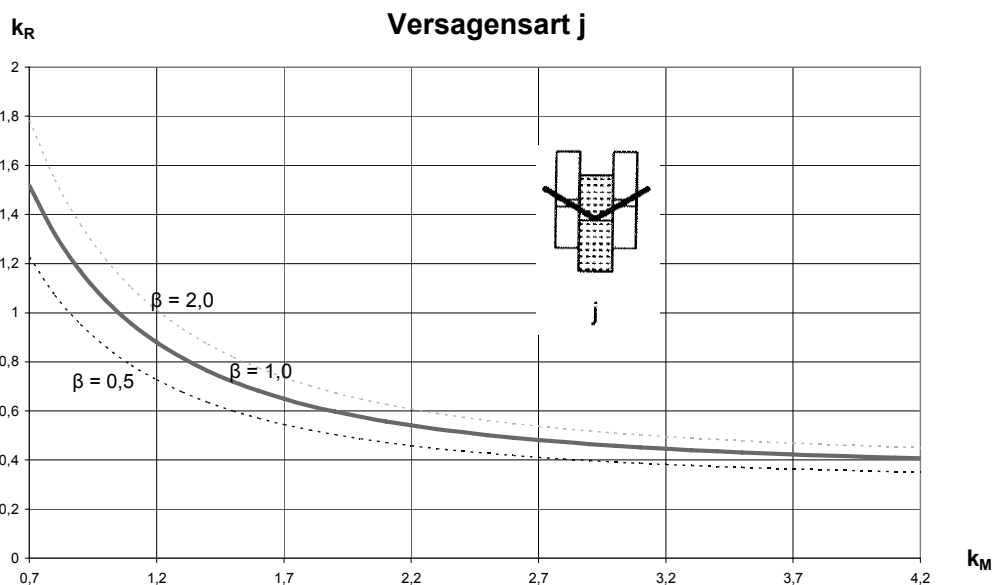


Abb. 33: Diagramm zur Bestimmung des Tragfähigkeitsfaktors - Versagensart j)

Die Tragfähigkeit einer Scherfuge welche der Versagensart j unterliegt ergibt sich zu

$$F_{v,Rk} = k_R \cdot f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d \quad (114)$$

Für die Versagensart k) wird auf die gleiche Weise wie bei der Versagensart j) vorgegangen.

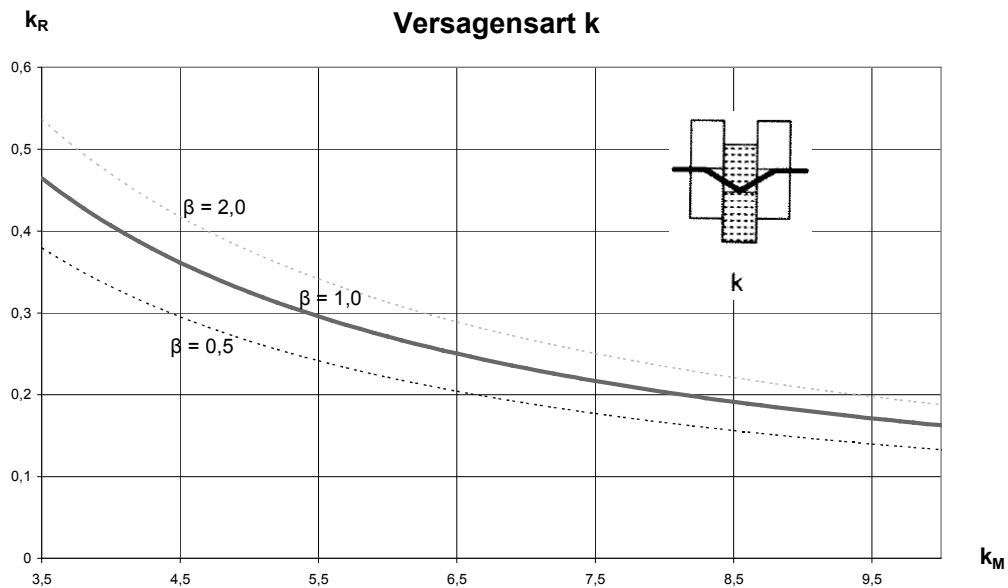


Abb. 34: Diagramm zur Bestimmung des Tragfähigkeitsfaktors - Versagensart j)

Die Tragfähigkeit einer Scherfuge welche der Versagensart k unterliegt ergibt sich zu

$$F_{v,Rk} = k_R \cdot f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d \quad (115)$$

6.2. Zweischnittige Stahlblech-Holz-Verbindungen

6.2.1. Innen liegendes Stahlblech

Bei zweischnittigen Verbindungen mit innen liegendem Stahlblech erfolgt keine Unterscheidung in dünne und dicke Bleche. Die Ermittlung der maßgebenden Versagensart und

der Tragfähigkeit kann mit Hilfe des Beiwertes $k_M = \frac{t_1}{\sqrt{\frac{M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d}}}$ und der nachfolgenden

Tabelle erfolgen.

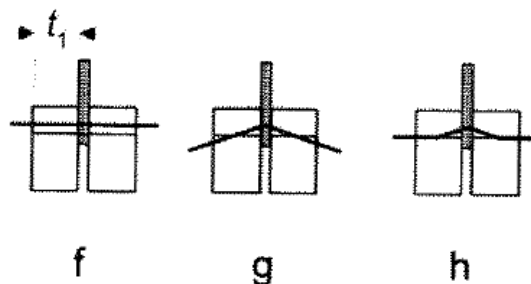


Abb. 35: Versagensarten bei mittigem Stahlblech nach EC 5 [1]

Tab. 36: Ermittlung von $F_{v,Rk}$ von zweischnittigen Verbindungen mit mittigem Stahlblech

Versagensart	Bedingung	charakteristische Tragfähigkeit pro Scherfuge
(f)	$k_M \leq 1,41$	$F_{v,Rk} = f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d$
(g)	$1,41 < k_M < 4,87$	$F_{v,Rk} = f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d \cdot \left[\sqrt{2 + \frac{4}{k_M^2}} - 1 \right]$
(h)	$k_M \geq 4,87$	$F_{v,Rk} = \frac{2,3}{k_M} \cdot f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d$

Über den Beiwert k_M lässt sich sofort die Versagensart bestimmen. Danach kann man sofort in die Formeln einsetzen und die charakteristische Tragfähigkeit pro Scherfuge ermitteln.

6.2.2. Außen liegendes Stahlblech

Unter Zuhilfenahme zweier Parameter t/d und k_M kann die maßgebliche Versagensart sofort aus dem Diagramm abgelesen werden.

$$k_m = \frac{t_1}{\sqrt{\frac{M_{y,Rk}}{f_{h,2,k} \cdot d}}}$$

Das Diagramm gilt für dünne und dicke Stahlbleche. Bei Blechen bei denen das Verhältnis t/d zwischen 0,5 und 1,0 liegt, ist die Tragfähigkeit mittels linearer Interpolation zwischen den Tragfähigkeiten von dünnen und dicken Blechen zu ermitteln.

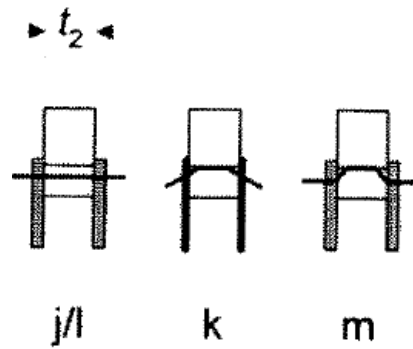


Abb. 36: Versagensarten bei außen liegendem Stahlblech nach EC 5 [1]

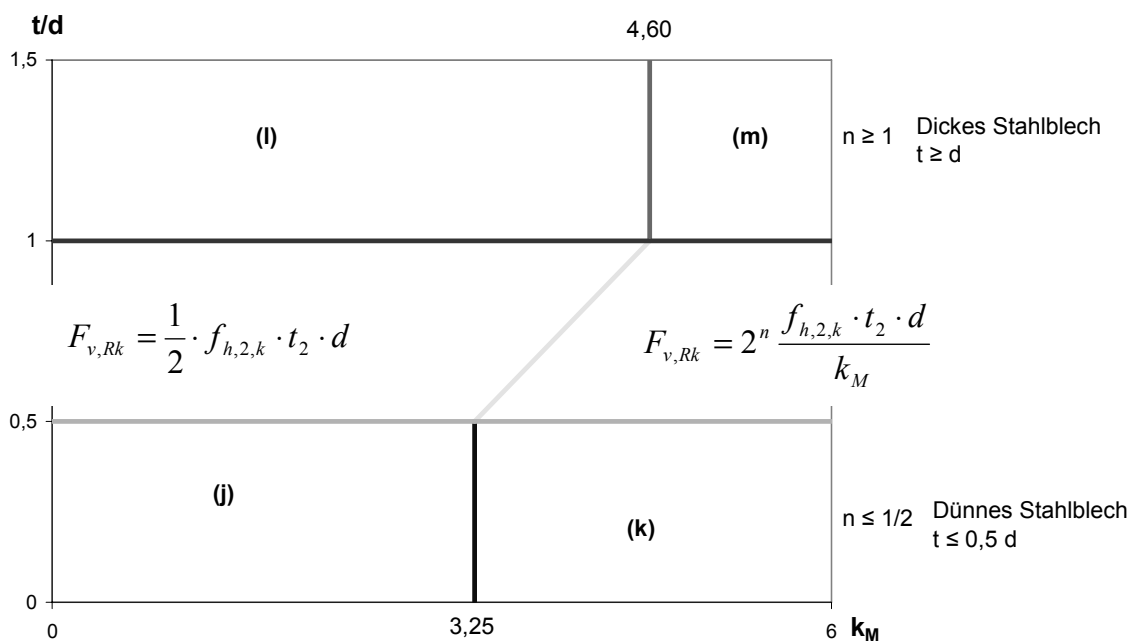


Abb. 37: Diagramm zur Bestimmung der Maßgebenden Versagensart

Für dünne Stahlbleche ergeben sich die Formeln zu

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,5 \cdot f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d \\ 1,15 \cdot \frac{\sqrt{2}}{k_M} \cdot f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d \end{array} \right. \quad (116)$$

(117)

Für dicke Stahlbleche ergeben sich die Formeln zu

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,5 \cdot f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d \\ \frac{2,3}{k_M} \cdot f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d \end{array} \right. \quad (118)$$

(119)

7. Mindestholzdicken

7.1. DIN 1052

In der DIN 1052 – Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken [10] wird eine Vereinfachte Form der Ermittlung der Tragfähigkeit der pro Scherfläche angegeben.

Es wird hier von der größtmöglichen Tragfähigkeit, der Ausbildung der Fließgelenkkette, ausgegangen.

Die charakteristische Tragfähigkeit pro Scherfläche ist folgendermaßen angegeben:

$$R_k = \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d} \quad (120)$$

Hier wird auf den Faktor 1,15 welcher in den Formeln des EC 5 zu den Gleichungen von Johansen hinzugefügt wurde verzichtet.

Diese Tragfähigkeit wird jedoch nur bei ausreichenden Dicken der zu verbindenden Bauteile erreicht. Deshalb werden für die zu verbindenden Hölzer Mindestdicken gefordert.

Für das Seitenholz gilt:

$$t_{1,req} = 1,15 \cdot \left(2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} + 2 \right) \cdot \sqrt{\frac{M_{y,k}}{f_{h,1,k} \cdot d}} \quad (121)$$

Für das Mittelholz gilt:

$$t_{2,req} = 1,15 \cdot \left(\frac{4}{\sqrt{1 + \beta}} \right) \cdot \sqrt{\frac{M_{y,k}}{f_{h,2,k} \cdot d}} \quad (122)$$

Die Mindestholzdicken werden mit dem Faktor 1,15 versehen.

Werden diese Mindestholzdicken nicht erreicht, darf der charakteristische Wert der Tragfähigkeit R_k ermittelt werden indem man R_k nach Gleichung (116) mit dem kleineren der Verhältniswerte

$$\frac{t_1}{t_{1,req}} \text{ und } \frac{t_2}{t_{2,req}} \quad (123)$$

multipliziert.

Der Bemessungswert der Tragfähigkeit berechnet sich mit dem Teilsicherheitsbeiwert γ_M und dem Modifikationsbeiwert k_{mod} folgendermaßen:

$$R_d = \frac{k_{\text{mod}} \cdot R_k}{\gamma_M} \quad (124)$$

Der Teilsicherheitsbeiwert γ_M wird in der DIN 1052 für auf Biegung beanspruchte stiftförmige Verbindungsmittel mit 1,10 angegeben. Dies ist gerechtfertigt durch den Verzicht auf die Erhöhung mit dem Faktor 1,15 bei der Berechnung der charakteristischen Tragfähigkeit und der Erhöhung der Mindestholzdicken mit dem Faktor 1,15.

Auch die lineare Abminderung über die vorhandene und die Mindestholzdicke liegt auf der sicheren Seite.

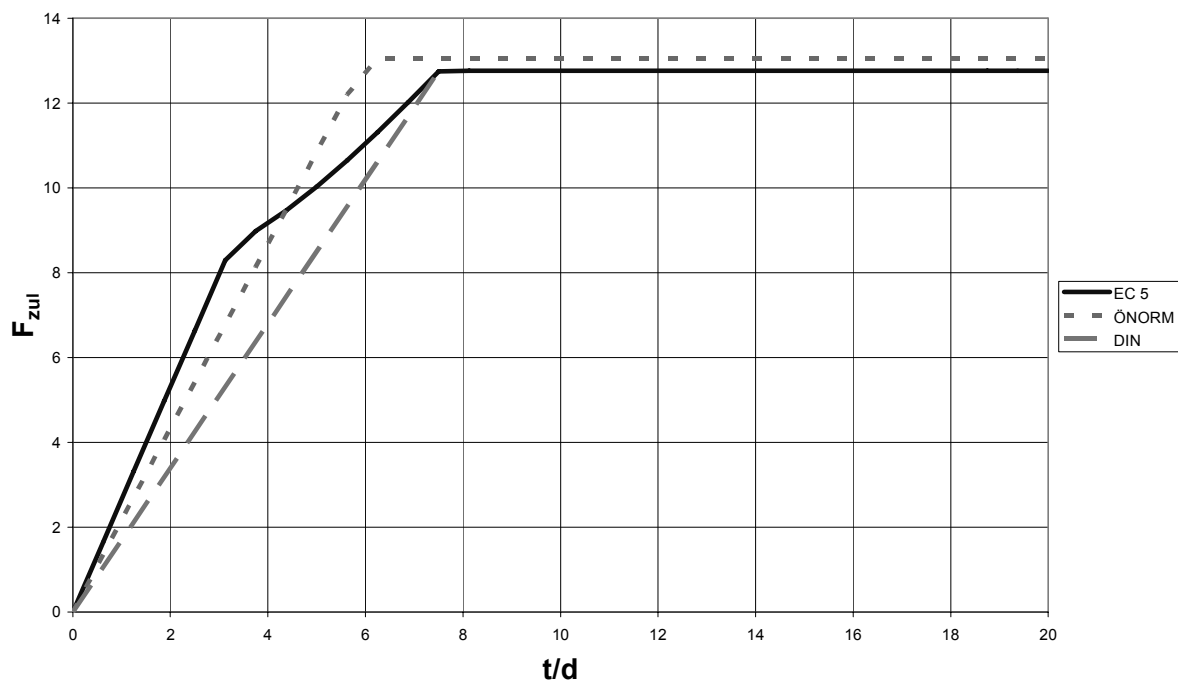


Abb. 38: lineare Abminderung nach DIN 1052

Natürlich sieht die DIN 1052 neben dieser vereinfachten Bemessungsmethode auch die Berechnung nach den Gleichungen des EC 5 vor.

7.2. Bemessungstabelle

Über die Ermittlung von Mindestholzdicken und der Annahme der Ausbildung der Fließgelenkkette kann man Bemessungstabellen angeben. Für zweischnittige Holz- Holz Verbindungen sieht dies folgendermaßen aus.

Die Mindestholzdicken t_1 und t_2 in [mm] sowie die charakteristischen Tragfähigkeiten R_k Verbindung in [kN] basieren auf folgenden Eingangswerten:

Holz: C 24

Stahl: S 235

Seitenholz und Mittelholz weisen die gleiche Festigkeitsklasse auf.

Tab. 37: Bemessung von zweischnittigen Holz-Holz-Verbindungen

d	Seitenholz	Mittelholz								
		$\alpha = 0^\circ$			$\alpha = 45^\circ$			$\alpha = 90^\circ$		
		t_1	t_2	R_k	t_1	t_2	R_k	t_1	t_2	R_k
6	$\alpha = 0^\circ$	32,84	27,29	2,21	32,18	31,60	2,10	31,61	35,58	2,00
	$\alpha = 45^\circ$	36,97	25,90	2,10	36,27	30,14	2,00	35,67	34,07	1,92
	$\alpha = 90^\circ$	40,76	24,71	2,00	40,04	28,87	1,92	39,41	32,75	1,84
8	$\alpha = 0^\circ$	41,79	34,72	3,67	40,89	40,56	3,47	40,13	45,93	3,30
	$\alpha = 45^\circ$	47,38	32,84	3,47	46,44	38,59	3,30	45,62	43,89	3,15
	$\alpha = 90^\circ$	52,49	31,24	3,30	51,52	36,87	3,15	50,66	42,10	3,02
10	$\alpha = 0^\circ$	50,51	41,97	5,42	49,36	49,46	5,11	48,40	56,30	4,85
	$\alpha = 45^\circ$	57,67	39,57	5,11	56,47	46,92	4,85	55,43	53,68	4,62
	$\alpha = 90^\circ$	64,19	37,54	4,85	62,94	44,74	4,62	61,86	51,40	4,43
12	$\alpha = 0^\circ$	59,10	49,10	7,44	57,69	58,37	6,99	56,50	66,80	6,62
	$\alpha = 45^\circ$	67,96	46,14	6,99	66,47	55,23	6,62	65,19	63,55	6,29
	$\alpha = 90^\circ$	75,98	43,66	6,62	74,44	52,55	6,29	73,10	60,74	6,02
16	$\alpha = 0^\circ$	76,14	63,27	12,20	74,14	76,48	11,39	72,49	88,40	10,72
	$\alpha = 45^\circ$	88,78	59,06	11,39	86,65	72,00	10,72	84,85	83,75	10,16
	$\alpha = 90^\circ$	100,11	55,59	10,72	97,90	68,22	10,16	96,01	79,78	9,68
20	$\alpha = 0^\circ$	93,27	77,50	17,79	90,59	95,24	16,50	88,42	111,09	15,46
	$\alpha = 45^\circ$	110,23	71,88	16,50	107,36	89,21	15,46	104,97	104,85	14,59
	$\alpha = 90^\circ$	125,30	67,33	15,46	122,33	84,19	14,59	119,81	99,55	13,85
24	$\alpha = 0^\circ$	110,72	92,00	24,08	107,28	114,88	22,19	104,54	135,15	20,69
	$\alpha = 45^\circ$	132,59	84,78	22,19	128,88	107,09	20,69	125,84	127,08	19,45
	$\alpha = 90^\circ$	151,85	79,03	20,69	148,01	100,70	19,45	144,78	120,30	18,41
30	$\alpha = 0^\circ$	137,91	114,59	34,53	133,16	146,45	31,52	129,46	174,33	29,19
	$\alpha = 45^\circ$	168,35	104,61	31,52	163,18	135,59	29,19	159,01	163,07	27,30
	$\alpha = 90^\circ$	194,83	96,85	29,19	189,47	126,83	27,30	185,03	153,74	25,74

Wenn für eine Verbindung die Mindestholzdicke nicht erreicht wird, kann die charakteristische Wert der Tragfähigkeit linear im Verhältnis zur Mindestholzdicke abgemindert werden.

$$\frac{t_1}{t_{1,erf}} \text{ oder } \frac{t_2}{t_{2,erf}} \quad (125)$$

Für andere Festigkeitsklassen bzw. Stahlgüten ergeben sich auch andre Mindestholzdicken bzw. charakteristische Tragfähigkeiten. Diese kann man durch Multiplikation mit folgenden Faktoren ermitteln.

Für die Mindestholzdicken ist dies

$$\sqrt{\frac{f_{u,k} \cdot 350}{360 \cdot \rho_k}} \quad (126)$$

Und für die charakteristische Tragfähigkeit gilt

$$\sqrt{\frac{f_{u,k} \cdot \rho_k}{360 \cdot 350}} \quad (127)$$

8. Schlussfolgerungen – Ausblick

Der Eurocode 5 bringt für den Holzbau nicht nur den Übergang auf das semiprobabilistische Sicherheitskonzept. Die europäische Holzbaunorm bringt unter anderem auch massive Änderungen bei der Berechnung von Verbindungen mit sich. So ist die Berechnung der Tragfähigkeit von Stabdübelverbindungen in der Önorm B 4100-2 mit einer Tabelle und zwei Formeln geregelt. Der EC 5 greift für die Ermittlung der Tragfähigkeit auf die Gleichungen von Johansen zurück. Neben den zum Teil sehr umfangreichen Gleichungen ist im neuen Regelwerk auch ein zusätzlicher Versagensmechanismus enthalten. Neben dem reinen Lochleibungsversagen eines Holzbauteils und dem reinen Stabdübelversagen durch die Ausbildung einer Fließgelenkkette kommt nun das kombinierte Versagen dieser beiden Mechanismen hinzu. Dies führt zu einer wesentlichen Abwertung des Seitenholzes gegenüber der Önorm und bedeutet wesentlich größere erforderliche Dicken des Seitenholzes bei Bemessung nach EC 5. Dieser Abwertung des Seitenholzes steht jedoch eine Aufwertung des Mittelholzes gegenüber. Der EC 5 verlangt kleinere Stärken des Mittelholzes zur Erreichung des reinen Stabdübelversagens als die Önorm.

Eine weitere Neuerung ist der direkte Einfluss der Lochleibungsfestigkeit und des Fließmomentes. Mit diesen beiden Festigkeitswerten kann man bei Bemessung nach EC 5 die Tragfähigkeit sozusagen steuern. Diese Möglichkeit gibt es in der Önorm nicht. Durch den Einsatz von hochfesten Stählen bei den Verbindungsmitteln kann man sich unter Umständen den Übergang auf einen größeren Durchmesser ersparen. Dies bringt zum einen Vorteile bei den Mindestabständen und zum anderen bei der Erhöhung der Verbindungsmittelabstände untereinander in Kraft- und Faserrichtung.

Die Vergleichsrechnungen von Stabdübelverbindungen zeigen, dass bei einzelnen Stabdübeln vor allem kleinere Durchmesser an das Niveau der Tragfähigkeit der Önorm heranreichen. Nur bei Verbindungen mit seitlichem dickem Stahlblech liegt der EC 5 bei den Tragfähigkeitswerten meist über der Önorm.

Den wesentlichsten Unterschied bei der Berechnung der Tragfähigkeiten stellt die Abminderung infolge mehrerer in Kraft- und Faserrichtung hintereinander liegender Verbindungsmittel dar. Die Önorm stellt die 0,9^{te} Potenz der Verbindungsmittel einer Reihe in Rechnung. Im EC 5 wird diese Abminderung auch vorgenommen und zusätzlich mit einem Faktor in Abhängigkeit von dem Abstand der Verbindungsmittel in Faserrichtung multipliziert.

Wenn die Abstände auf dem Minimum gehalten werden so weist der EC 5 z.B.: bei drei Stabdübeln in einer Reihe einen Wert für n_{eff} von 2,12 auf. Die Önorm hingegen ergibt sich n_{eff} zu 2,69. Der EC 5 liegt, bei Einhaltung der Mindestabstände, mit der effektiven Anzahl der Stabdübel auf 78,75 Prozent des Wertes der Önorm. Diese Differenz kann zwar durch eine Erhöhung des Mindestabstandes unter den Stabdübeln in Kraft- und Faserrichtung vermindert werden, verbraucht aber, vor allem bei größeren Durchmessern viel Platz.

Eine weitere wesentliche Neuerung ist die Aufnahme von Holzwerkstoffen in die Bemessungsregeln. In der Önorm konnte man nur Schnittholz und Brettschichtholz in Stabdübelverbindungen verwenden. Im EC 5 ist es nun auch möglich Sperrholz, Spanplatten und OSB-Platten in Verbindungen zu bemessen.

Die Bemessung von Stabdübelverbindungen ist im Eurocode sehr umfangreich. Eine Vereinfachung der Bemessung, durch eine grafische Auswertung der Gleichungen von Johansen, stellen die Möller-Diagramme dar. Da die Gleichungen von Johansen im EC 5 teilweise mit Beiwerten versehen sind, wurden die Möller-Diagramme daran angepasst. Die Versagensart kann nach Berechnung von drei Parametern sofort bestimmt werden. Weiters wurden Diagramme zur grafischen Ermittlung eines Tragfähigkeitsfaktors angegeben. Die Tragfähigkeit pro Scherfuge erhält man dann durch Multiplikation mit der Lochleibungsfestigkeit, der Holzdicke und dem Stabdübeldurchmesser. Diese Methode liefert die gleichen Bemessungswerte wie die Berechnung nach EC 5.

Eine andere vereinfachte Möglichkeit der Ermittlung der Tragfähigkeit wird in der DIN 1052 angegeben. Hier geht man von der maximalen Tragfähigkeit des Verbindungsmittels, der Ausbildung einer Fließgelenkkette aus. Für dieses Tragfähigkeitsniveau werden jedoch Mindestdicken für das Seiten- und das Mittelholz gefordert. Wenn diese Mindestdicken nicht erreicht werden, mindert man die Tragfähigkeit mit dem Verhältnis der vorhandenen Holzdicke zur Mindestholzdicke linear ab. Die Tragfähigkeit wird dann in diesem Bereich nicht ausgeschöpft.

Ein wesentlicher Vorteil dieser Methode der Bemessung über die Mindestholzdicken ist die Möglichkeit der Angabe von Bemessungstabellen.

9. Anhang

9.1. Literaturverzeichnis

- [1] ÖNORM EN 1995-1-1; Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau
- [2] ÖNORM B 41100-2; Holzbau – Holztragwerke; Berechnung und Bemessung
- [3] ÖNORM EN 1990; Eurocode; Grundlagen der Tragwerksplanung
- [4] ÖNORM EN 1194; Holzbauwerke – Brettschichtholz – Festigkeitsklassen und Bestimmung charakteristischer Werte
- [5] ÖNORM EN 338; Bauholz für tragende Zwecke - Festigkeitsklassen
- [6] Marc Krain: Einflussgrößen und optimale Knotengestaltung von Stabdübelverbindungen
- [7] Karl Frauendienst: Verbindungsmittel im Holzbau – Vergleich der Berechnungsverfahren für Schraubenbolzen- und Stabdübelverbindungen ÖNORM – Eurocode 5
- [8] H. J. Blaß, J. Ehlbeck, H. Kreuzinger, G. Streck: Erläuterungen zu DIN 1052: 2004-08
- [9] Wolfgang Weber: Mechanische Verbindungsmittel im Ingenieurholzbau unter besonderer Berücksichtigung von Schraubenverbindungen
- [10] DIN 1052; Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken – Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau
- [11] Johansen, K.W.: Theory of timber connections: International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE). Publication No. 9 (1949). Bern, Schweiz
- [12] Möller, T.: En ny metod för beräkning av spikförband. Reprt No 117 (1951), Chalmers University of Technology, Schweden.
- [13] Blaß, H.J.; Görlacher, R.; Steck, G.: Holzbauwerke nach Eurocode 5, STEP 1: Bemessung und Baustoffe. Fachverlag Holz der ARGE Holz e.V., Düsseldorf, 1995
- [14] Skriptum: Holzbau 1 für Bauingenieure – Konstruktion und Bemessung; K. Hollinsky; Institut für Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau der TU-Wien; 2007
- [15] Skriptum: Holzbau 2 für Bauingenieure; K. Hollinsky; Institut für Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau der TU-Wien; 2006
- [16] Skriptum: Hochbaukonstruktionen; A. Kolbitsch; Institut für Hochbau und Technologie der TU Wien; 2006
- [17] EHLBECK J.: Grundlagen der Bemessung von Verbindungen im Holzbau, Bauen mit Holz 10, 1993
- [18] ÖNORM EN 1993-1-1; Eurocode 3: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau
- [19] Werner; Zimmer.: Holzbau 1 Grundlagen nach DIN 1052 (neu 2004) und Eurocode 5 - 3. überarbeitete Auflage
- [20] Hollinsky, K.: Bauen mit Holz, Lehrbehelf, Universität für Bodenkultur, Institut für Holzforschung, Wien 1996

9.2. **Abbildungsverzeichnis**

Abb. 1: deterministisches Sicherheitskonzept.....	6
Abb. 2: Verteilung von Einwirkung S, Widerstand R und Grenzzustand $Z=R-S$ [8].....	8
Abb. 3: semiprobabilistisches Sicherheitskonzept.....	8
Abb. 4: Vereinfachte Last-Eindrückungs-Beziehung [13].....	18
Abb. 5: Versagensmechanismen für zweischnittige Holz- und Holzwerkstoff-Holz-Verbindungen	19
Abb. 6: Versagensmechanismen für zweischnittige Stahlblech-Holz-Verbindungen	20
Abb. 7: Versagensart g: Lochleibungsversagen im Seitenholz [13].....	21
Abb. 8: Versagensart h: Lochleibungsversagen im Mittelholz [13]	22
Abb. 9: Versagensart j: kombiniertes Versagen [13].....	22
Abb. 10: Versagensart k: Fließgelenkkette [13].....	24
Abb. 11: Versagensart f: Lochleibungsversagen im Holzteil [13].....	26
Abb. 12: Versagensart g: kombiniertes Versagen [13]	27
Abb. 13: Versagensart h: Fließgelenkkette [13].....	28
Abb. 14: Versagensart j: Lochleibungsversagen im Mittelholz [13]	30
Abb. 15: Versagensart k: kombiniertes Versagen [13]	30
Abb. 16: Versagensart l: Lochleibungsversagen im Mittelholz [13]	32
Abb. 17: Versagensart m: Fließgelenkkette [13]	32
Abb. 18: Abminderung der Lochleibungsfestigkeit infolge des Winkels.....	50
Abb. 19: Stabdübel aus Stahl (verzinkt, verchromt) oder Edelstahl [20]	51
Abb. 20: Passbolzen mit beidseitiger Mutter [20] bzw. mit Kopf und Mutter [20].....	51
Abb. 21: Fließmoment in Abhängigkeit von Stahlgüte und Durchmesser	56
Abb. 22: Verformung und Spannungsverlauf [19].....	57
Abb. 23: Zugstoß.....	62
Abb. 24: Abstände der Verbindungsmittel untereinander und von den Rändern; Definitionen und Bezeichnungen	67
Abb. 25: Mindestabstände von Stabdübeln lt. ÖNORM B 4100-2 [2].....	68
Abb. 26: Abstand a_1	68
Abb. 27: Abstand a_3	69
Abb. 28: Abstand a_4	70
Abb. 29: Effektive Anzahl der Verbindungsmittel nach EC 5 und ÖNORM b 4100-2	72
Abb. 30: Versagensmechanismus in Abhängigkeit von der Schlankheit.....	77

Abb. 31: Über- bzw. Unterschreitung der Tragfähigkeit je eines Stabdübels nach EC 5 im Vergleich zur Önorm.....	81
Abb. 32: modifiziertes Möller-Diagramm für zweischnittige Holz-Holz-Verbindungen.....	98
Abb. 33: Diagramm zur Bestimmung des Tragfähigkeitsfaktors - Versagensart j).....	99
Abb. 34: Diagramm zur Bestimmung des Tragfähigkeitsfaktors - Versagensart j).....	100
Abb. 35: Versagensarten bei mittigem Stahlblech nach EC 5 [1].....	101
Abb. 36: Versagensarten bei außen liegendem Stahlblech nach EC 5 [1].....	102
Abb. 37: Diagramm zur Bestimmung der Maßgebenden Versagensart.....	102
Abb. 38: lineare Abminderung nach DIN 1052	105

9.3. Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Teilsicherheitsbeiwerte γ_M für Baustoffeigenschaften und Beanspruchbarkeiten aus [1]	13
Tab. 2: Empfehlungen für Zahlenwerte für Kombinationsbeiwerte im Hochbau [3].....	15
Tab. 3: Einwirkungskombinationen nach Eurocode	16
Tab. 4: Vereinfachte Einwirkungskombinationen nach DIN 1052.....	16
Tab. 5: Auszieh Widerstand $F_{ax,Rk}$	37
Tab. 6: Werte für k_{mod} [1]	38
Tab. 7: Klassen der Lasteinwirkungsdauer [1].....	41
Tab. 8: Beispiele für die Zuordnung zu Klassen der Lasteinwirkungsdauer [1].....	42
Tab. 9: Festigkeitsklassen für Bauholz - charakteristische Werte [5].....	44
Tab. 10: Bauholz - Zuordnung der Sortierklassen zu den Festigkeitsklassen [15].....	45
Tab. 11: Festigkeitsklassen für homogenes und kombiniertes Brettschichtholz – charakteristische Werte [4]	46
Tab. 12: Brettschichtholz - Zuordnung der Sortierlassen zu den Festigkeitsklassen [15].....	47
Tab. 13: charakteristische Werte der Lochleibungsfestigkeiten [1].....	49
Tab. 14: Werte zur Berechnung der zulässigen Übertragungskräfte von Schraubenbolzen-, Stabdübel- bzw. Passbolzen- und Holzschraubenverbindungen [2].....	53
Tab. 15: charakteristische Werte für Fließspannung $f_{y,k}$ und Zugfestigkeit $f_{u,k}$ für Schraubenbolzen und Passbolzen [14].....	55
Tab. 16: charakteristische Werte für Fließspannung $f_{y,k}$ und Zugfestigkeit $f_{u,k}$ für Stabdübel [15].....	55
Tab. 17: $M_{y,Rk}$ in Nmm.....	56

Tab. 18: Mindestholzdicken im EC 5 und in der ÖNORM B4100-2 bei zweischnittigen Holz-Holzverbindungen	61
Tab. 19: Mindestholzdicken im EC 5 und in der ÖNORM B4100-2 bei zweischnittigen Stahl-Holz-Verbindungen mit außenliegendem dünnem Stahlblech	64
Tab. 20: Mindestholzdicken im EC 5 und in der ÖNORM B4100-2 bei zweischnittigen Stahl-Holz-Verbindungen mit außenliegendem dickem Stahlblech	65
Tab. 21: Mindestholzdicken im EC 5 und in der ÖNORM B4100-2 bei zweischnittigen Stahl-Holz-Verbindungen mit mittigem Stahlblech jeder Dicke	66
Tab. 22.: Mindestabstände von Stabdübeln lt. EC 5 [1]	67
Tab. 23: Abminderung der Verbindungsmittelanzahl in Prozent	72
Tab. 24: Erhöhungsfaktor für eine Steigerung des Mindestabstandes in Faserrichtung nach EC 5	73
Tab. 25. Fiktiver Teilsicherheitsbeiwert	76
Tab. 26: Gegenüberstellung der Sicherheitsbeiwerte	79
Tab. 27: Vergleich von zweischnittigen Holz-Holz-Verbindungen mit je einem Stabdübel unter einem Winkel $\alpha = 0^\circ$	82
Tab. 28: Vergleich von zweischnittigen Holz-Holz-Verbindungen mit je sechs Stabdübeln unter einem Winkel $\alpha = 0^\circ$	86
Tab. 29: Vergleich von zweischnittigen Holz-Holz-Verbindungen mit je einem Stabdübel unter einem Winkel $\alpha = 90^\circ$	88
Tab. 30: Vergleich von zweischnittigen Stahl-Holz-Verbindungen (Stahlblech in der Mitte) mit je einem Stabdübel unter einem Winkel $\alpha = 0^\circ$	89
Tab. 31: Vergleich von zweischnittigen Stahl-Holz-Verbindungen (Stahlblech in der Mitte) mit je einem Stabdübel unter einem Winkel $\alpha = 90^\circ$	91
Tab. 32: Vergleich von zweischnittigen Stahl-Holz-Verbindungen (dünnem Stahlblech seitlich) mit je einem Stabdübel unter einem Winkel $\alpha = 0^\circ$	92
Tab. 33: Vergleich von zweischnittigen Stahl-Holz-Verbindungen (dünnem Stahlblech seitlich) mit je einem Stabdübel unter einem Winkel $\alpha = 90^\circ$	93
Tab. 34: Vergleich von zweischnittigen Stahl-Holz-Verbindungen (dickes Stahlblech seitlich) mit je einem Stabdübel unter einem Winkel $\alpha = 0^\circ$	95
Tab. 35: Vergleich von zweischnittigen Stahl-Holz-Verbindungen (dickes Stahlblech seitlich) mit je einem Stabdübel unter einem Winkel $\alpha = 90^\circ$	96
Tab. 36: Ermittlung von $F_{v,Rk}$ von zweischnittigen Verbindungen mit mittigem Stahlblech ..	101
Tab. 37: Bemessung von zweischnittigen Holz-Holz-Verbindungen	106