



*Christophe Sigrist
Dr. PhD., Professor für
Ingenieurholzbau und Stahlbau
Berner Fachhochschule
Architektur, Holz und Bau
Biel, Schweiz*

Nagelverbindungen

Grundlagen, Revision der Bemessungs- regeln und Nachweise, Beispiele

Nagelverbindungen

Grundlagen, Revision der Bemessungsregeln und Nachweise, Beispiele

Nagelverbindungen gehören weiterhin zu den leistungsfähigen Anschlüssen im Holzbau allgemein und im Ingenieurholzbau im speziellen. Die Grundlagen der immer noch gültigen Anslusstechniken sind in den traditionellen Holz-Holz Verbindungen zu finden, welche aus glattschaftigen Nägeln hergestellt werden. In Verbindung mit kommerziell erhältlichen Blechformteile und verschiedenen Sonder- und Weiterentwicklungen kommen in tragenden Stahl-Holz Verbindungen Rillen- und Schraubnägel zum Einsatz.

Nagelverbindungen sind grundsätzlich einfach herzustellen und einfach zu berechnen. Die Einhaltung von konstruktiven Anforderungen erlaubt ein optimales Tragverhalten für die Nägel zu erhalten und gleichzeitig die Bemessung zu vereinfachen. Aufgrund der speziellen Ausbildung der Nägel werden diese in Scherverbindungen nicht nur auf Abscheren, sondern auch auf Ausziehen beansprucht. Die so aufgebaute Seilwirkung lässt sich nur ungenau quantifizieren mit der Folge, dass die für stabförmige Verbindungsmittel gültige Fließgelenktheorie nach Johansen (1949) für Nägel zu ungünstigen Werten führt. Im Rahmen der Überarbeitung der heute bestehenden Norm SIA 265 wurde deshalb das heute gültige Verfahren zur Bemessung und Berechnung von Nagelverbindungen, basierend auf empirischen Nagelwerten, genauer untersucht. Dieser Artikel hat zum Ziel, die wesentlichen Hintergründe und Anpassungen zu genagelten Holz-Holz und Stahl-Holz-Verbindungen vorzustellen.

Die Rand- und Einsatzbedingungen für die Beanspruchung von Nägeln in Schafrichtung wurden präzisiert und aktualisiert. Ebenso wurde die Schreibweise an die bestehenden Regeln angepasst. Inhaltlich erfolgen keine Neuerungen, so dass an dieser Stelle auf weitere Ausführungen zu dieser Beanspruchung der Nägel verzichtet wird.

Das Tragverhalten von Nagelverbindungen

Einleitung

Grundsätzlich ist die Funktionsweise wie bei allen stabförmigen Verbindungsmitteln durch den Biege widerstand des Stabes in Funktion der Fliesseigenschaften des eingesetzten Materiales und der Lochleibungsfestigkeit des angrenzenden Holzes bestimmt. Schlanke Verbindungsmittel versagen auf Grund ihres Biege widerstandes (Modus 3). Bei ungenügenden Holzabmessungen oder im Falle von gedrunenen, stabförmigen Verbindungsmitteln versagt das Holz auf Lochleibung (Modus 1). Ziel ist, Nageldurchmesser und Holzabmessungen so abzustimmen, dass wenn möglich der Versagensmodus 3 erreicht wird. Durch konstruktive Massnahmen müssen aber alle anderen Versagensarten (Aufspalten, Ausziehen, etc.) verhindert werden. In Nagelverbindungen trägt die Seilwirkung, die sich aufgrund grosser Verformungen einstellt, einen wesentlichen Beitrag zum Tragwiderstand einer Verbindung bei.

Eine Vielzahl von Parametern beeinflusst das Tragverhalten von Nagelverbindungen. Die konstruktive Umsetzung und die Definition der Randbedingungen werden in den heute gültigen Normen ganz unterschiedlich gehandhabt. Im Vordergrund stehen unten aufgeführte Parameter und spielen (nicht nur) bei Nagelverbindungen eine ganz wesentliche Rolle:

- Stahlgüte (Nageldraht vor der Verarbeitung, Eigenschaften nach der Verarbeitung)
- Ausbildung des Nagels (Kopfform, Ausbildung vom Schaft, Durchmesser, etc.)
- (charakteristische) Rohdichte des Holzes ρ_k
- lokale und globale Holzqualität (Sortierung)
- Vorbohren des Holzes

- Holzdicke t
- Abstände zwischen den Verbindungsmitteln und zum Rand jeweils parallel und rechtwinklig zur Faserrichtung
- Winkel zwischen Last- und Faserrichtung (parallel //, α , rechtwinklig \perp)
- Beanspruchung des Nagels auf Abscheren und Ausziehen
- Einschlagtiefe s des Nagels
- Anzahl Schnitte in der Verbindung
- Anzahl Verbindungsmittel im Anschluss, insbesondere in Krafrichtung hintereinander.

Je nach Grösse der angeschlossenen Kraft und der Spannungen im Holzquerschnitt ändern sich die Versagensarten. Bei kleinen Anschlüssen und somit geringen Spannungen im Holz und entsprechen grossen Querschnittabmessungen herrschen das Abscheren der Nagelköpfe, das Ausziehen des Nagelschafts und das Aufspalten des Holzes vor. Bei sehr grossen (Zug)Spannungen im Holzquerschnitt wird ein Versagen im Nettoquerschnitt, ein Versagen aufgrund eines Holzfehlers im Anschluss oder in Anschlussnähe oder ein Block-Scher Versagen beobachtet.

Die Normen, die heute für die Berechnung von genagelten Anschlüsse zur Anwendung kommen weisen in verschiedenen Bereichen grosse Abweichungen auf. Insbesondere erstaunen die hohen Grundwerte, welche in der SIA Norm aufgeführt werden. Die Unterschiede, die zwischen den verschiedenen Normen herrschen werden dargestellt, und die wesentlichen Parameter sowie die Anforderungen der Norm SIA 265 (2003), der DIN 1052 (2008-12 und Berichtigung 2010) und der EN 1995-1-1:2004/A1:2008) im Folgenden untersucht und erläutert. Die daraus folgenden Ergebnisse dienen der Entscheidung, ob den Berechnungen von Nagelverbindungen wie für Stabdübel und andere stiftförmige Verbindungsmittel ebenfalls das Tragmodell von Johansen (Tragmodell mit Fliessgelenken) zugrunde gelegt werden soll.

Einflussgrössen

Der Ursprung der genagelten Anschlüsse ist im traditionellen, zimmermannsmässigen Holzbau zu finden. Die konstruktive Ausbildung einer Nagelverbindung beeinflusst unmittelbar das Tragverhalten und findet somit direkten Eingang in die Norm. Prinzipiell muss unterschieden werden zwischen Holz-Holz und Stahl-Holz Verbindungen, die generell ein-, zwei- oder mehrschnittig ausgeführt werden können. Das Holz kann oder muss vorgängig vorgebohrt werden. Das Vorbohren führt zu Mehrkosten, bringt aber wesentliche Vorteile mit sich. Die Nägel können auf Abscheren, Ausziehen oder über eine kombinierte Belastung beansprucht werden. Die geometrischen Bedingungen für den Anschluss, damit für jedes Verbindungsmittel ein optimales Tragverhalten erzielt wird, sind in der Norm festgelegt.

Einfluss der konstruktiven Durchbildung

Holz-Holz Verbindungen

Von primärem Interesse sind ein- und zwischmittige Verbindungen unter Verwendung von glattschaftigen Nägeln mit einem Lasteintrag ins Holz welcher parallel oder rechtwinklig zur Faserrichtung wirkt. Die Nägel werden dabei rechtwinklig zur Schaftrichtung beansprucht. Holz-Holz Verbindungen mit Ankernägeln sind nicht praxisnah, da die Schaftlänge von handelsüblichen Ankernägeln maximal 100 mm beträgt. Bei längeren Ankernägeln mit $d = 6$ mm und Längen bis 300 mm und mehr handelt es sich um spezielle Sparrennägel.

Einschnittige Verbindungen werden üblicherweise mit Nageldurchmessern von $d = 2.8$ mm bis $d = 4$ mm ausgeführt. Dies erlaubt kleineren Bohlen mit Dicken von beispielsweise 60/120/60 zu grösseren 3-fach Querschnitten mit $t_{tot} \sim 240$ mm zu verbinden.

Im Fall von zwischmittigen Verbindungen kommen meist Nägel mit grösseren Längen und entsprechend grösseren Durchmessern zum Einsatz. Nageldurchmesser ab $d = 3.5$ mm oder $d = 4$ mm können zur Vernagelung von Brettern und Bohlen zu 3-fach Querschnitten mit Gesamtstärken ab $t_{tot} \sim 90 - 120$ mm (Beispiel eines minimalen Aufbaus 30/30/30 mm mit $d = 3.5$

und $l_N = 90$ mm) eingesetzt werden. Für maximal verfügbare Nageldurchmesser und Nagellängen ($d = 8.5$ mm, $l_N = 300$ mm) können zusammengesetzte Querschnitte von maximal $t_{tot} \sim 320$ mm erstellt werden.

Stahl-Holz Verbindungen

Die Verwendung von Stahlblechen in Verbindungen erlaubt eine beträchtliche Laststeigerung zu erzielen. Stahlbleche werden üblicherweise mittels einschnittig beanspruchten Rillen- und Schraubnägeln mit Nageldurchmessern von $d = 4.0$ mm und $d = 6.0$ mm mit Schaftlängen von 40 bis 100 mm vernagelt. Die Stahlbleche weisen üblicherweise Dicken von $0.5 d$ bis $1.0 d$ auf. Solche Verbindungen werden sowohl nicht vorgebohrt als auch vorgebohrt ausgeführt. Zu berücksichtigen ist, dass Nägel und Bleche / Blechformteile demselben System angehören müssen.

Zweischrittige Verbindungen könnten mit glattschaftigen Nägeln mit grösseren Längen und entsprechend grösseren Durchmessern (etwa ab $d = 4$ mm) ausgeführt werden. Die Stahlbleche liegen zwischen den Laschen oder werden in Schlitze in grösseren Querschnitten eingelegt, wie dies bei Stabdübeln der Fall ist. Solche Verbindungen müssten vorgebohrt werden. Frühere Konfigurationen mit mehrschnittig beanspruchten Verbindungen unter Verwendung von glattschaftigen Nägeln und dünnen Blechen (System Greim) haben sich aus verschiedenen Gründen nicht durchgesetzt.

Anforderungen an die Nägel

Der gebräuchlichste, glattschaftige Nagel weist eine Mindestzugfestigkeit des Drahtes von 600 N/mm² auf. Die Durchmesser liegen zwischen 2.8 mm und 8.5 mm, pro Schaftdurchmesser sind im Allgemeinen maximal drei Nagellängen verfügbar. Der lange Schaft erlaubt Bretter, Bohlen und Kanthölzer mit relativ grossen Querschnitten untereinander zu vernageln. Je nach Abmessung der zu verbindenden Teile können ein- oder zweischrittige Verbindungen hergestellt werden.

Für den Einsatz von Blechen und Blechformteilen wurden zur Verbesserung des Tragverhaltens genagelter Anschlüsse neue Nageltypen entwickelt. Diese unterscheiden sich von den herkömmlichen Nägeln durch viel kürzere Schaftlängen, die im Gegenzug eine spezielle Oberfläche zur besseren Verankerung des Nagels im Holz aufweisen. Rillen- oder Schraubnägeln müssen ebenfalls eine Mindestzugfestigkeit des Drahtes von etwa 600 N/mm² aufweisen und sind in den meisten Fällen galvanisiert. Verschiedenste Schaftformen – gerillt, gedreht, mit oder ohne Gewindeanstieg - Schaftquerschnitte und Nagelköpfe sind erhältlich. Üblicherweise werden Stahl-Holz Verbindungen mittels Rillen- und Schraubnägeln mit Durchmesser 4.0 mm und 6.0 mm und verschiedenen Schaftlängen als einschnittige Scherverbindung ausgeführt.

	SIA	DIN	EC
glattschaftige Nägel	600 N/mm ²	600 N/mm ²	600 N/mm ²
Rillennägel	550 N/mm ²	600 N/mm ² *	-

*Glattschaftige Nägel und Rillennägel mit identischer Zugfestigkeit

Abbildung 1: Zusammenstellung der geforderten Stahleigenschaften nach Norm

Nägel, die in tragenden Verbindungen eingesetzt werden, müssen den Anforderungen der EN 14592 entsprechen. Die Mindestzugfestigkeit des Drahtes zur Herstellung der Nägel (Werkstoffe), die Geometrie der Verbindungsmittel, die Prüfungen zur Ermittlung der Auszieh- und Kopfdurchziehparameter usw. sind in dieser Norm festgelegt.

Anforderungen an die Rohdichte

Die Rohdichte bestimmt wesentlich die Traglast einer Verbindung, da mit steigender Rohdichte die Lochleibungspressung ansteigt. Hölzer mit hoher Rohdichte müssen aufgrund der Spaltgefahr generell vorgebohrt werden. Die DIN und der EC stellen im Gegensatz zur Norm

SIA die Verbindungsmittelabstände in Abhängigkeit zur Rohdichte dar. Für Hölzer mit charakteristischen Rohdichten $\rho_k > 420 \text{ kg/m}^3$ müssen die Nagelabstände und teilweise auch die Holzstärken vergrössert werden, um ein Aufspalten des Holzes zu verhindern. Da neben der Rohdichte auch noch die Holzdicke eine wesentliche Rolle spielt, unterscheiden sich die Vorschriften in den verschiedenen Normen bezüglich der Nagelabstände beträchtlich. Gemäss der heute gültigen Norm SIA 265 sind Hölzer mit einer Rohdichte von $\rho_k > 480 \text{ kg/m}^3$ generell vorzubohren, Gemäss DIN und EC ist dies ab einer Rohdichte von $\rho_k \geq 500 \text{ kg/m}^3$ der Fall.

	SIA	DIN	EC
Rohdichte	$\rho_k > 480 \text{ kg/m}^3$	$\rho_k > 500 \text{ kg/m}^3$	$\rho_k \geq 500 \text{ kg/m}^3$
Durchmesser	-	-	$\varnothing > 6 \text{ mm}$

Abbildung 2: Heute gültige Anforderungen an das Vorbohren der Nagelverbindung

FK	C20	C24	C27	C35	C45	D30	GL24c	GL24h	GL28c	GL28h	GL36c	GL36h
$\rho_k \text{ [kg/m}^3\text{]}$	330	350	370	400	440	530	350	380	380	410	430	450
$\rho_k \leq 420 \text{ kg/m}^3$	*											
$\rho_k \leq 480 \text{ kg/m}^3$	**											
* : Gültigkeit Dichteregel gemäss DIN für SIA 265												
** : Alle Nadelhölzer dürfe ohne Vorbohren genagelt werden												

Abbildung 3: Charakteristische Rohdichte für Holz unterschiedlicher Festigkeitsklasse nach Norm SIA

Für alle Nagelverbindungen in Nadelholz (Vollholz und BSH) ist in der bestehenden Normenversion kein Vorbohren vorgeschrieben ($\rho_k \leq 480 \text{ kg/m}^3$). Laubhölzer sind generell vorzubohren. Eine Anpassung der Dichteanforderungen oder ein differenzierterer Ansatz in Bezug auf Dichte und Nageldurchmesser sind zu untersuchen.

Vorbohren versus nicht Vorbohren der Verbindung

Nagelverbindungen können als vorgebohrte oder nicht vorgebohrte Verbindung ausgeführt werden. Durch das Vorbohren wird die Spaltgefahr während der Herstellung und im Gebrauch vermindert. Infolge einer besseren Abstützung des Nagelschafts auf dem Holz erfolgt bei vorgebohrten Verbindungen eine beträchtliche Laststeigerung. Gleichzeitig dürfen die Nagelabstände parallel und rechtwinklig zur Faserrichtung um einiges reduziert werden, was zu kompakteren Anschlüssen mit weniger Zwängung und Anfälligkeit auf exzentrische Lastenwirkungen führt.

Durchmesser Nagel [mm]	LL nicht vorgebohrt [N/mm ²]	LL vorgebohrt [N/mm ²]	LL vorgebohrt / nicht vorgebohrt [N/mm ²]	Laststeigerung von nicht vorgebohrt zu vorgebohrt
2.8	21.1	27.9	1.32	(1.15)
3.1	20.4	27.8	1.36	(1.17)
3.5	19.7	27.7	1.41	(1.19)
4.0	18.9	27.6	1.46	1.21
4.5	18.3	27.4	1.50	1.23
5.0	17.7	27.3	1.54	1.24
5.5	17.2	27.1	1.58	1.26
6.0	16.8	27.0	1.61	1.27
6.5	16.4	26.8	1.64	1.28
7.0	16.0	26.7	1.67	1.29
7.5	15.7	26.5	1.69	1.30
8.5	15.1	26.3	1.74	1.32

Abbildung 4: Vergleich der Lochleibungspressung (LL) nicht vorgebohrt und vorgebohrt (DIN und EC)

Die Lochleibungspressung ist bei nicht vorgebohrten Verbindungen stark vom Nageldurchmesser abhängig. Bei vorgebohrten Verbindungen ist die Lochleibungspressung für alle Nageldurchmesser praktisch konstant. Die Steigerung des Tragwiderstands, wenn anstelle nicht vorgebohrter vorgebohrte Verbindungen betrachtet werden, beträgt etwa 15 - 30% vom kleinsten bis zum grössten Nageldurchmesser und entspricht dem Verhältnis der Wurzel der Lochleibungspressung (in Klammer: Vorbohren auf Grund der geringen Durchmesser nicht sinnvoll).

Für den Fall der Rillen- und Schraubnägeln ergibt sich gemäss der Norm SIA bei Verwendung von Holz aller Festigkeitsklassen bezüglich Tragfähigkeit kein Vorteil, ob die Nägel vorgebohrt werden oder nicht, ausser dass geringere Abstände in Bezug auf die Verbindungsmittel zugelassen werden.

Einfluss der Last – Faserrichtung

Ausser bei glattschaftigen, nicht vorgebohrten Nägeln unterscheidet die Norm SIA 265 zwischen der Last-Faserrichtung. Gemäss DIN und EC sind die Lochleibungspressungen für Nägel in Holz-Holz, HWS-Holz und Stahl-Holz Verbindungen unabhängig von der Last-Faserrichtung. Nur gerade für Nageldurchmesser $d > 8\text{mm}$, die wie Stabdübel zu betrachten sind, ist der Tragwiderstand vom Last-Faserwinkel abhängig.

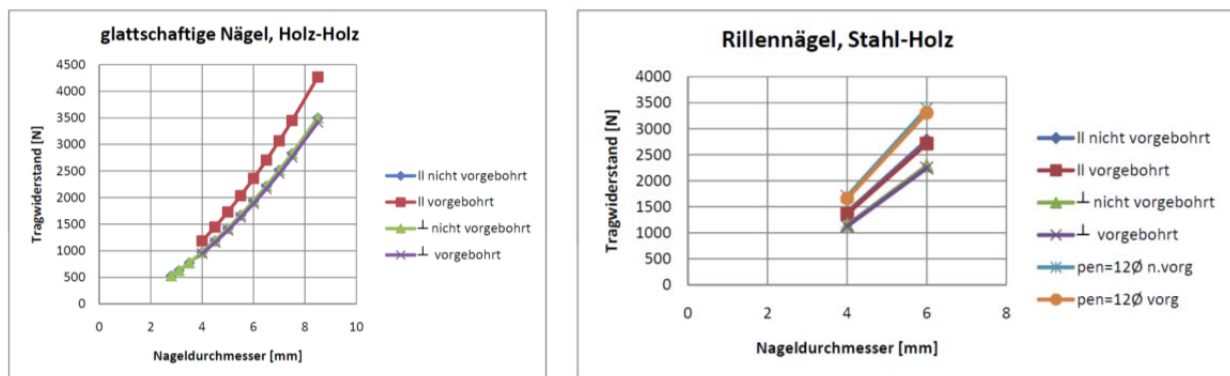


Abbildung 5: Vergleich der Tragfähigkeit von Nägeln in Abhängigkeit der Last-Faserrichtung (C24)

Bei Verwendung von C24 unterscheiden sich die Tragwiderstände nur im Fall der vorgebohrten, glattschaftigen Nägeln, welche parallel zur Faserrichtung belastet werden von den übrigen Fällen (nicht vorgebohrt // = nicht vorgebohrt \perp = vorgebohrt \perp). Die Steigerung für Belastungen parallel zur Faserrichtung im Vergleich zur Beanspruchung rechtwinklig zur Faserrichtung beträgt gemäss SIA etwa 20% für alle Durchmesser. Bei Verwendung von C45 erfolgt eine Steigerung von etwa 35% wenn die Nägel vorgebohrt werden. Diese Laststeigerung erfolgt sowohl für Holz-Holz als auch für Stahl-Holz Verbindungen.

Der Unterschied zwischen Belastung parallel und rechtwinklig zur Faser von Stahl-Holzverbindungen mit Rillen- und Schraubnägeln beträgt in diesem Fall rund 20%.

Anforderung an die Nagelabstände

Neben der Holzdicke und dem Nageldurchmesser spielt auch die Rohdichte eine wesentliche Rolle. Die DIN und der EC betrachten Nägel in Bezug auf Nagelabstände im Holz mit hoher Rohdichte gesondert. Es müssen folgende Fälle unterschieden werden:

1. Nägel nicht vorgebohrt, kleine Nageldurchmesser
2. Nägel nicht vorgebohrt, grosse Nageldurchmesser
3. Nägel vorgebohrt, alle Nageldurchmesser

Last parallel zur Faserrichtung, nicht vorgebohrt:

Für kleine Durchmesser ($d \leq 4$ mm gemäss der Norm SIA, $d < 5$ mm gemäss DIN und EC) herrscht in Bezug auf die Nagelabstände für alle Festigkeitsklassen ausser für C45, GL36c und GL36h, welche eine charakteristische Rohdichte von über 420 kg/m^3 aufweisen, Übereinstimmung aller drei Normen. Der Abstand parallel zur Faser zum unbeanspruchten Rand entspricht bei Norm SIA 265 den Anforderungen der DIN. Für Rohdichten $\rho_k > 420 \text{ kg/m}^3$ sind nach EC / DIN im Vergleich zu den Anforderungen der Norm SIA mehr als doppelt so grosse Abstände zum unbeanspruchten Hirnholz erforderlich. Die Nagelabstände in Faserrichtung sind rund 50% grösser. Auch bei den Nagelabständen rechtwinklig zur Faserrichtung sind ähnlich grosse Differenzen ersichtlich.

Last rechtwinklig zur Faserrichtung, nicht vorgebohrt:

Für alle Festigkeitsklassen ausser C45, GL36c und GL36h fordert die Norm SIA 265 grössere Nagelabstände als die DIN oder der EC. Der Abstand zwischen den Nägeln ist in allen Fällen nach SIA grösser. Der beanspruchte Randabstand rechtwinklig zur Faser ist gemäss Norm SIA 265 wesentlich geringer als bei DIN / EC, insbesondere bei Holz höherer Dichte.

Randbedingung	Norm	a_1 (parallel Faser)	a_2 (senkrecht Faser)	a_1 Hirnholz, beansprucht	a_1 Hirnholz, unbeansprucht	a_2 Seitenholz, beansprucht	a_2 Seitenholz, unbeansprucht
kleine Durchmesser							
ohne vordrehen							
Last / Faser $\alpha = 0^\circ$							
\varnothing SIA ≤ 4 mm	SIA	10	5	15	7	*	5
\varnothing DIN / EC < 5 mm							
$\rho_k \leq 420 \text{ kg/m}^3$	DIN	10	5	12	7	*	5
	EC	10	5	15	10	*	5
$420 \text{ kg/m}^3 > \rho_k < 500 \text{ kg/m}^3$	DIN	15	7	20	15	*	7
	EC	15	7	20	15	*	7
				Abstände EC grösser als DIN			
ohne vordrehen							
Last / Faser $\alpha = 90^\circ$							
\varnothing SIA ≤ 4 mm	SIA	10	5	*	7	6	5
\varnothing DIN / EC < 5 mm							
$\rho_k \leq 420 \text{ kg/m}^3$	DIN	5	5	*	7	7	5
	EC	5	5	*	10	7	5
$420 \text{ kg/m}^3 > \rho_k < 500 \text{ kg/m}^3$	DIN	7	7	*	15	9	7
	EC	7	7	*	15	9	7

Abbildung 6: Vergleich der Verbindungsmittelabstände für kleine Durchmesser ohne Vorbohren nach verschiedenen Normen

Ähnliche Ergebnisse werden erhalten, wenn grosse Nageldurchmesser betrachtet werden.

Last parallel zur Faserrichtung, vorgebohrt:

Die Abstände zwischen den Verbindungsmitteln sind gemäss den Anforderungen nach Norm SIA bedeutend grösser (+90%) als für EC / DIN. Ebenso sind die Randabstände rechtwinklig zur Faser grösser (+30%). Der Abstand parallel zur Faser zum beanspruchten Rand ist nach der Norm SIA 265 um zwei Durchmesser geringer.

Last rechtwinklig zur Faserrichtung, vorgebohrt:

Die Abstände zwischen den Verbindungsmitteln sind gemäss den Anforderungen nach Norm SIA wiederum bedeutend grösser (+75% / 130%) als für EC / DIN. Der Randabstand rechtwinklig zur Faserrichtung zum belasteten Rand ist bei allen Normen vergleichbar (+17% nach EC / DIN).

Schlussfolgerung

Nach der Norm SIA bestehen in Bezug auf die Verbindungsmittelabstände (parallel und rechtwinklig zur Faserrichtung zwischen den Verbindungsmitteln) für charakteristische Rohdichten von unter 420 kg/m^3 mindestens gleiche oder sogar strengere Anforderungen, was

gerade bei Nagelverbindungen oft mit vielen Nägeln zu längeren Anschlüssen führt. Der grössere Nagelabstand wirkt sich aber positiv auf das Tragverhalten aus. Bei Beanspruchungen rechtwinklig zur Faserrichtung fallen die in DIN / EC geforderten Abstände zwischen den Verbindungsmitteln und zum Rand sehr gering aus.

Die Randabstände zum Hirnholz sind in der Norm SIA im Allgemeinen geringer als gemäss anderen Normen, was sich negativ auf das Tragverhalten auswirkt. Die Randabstände zum Hirnholz sind bei faserparallelen Beanspruchungen bei hohen Rohdichten ohne Vorbohren besonders für den Fall des unbelasteten Randes parallel zur Faserrichtung kritisch, es herrscht Spaltgefahr. Ähnliche Überlegungen gelten bei Belastungen rechtwinklig zur Faserrichtung. Für Beanspruchungen rechtwinklig zur Faserrichtung sind die in der Norm SIA geforderten Randabstände um einiges geringer als nach DIN oder EC.

Bei Verwendung von Holzwerkstoffen und Stahllaschen dürfen die Nagelabstände infolge der erzielten Absperrwirkung gemäss DIN / EC teilweise beträchtlich reduziert werden. Dies gilt sowohl für vorgebohrte als auch nicht vorgebohrte Verbindungen. Diese Anpassung wurde auch in der neu erarbeiteten Norm SIA 265/1 in Bezug auf die Holzwerkstoffe nicht übernommen.

Zu beachten ist weiter, dass bezüglich der Nagelabstände nach DIN das Brettschichtholz der Rohdichteklasse $\rho_k \leq 420 \text{ kg/m}^3$ zugeordnet und somit ohne Vorbohren verarbeitet werden darf. Ob BSH weniger spaltgefährdet ist als Vollholz, ist allerdings fraglich.

Anforderungen an die Holzdicken

Nägel nicht vorgebohrt

Die Vorgaben nach SIA 265 für nicht vorgebohrte Verbindungen (SIA 265:Tabelle 23) entsprechen denjenigen der früheren DIN Normen. Für Durchmesser $d = 2.8 \text{ mm}$ bis $d = 8.5 \text{ mm}$ erfolgen minimale Holzdicken von rund $5.8 d$ resp. $9.8 d$. Eine proportionale Abminderung der Tragwiderstände bei gleichzeitiger Abminderung der Holzstärken ist für nicht vorgebohrte Verbindungen nicht zugelassen. Eine absolute Holzdicke von 24 mm ist einzuhalten.

\varnothing [mm]	Schlankheit ($3+0.8d_N$)	Schlankheit bei $t_{\min} = 24\text{mm}$
2.8	5.2	8.6
3.5	5.8	6.9
4	6.2	6.0
5	7.0	4.8
6	7.8	4.0
7	8.6	3.8
8.5	9.8	2.8

Abbildung 7: Schlankheit von Nägeln in Abhängigkeit der Holzdicken nach Norm SIA

Nach den für Holz-Holz Verbindungen anwendbaren Gleichungen nach EC und DIN zur Berechnung des Tragwiderstands gemäss der Fliessgelenktheorie (Johansen, Möhler) werden neben den Stahl und Holzeigenschaften die vorhandene Einschlagtiefe sowie Holzstärken direkt berücksichtigt. Nach EC sind Angaben zu minimalen Dicken der Füge-teile nur für nicht vorgebohrte Verbindungen zu finden. Die dazugehörigen Ziffern sind etwas unpräzise und verweisen lediglich darauf hin, dass das Holz bei geringeren Dicken für allgemeine Fälle „in der Regel“ resp. für spaltgefährdete Hölzer vorgebohrt werden „sollten“. Für spaltgefährdete Hölzer (zu denen auch Tanne und Fichte gehören) ergeben sich gemäss DIN und EC riesige

Abmessungen. Da in der Regel Ta / Fi mit einer charakteristischen Rohdichte von 350 kg/m^3 zum Einsatz kommt ist für Durchmesser bis und mit 6 mm immer die Anforderung $t_{\min} \geq 14d$ massgebend. Gemäss DIN „muss“ diese Anforderung an die Holzdicke für nicht vorgebohrte Verbindungen eingehalten werden.

		SIA	DIN	EC
nicht vorgebohrt	absolut	$t_{\min} \geq 24\text{mm}$ Nur massgebend für $\varnothing < 4\text{mm}$	keine Anforderung	keine Anforderung
nicht vorgebohrt	relativ	$t_{\min} = (3+0.8d)d$	$t_{\min} = \max \{14d, (13d - 30) \cdot \frac{\rho_k}{200}\}$ für Ta / Fi und $\varnothing \leq 6\text{mm}$ ist immer der erste Term massgebend → Modus 3	$t_{\min} = \max \{14d, (13d - 30) \cdot \frac{\rho_k}{200}\}$ für Ta / Fi und $\varnothing \leq 6\text{mm}$ ist immer der erste Term massgebend → Modus 3
vorgebohrt	absolut	$t_{\min} \geq 24\text{mm}$ Nur massgebend für $\varnothing < 4\text{mm}$	keine Anforderung	keine Anforderung
vorgebohrt	relativ	$t_{\min} = 6d$	keine Anforderung	keine Anforderung

Abbildung 8: Zusammenstellung der minimal geforderten Holzstärken nach verschiedenen Normen

Für das vereinfachte Verfahren nach DIN (Modus 3 wird erreicht) werden die dazu erforderlichen Holzstärken über entsprechende Gleichungen ausgewiesen. Es erfolgt eine Mindestdicke von etwa $9d$ zur Erfüllung der Tragfähigkeit. Bei nicht vorgebohrten Verbindungen ergibt sich mit der Anforderung $t_{\min} \geq 14d$ automatisch der maximale Tragwiderstand, eine proportionale Abminderung, wie dies im vereinfachten Verfahren nach DIN zugelassen ist, erübrigt sich damit (Mindestdicken wären nicht mehr eingehalten). Die heutigen Vorgaben führen zu rund doppelten so grossen Holzstärken als dies in den früheren DIN Normen der Fall war.

Reduzierte Anforderungen an die Holzdicke würden erfolgen, falls die Verbindungsmittelabstände zum Rand rechtwinklig zur Faserrichtung massiv erhöht würden. Dies verlangt aber mindestens eine Verdoppelung der Randabstände rechtwinklig zur Faserrichtung. Für Kiefer (Föhre) und andere, weniger spaltgefährdete Holzarten ist gemäss DIN / EC eine Mindestholzdicke von $t_{\min} = \max \{7d, (13d - 30) \cdot \frac{\rho_k}{400}\}$ gefordert.

Nägel vorgebohrt

Falls die absoluten Holzstärken gemäss Norm SIA eingehalten sind, dürfen die relativen Holzstärken von $6d$ verringert werden, wenn gleichzeitig eine proportionale Abminderung der Tragwiderstände erfolgt. Nach DIN und EC bestehen bei vorgebohrten Nagelverbindungen keine Vorgaben zu Mindestholzstärken. Seitenhölzer oder Innenhölzer dürfen theoretisch eine Dicke von $t = 0$ aufweisen. Die Holzdicke fliesst direkt über die Gleichungen zur Ermittlung des Tragwiderstands einer Nagelverbindung ein.

Anforderungen an die Einschlagtiefe

Die Norm SIA unterscheidet klar zwischen ein- und zweischnittigen Verbindungen sowie glattschaftigen, langen Nägeln und den kurzen Rillen- und Schraubnägeln mit speziell ausgebildetem Schaft, welche relativ kurze Verankerungslängen zulassen. Viel Spielraum liegt für den Entwurf des Anschlusses vor. Zwischen den minimalen und maximalen resp. optimalen Einschlagtiefen dürfen die Nagelwerte linear interpoliert werden. Wenn die Einschlagtiefe geringer ist als der minimal geforderte Wert, dürfen keine Kräfte in der Scherfuge angesetzt werden. Bei grösseren als den maximal geforderten Einschlagtiefen liegen optimale Verhältnisse in Bezug auf das Tragverhalten vor, d.h. Versagensmodus 3 wird erreicht, und die Bemessungswerte dürfen um den Faktor 1.13 erhöht werden. Die Anforderungen an die Einschlagtiefe sind in der DIN und im EC in den meisten Fällen nicht ausgewiesen.

Gemäss SIA dürfen die Scherflächen in zweischnittigen Verbindungen getrennt betrachtet und die Werte addiert werden. Voraussetzung ist in diesem Fall allerdings, dass die Nägel jeweils

alternativ von der einen und der anderen Seite her eingeschlagen werden, damit der Anschluss symmetrisch belastet wird. Bei zweischnittigen Verbindungen wird gemäss DIN / EC der ungünstigste Schnitt betrachtet, und pro Nagel wird für jeden Schnitt derselbe Wert verwendet (zweimal der Minimalwert).

		Holz-Holz und Stahl-Holz				Stahl-Holz
		1-schnittig		2-schnittig**		1-schnittig
		min	opt (100%)	min	opt (100%)	Erhöhung 122%
SIA	glattschaftige Nägel	8	12	5	8	-
	Rillennägel	6	8	-	-	12 (Erhöhung 122%)
DIN	glattschaftige Nägel und Rillennägel	4?	~9*	4	-	~10*
EC	glattschaftige Nägel	8	~9*	-	-	
	Rillennägel	6	~9*	-	-	

* über Holzdicke zur Ausbildung von Fließgelenken geregelt
** in DIN / EC nicht speziell ausgewiesen (letzter Schnitt)

Abbildung 9: Anforderungen an die Einschlagtiefen der Nägel nach dem letzten Schnitt in Abhängigkeit des Nageldurchmessers

Anforderungen an die Anschlussgrösse

Die Tragfähigkeit eines Nagels ist in Abhängigkeit der Verbindungsmittel, die in Krafrichtung hintereinander liegen, abzumindern. Es gilt:

$$\begin{aligned}
 \text{SIA: } k_{\text{red}} &= n^{-0.16} \\
 \text{EC: } k_{\text{red}} &= n^{-0.15} && \text{wenn } a_1 = 10d \\
 &= n^{-0.30} && \text{wenn } a_1 = 7d \\
 \text{DIN: } k_{\text{red}} &= 1.0 && \text{wenn } d \leq 6 \text{ mm} \\
 &= n^{-0.1} \cdot \sqrt[4]{\frac{a_1}{10 \cdot d} \cdot \frac{90 - \alpha}{90}} + n \frac{\alpha}{90} && \text{wenn } d \leq 6 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Zu beachten ist, dass die DIN eine Abminderung der Nagelwerte für eine Anzahl Nägel in Krafrichtung hintereinander erst ab einem Nageldurchmesser von $d > 6$ mm verlangt. Es gelten dann die Vorschriften für Stabdübel. Gemäss DIN sind keine Abminderungen für lange Anschlüsse erforderlich, da Nagelverbindungen einen duktilen Charakter aufweisen. Es können Umlagerungen innerhalb des Nagelbildes stattfinden. Zu dieser Thematik liegen verschiedene Publikationen vor. Der EC definiert die Abminderung in Abhängigkeit von den Abständen in Krafrichtung zwischen den Nägeln. Auf eine Abminderung darf verzichtet werden, wenn die Nägel um einen Durchmesser entlang der Risslinie versetzt werden. Letzteres ist allerdings praktisch kaum umsetzbar.

		n = 5			n = 10		
	VM-Abstand	SIA	DIN	EC	SIA	DIN	EC
nicht vorgebohrt	$a_1 = 10\varnothing$	0.773	--	0.786	0.692	--	0.708
vorgebohrt	$a_1 = 7\varnothing$	0.773	--	0.617	0.692	--	0.501

Abbildung 10: Abminderung der Tragwiderstände in Funktion der Anzahl Nägel in Krafrichtung hintereinander angeordnet

Wegen der geringen Nagelabstände in vorgebohrten Verbindungen schreibt der EC im Vergleich zu den anderen Normen eine weitere Reduktion der Nageltragfähigkeit vor.

Theoretische Betrachtungen

Fliessgelenktheorie versus empirische Werte

Das Tragverhalten von stiftförmigen Verbindungsmitteln wird gegen oben durch die Fließgrenze des Stahls limitiert. Bei genügend schlanken Verbindungsmitteln bilden sich je nach Anschlusskonfiguration ein oder mehrere Fließgelenke aus. Hiermit handelt es sich um einen rein theoretischen Wert, der im Fall von Versuchen bei weitem übertroffen wird. Die empirischen (über Versuche) hergeleiteten Nagelwerte bilden die Realität korrekt ab. In der Norm SIA 265 werden demzufolge die maximalen Werte pro Scherfuge für ein einzelnes Verbindungsmittel angegeben. Die hohen Tragwiderstände werden durch zusätzliche Kräfte erzielt, die sich im Fall von grossen (erwünschten) Verschiebungen in der Verbindung beim Bruch einstellen. Nägel bauen bei grossen Verformungen dank der Verankerung im Holz eine Zugkomponente in Richtung der Längsachse des Verbindungsmittels auf. Neben den Scherkräften und der Seilwirkung stellen sich Reibungskräfte, die daraus resultieren, in der Scherfuge ein. Es wurde mehrfach versucht diese Zusatzkräfte experimentell zu bestimmen.

Einfluss der Seilwirkung

Mit der Idee, alle stabförmigen Verbindungsmittel mit nur gerade einem Tragmodell zu erfassen, wurde das Johansen Model auf Verbindungsmittel mit Einhängeeffekt erweitert. Dieser Einhängeeffekt berücksichtigt maximal 25% des Ausziehwidestands der Verbindungsmittel F_{ax} zusätzlich zum Widerstand aus Lochleibungspressung und zur plastischen Deformation des Verbindungsmittels gemäss der Theorie von Johansen. Der Anteil der Seilwirkung an den Tragwiderstand ist auf definierte Prozente des Anteils nach der Johansen Theorie für die jeweiligen Verbindungsmittel beschränkt. Sowohl die DIN als auch der EC erlauben eine Seilwirkung anzusetzen und schlagen Korrekturen vor, um die relativ tiefen Tragwiderstände aus dem theoretischen Modell zu korrigieren. Dies bedeutet, dass der theoretische Tragwiderstand aus der Modellrechnung je nach Verbindungsmitteltyp um einiges erhöht werden darf.

Seilwirkung bei glattschaftigen Nägel

Im Gegensatz zur DIN erlaubt der Eurocode eine Seilwirkung auch bei glattschaftigen Nägeln anzusetzen. Der Anteil der Seilwirkung ist nach EC auf 15% des Anteils nach Johansen beschränkt.

Seilwirkung bei Rillen- und Schraubnägeln

Der Anteil der Seilwirkung ist gemäss beiden Normen auf 50% des Anteils nach Johansen beschränkt.

Vergleichsrechnungen

Es wurden verschiedene, praxisnahe Verbindungen nach den verschiedenen Normen berechnet und verglichen. Es handelte sich um ein- und zweischnittige Holz-Holz Verbindungen mit glattschaftigen Verbindungen, jeweils vorgebohrt und nicht vorgebohrt. Die Stahl-Holz Verbindungen konzentrierten sich im Wesentlichen auf Konfigurationen mit Rillen- und Schraubnägeln. In beiden Fällen wurden Belastungen parallel und senkrecht zur Faserrichtung betrachtet. Auf Grund der sehr unterschiedlichen Ausgangslage in Bezug auf die in den Normen angegebenen Grundwerten wurden „übliche“ Anschlussgrössen mit 5 und 10 Nägeln in Kraftrichtung hintereinander betrachtet. Einige Ergebnisse aus diesen Vergleichsrechnungen sind in der Folge dargestellt.

Holz-Holz Verbindungen

Randbedingungen für die Berechnung

Für die Berechnung des Bemessungswerts der Tragwiderstände der hier dargestellten Verbindung gelten für Feuchteklasse 1 und eine mittlere Lastdauer folgende Randbedingungen:

Charakteristische Rohdichte C24

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

Verbindungsmittelabstand in Faserrichtung:

$$a_1 = 10d$$

Holz-Holz Verbindung

einschnittig

Kraft parallel zur Faserrichtung

Kraft senkrecht zur Faserrichtung

Nägelnicht vorgebohrt

10 Nägel in Krafrichtung hintereinander

k_{red} der jeweiligen Norm entsprechend

Werte in Diagramm für Nageldurchmesser

$d = 3.5 - 90 \text{ mm}$, glattschaftig

Mindestzugfestigkeit Stahl

$$f_{u,k} = 600 \text{ N/mm}^2$$

Vergleich der Tragfähigkeit

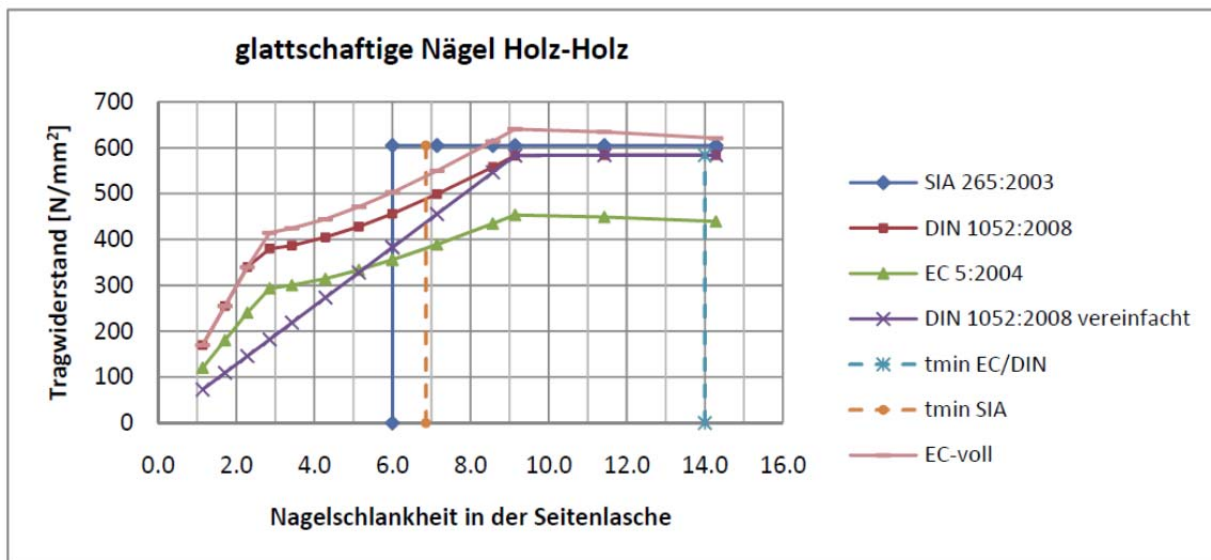


Abbildung 11: Einschnittige Holz-Holz Verbindung mit glattschaftigen Nägeln nicht vorgebohrt, parallel // und senkrecht \perp beansprucht

Der Tragwiderstand ist parallel und senkrecht zur Faserrichtung identisch gemäss allen Normen. Ab relativen Holzstärken von weniger als $t \leq (3 + 0.8d)d = 20.3 \text{ mm}$ wird der Tragwiderstand nach SIA zu Null. Allerdings müsste für diese Anschlusskonfiguration die absolute Begrenzung von $t \geq 24 \text{ mm}$ betrachtet werden (in Graphik gestrichelt eingetragen). Die absolute Holzstärke $t_{min,SIA}$ ist nur massgebend für kleine Nageldurchmesser mit $d < 4 \text{ mm}$.

Mit einer Holzdicke der Seitenlasche von 48 mm ($\sim 14d$) wird im zweiten Holz noch eine optimale Einschlagtiefe von $12d$ erreicht. Dies erlaubt den Tragwiderstand nach Norm SIA um den Faktor 1.13 zu erhöhen. Für Laschenstärken ab 48 mm würde sich der Tragwiderstand proportional bis zu einer minimalen, zugelassenen Einschlagtiefe von $8d$ nach SIA / EC (für glattschaftige Nägel) oder $4d$ nach DIN (für glattschaftige Nägel und Sondernägeln) reduzieren. Diese Anforderung kommt in diesem Fall nicht zum Tragen, da die Anschlusskonfiguration nicht praxisnah ist.

Um ein Aufspalten des Holzes im Fall von spaltgefährdetem Holz zu verhindern würde die minimale Holzstärke nach DIN / EC für spaltgefährdetes Holz $t_{min,EC/DIN} = 14d = 49 \text{ mm}$ für $d = 3.5 \text{ mm}$ betragen, diese Anforderung ist ebenfalls im Diagramm dargestellt.

Maximaler Tragwiderstand

Falls bei einer Berechnung nach EC keine Abminderung des Tragwiderstands vorgenommen wird wenn die Nägel versetzt angeordnet werden (EC-voll), erfolgen vergleichbare Tragwiderstände wie nach DIN. Den Berechnungen liegen identische Annahmen zu Grunde, nur dass die DIN für den Fall von glattschaftigen Nägeln keine Seilwirkung zulässt. Demzufolge sind die Tragwiderstände nach DIN etwas geringer als diejenige nach EC (Vergleich Kurven DIN mit EC-voll). Die Seilwirkung beschränkt sich jedoch auch nach EC auf 15% des Tragwiderstands aus der Modellrechnung und ist abhängig vom Auszieh Widerstand des Nagels in Abhängigkeit der Verankerungslänge des Verbindungsmittels.

Die DIN lässt ein vereinfachtes Verfahren für die Berechnung von Verbindungen zu. Der maximale Tragwiderstand, der im Allgemeinen bei einer Verbindungsmittelschlankheit von $9d$ erreicht wird, darf proportional zur vorhandenen Holzdicke abgemindert werden. Damit erfolgen bei geringen Verbindungsmittelschlankheiten ziemlich konservative Tragwiderstände. Dieser Kurvenverlauf (DIN vereinfacht) ist in der Graphik ebenfalls abgebildet.

Für den Fall von geringen Holzstärken mit Verbindungsmittelschlankheiten von 6 bis 8 in Bezug auf die Seitenlasche ergeben sich zum Teil grosse Differenzen zwischen den Berechnungen nach der Norm SIA und den anderen Normen.

Andere Durchmesser, Nägel nicht vorgebohrt

Die Abmessungen der Füge Teile müssen im Verhältnis zum Nageldurchmesser stimmig sein. Der Kurvenverlauf wird sich deshalb qualitativ nicht verändern. Ab $d = 4$ mm entfällt das absolute Minimalmass von 24 mm, die Gleichung $(3 + 0.8d)d$ zur Ermittlung der minimalen Holzstärke aus Tabelle 23 SIA 265 wird massgebend. Bei Berücksichtigung der Anforderung an die Mindestholzdicke variiert die Nagelschlankheit bezüglich der Seitenlasche zwischen 5.2 bis 9.8 (siehe auch Abbildung 7). Demzufolge werden für grosse Nageldurchmesser ähnliche Tragwiderstände wie nach DIN erhalten.

Mehr oder weniger Nägel in Krafrichtung hintereinander

Die Kurven basierend auf den Angaben nach Norm SIA und EC verschieben sich gegen unten resp. gegen oben in Abhängigkeit der Anzahl Nägel in Krafrichtung hintereinander angeordnet, da sich der Reduktionsfaktor ändert. Bis und mit $d < 6$ mm müssen die Tragwiderstände nach DIN nicht korrigiert werden. Für grössere Durchmesser gilt die Regelung für Stabdübel. Die Tragwiderstände gemäss DIN und EC gleichen sich an und liegen um ein beträchtliches Mass unter dem Tragwiderstand gemäss der Norm SIA.

Stahl-Holz Verbindungen

Randbedingungen für die Berechnung

Für die Berechnung des Bemessungswerts der Tragwiderstände der hier dargestellten Verbindung gelten für Feuchteklasse 1 und eine mittlere Lastdauer folgende Randbedingungen:

Charakteristische Rohdichte C24	$\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$
Verbindungsmittelabstand in Faserrichtung:	$a_1 = 10d$
Holzabmessungen:	$t_1 = 36 \text{ mm} - 96 \text{ mm}$ (Einschlagtiefen im Holz $9d - 24d$)
„dicke“ Stahllasche aussen	$t = 4 \text{ mm}$
Stahl-Holz-Verbindung	einschnittig
Seilwirkung	mit Seilwirkung gemäss DIN, gleiche Zuordnung nach EC
Kraft parallel und senkrecht zur Faserrichtung	
Nägel nicht vorgebohrt	
10 Nägel in Krafrichtung hintereinander	keine Abminderung des Tragwiderstands nach DIN da $d < 6 \text{ mm}$
Nageldurchmesser	$d = 4.0 \text{ mm}$, $l_n = 40 - 100 \text{ mm}$

Mindestzugfestigkeit Stahl; DIN Ziffer 12.5.2 (2)

$f_{u,k} = 600 \text{ N/mm}^2$ (keine Angaben im EC, gleiche Annahme wie gemäss DIN)

Vergleich der Tragfähigkeit

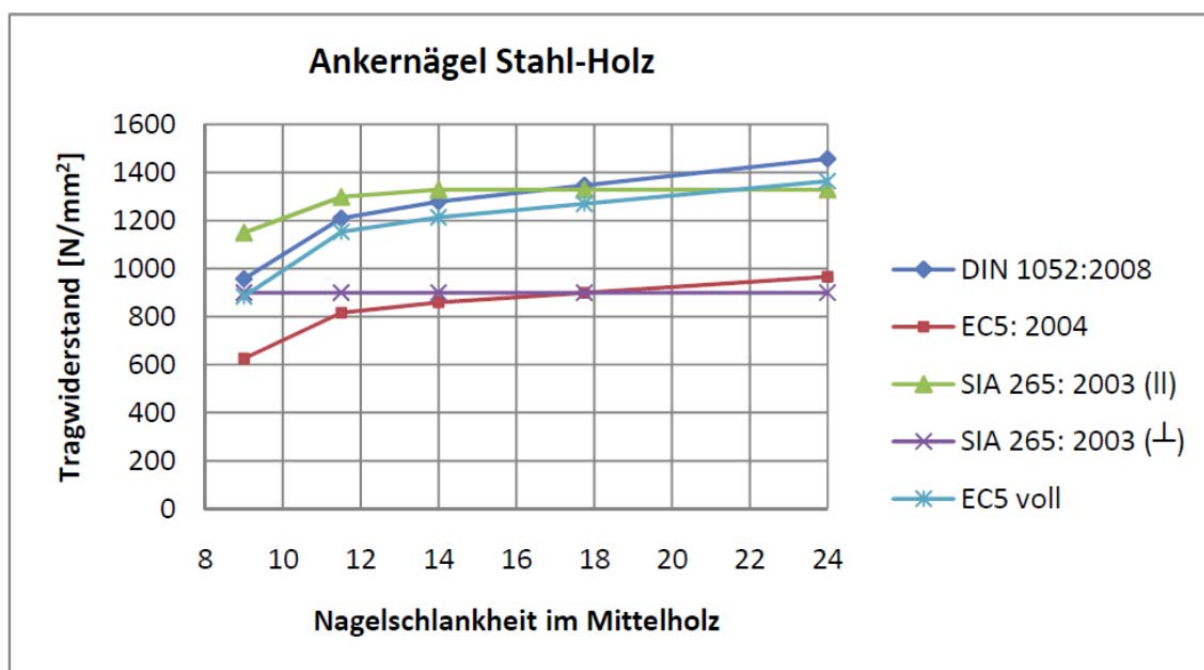


Abbildung 12: Einschnittige Stahl-Holz Verbindung mit Rillennägel nicht vorgebohrt, parallel // und senkrecht \perp beansprucht

Stahl-Holz Verbindungen, nicht vorgebohrt

Der Tragwiderstand für Stahl-Holz Verbindungen ist nach EC / DIN unabhängig von der Last-Faser Richtung. Günstige Tragmodelle führen zu hohen Anschlusskräften, welche für den Fall der Beanspruchung parallel zur Faser mit den Werten nach SIA (nach der erforderlichen Abminderung) vergleichbar sind. Für Belastungen senkrecht zur Faserrichtung weisen Verbindungen nach Norm SIA eine viel geringe Tragfähigkeit als nach DIN auf. Die Tragwiderstände aus den Berechnungen nach DIN und EC sind für den Fall, dass keine Reduktion infolge der Anzahl Verbindungsmittel betrachtet wird (EC voll), vergleichbar. Der Anteil aus der Seilwirkung kann in beiden Fällen berücksichtigt werden.

Stahl-Holz Verbindungen, vorgebohrt

Für vorgebohrte Verbindungen (hier nicht dargestellt) erfolgt eine Erhöhung des Tragwiderstands nach EC / DIN von rund 15% der wiederum unabhängig von der Last-Faser Richtung ist. Trotz Vorbohren der Ankernägel erfolgt nach Norm SIA keine Laststeigerung. Vorgebohrte Verbindungen weisen nach Norm SIA für Belastungen senkrecht zur Faserrichtung eine viel geringe Tragfähigkeit als nach DIN auf. Auch bezüglich der Belastungen parallel zur Faser sind sie geringer. Aufgrund enger Nagelabstände von vorgebohrten Verbindungen ist eine grosse Reduktion nach EC mit $k_{red} = 0.501$ erforderlich.

Handhabung der Abminderung infolge Anschlussgrösse

Aufgrund des hohen Lastenniveaus bei Betrachtung eines Einzelnagels nach Norm SIA 265 sind Abminderungen zwingend anzusetzen, damit für praxisnahe Anschlüsse mit 5, 10 oder mehr Verbindungsmitteln in Lastrichtung korrekt erfasst werden. Das tiefe Lastniveau nach EC / DIN, welches durch die Fließbedingung bei optimalem Einsatz des stabförmigen Verbindungsmittels gegeben ist, kann unter Berücksichtigung der Seilwirkung nur unzureichend korrigiert werden. Im Fall des EC wird das tiefe Lastniveau zusätzlich durch den Reduktionsfaktor

abgemindert und führt in allen Fällen sehr ungünstigen Vorgaben im Vergleich zur Norm SIA und der DIN. Eine zukünftige Ausrichtung an den EC ist in diesem Fall in Frage gestellt.

Verknüpfung verschiedener Parameter

Die Handhabung verschiedener Randbedingungen wird in den Normen teilweise sehr unterschiedlich gehandhabt, was eine „Kalibrierung“ schwierig macht. Die Verknüpfung vom Tragwiderstand mit der angeschlossenen Fläche erlaubt weitere Vergleiche zu ziehen. Die Fläche, welche ein einzelnes Verbindungsmittel beansprucht, ist durch die Nagelabstände parallel und rechtwinklig zur Faserrichtung ($e_{//}$ und e_{\perp}) definiert.

Für die folgenden Betrachtungen wurde der Reduktionsfaktor zur Berücksichtigung der Anzahl Nägel gemäss der Norm SIA 265 beibehalten. Zum Vergleich dienen weiterhin genagelte Anschlüsse mit 10 Nägeln in Krafrichtung hintereinander angeordnet, es handelt sich wiederum um Nageldurchmesser von $d = 3.5$ mm. Betrachtet werden Lasten, welche parallel und rechtwinklig zur Faserrichtung eingetragen werden, die Verbindung ist nicht vorgebohrt. Zur korrekten Berücksichtigung der Nagelabstände wird nach DIN und EC zwischen zwei Rohdichteklassen unterschieden:

- $\rho_k \leq 420 \text{ kg/m}^3$, der eingesetzte Wert für die Vergleichsrechnung $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$ entspricht einem C24
- $\rho_k > 420 \text{ kg/m}^3$, der eingesetzte Wert für die Vergleichsrechnung $\rho_k = 440 \text{ kg/m}^3$ entspricht einem C45 oder dem Mittelwert für GL36h und GL36k, denn es sind nur diese Festigkeitsklassen durch diese Regelung betroffen.

Der EC unterscheidet sich im Vergleich zur DIN insbesondere und lediglich dadurch, dass die Tragwiderstände von genagelten Verbindungen für alle Durchmesser in Abhängigkeit der Anzahl Nägel in Krafrichtung hintereinander abgemindert werden müssen (nach DIN erst ab $d > 6$ mm). Die Anforderungen an Nagelabstände, Holz厚ken, etc. sind im Allgemeinen identisch. Die unterschiedlichen Regelungen bezüglich der Randabstände parallel und senkrecht zu Faserrichtung sind in diesen Betrachtungen nicht von Bedeutung. Die DIN gilt in diesen Betrachtungen als Vergleichsnorm.

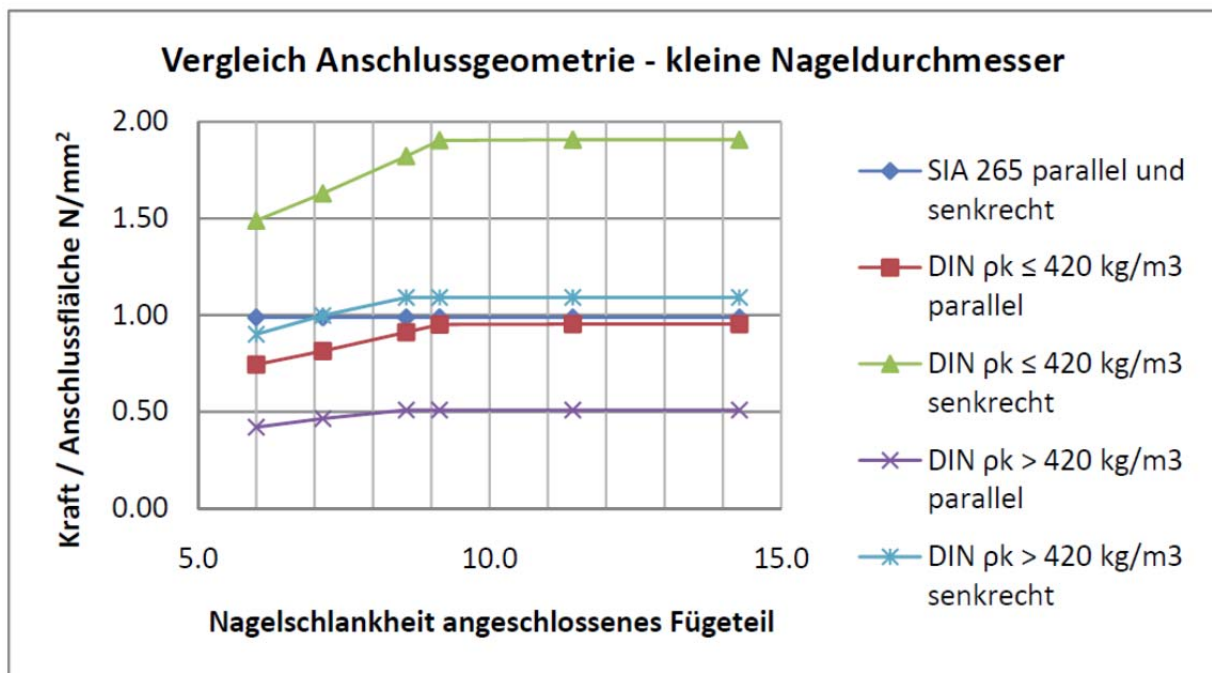


Abbildung 13: Zusammenhang zwischen Anschlussgeometrie und Kraft / Anschlussfläche für die Norm SIA und DIN

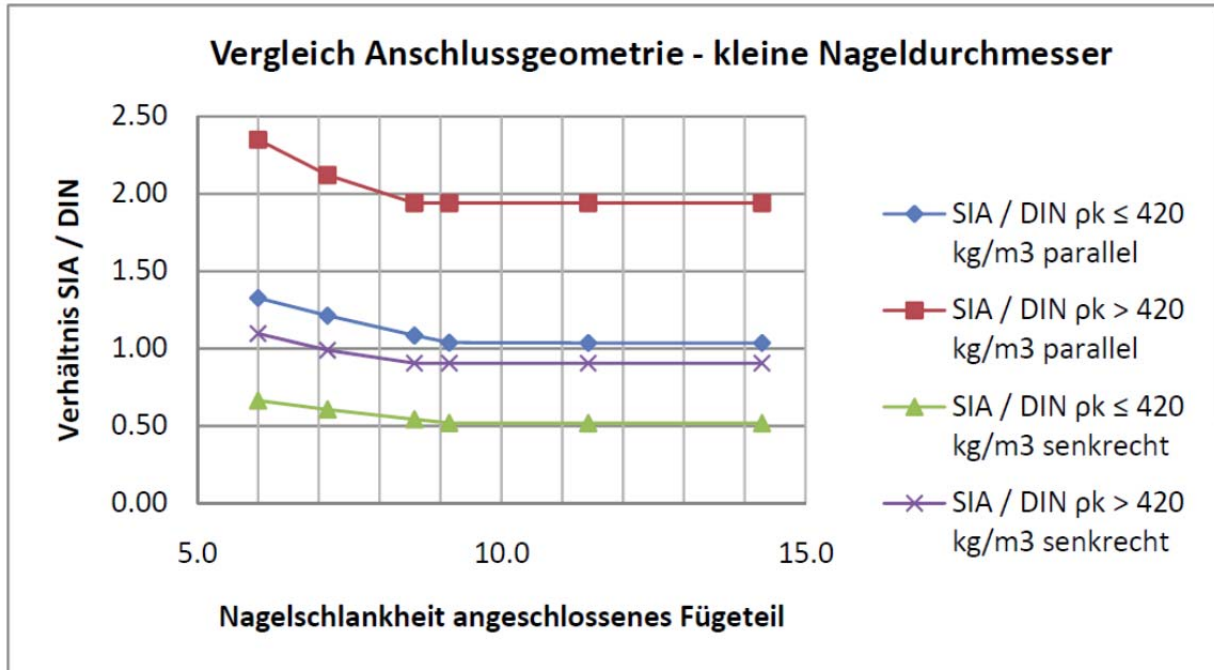


Abbildung 14: Vergleich von Anschlussgeometrie und Kraft / Anschlussfläche zwischen Norm SIA und DIN

Auswertung

$\rho_k \leq 420 \text{ kg/m}^3$

- Für $\rho_k \leq 420 \text{ kg/m}^3$ gilt gemäss der Norm SIA und der DIN die gleiche Regelung bezüglich Verbindungsmittelabständen parallel und senkrecht zur Faser für einen Lasteintrag parallel zur Faserrichtung.
- Ein optimales Tragverhalten wird gemäss Johansen erst ab einer Nagelschlankheit von $\lambda = 9$ erhalten. Dieser Wert ist in der DIN für die Anwendung des vereinfachten Verfahrens definiert mit $t_{req} = 9d$. Ab diesen Nagelschlankheiten entsprechen sich die Tragwiderstände gemäss Norm SIA und DIN für $n = 10$.
- Für Nägel mit $3.5 \text{ mm} \geq d \leq 4.5 \text{ mm}$ sind Nagelschlankheiten von $\lambda = 6$ bis 7 nach SIA (siehe auch Abbildung 7) ohne Abminderung zugelassen, da die Anforderungen an die Mindestholzdicken erfüllt sind (Tabelle 23). Die Kraft / Anschlussfläche beträgt in diesen Fällen gemäss der Norm SIA 25% mehr Last im Vergleich zu DIN. Für kleinere Nägel ist der Unterschied geringer, da die Regelung der absoluten Holzstärke von 24 mm zu berücksichtigen ist und zu Nagelschlankheiten von $\lambda = 6.8$ bis 8.6 für diese Durchmesser und zu weniger Unterschied in den Tragwiderständen führt.
- Für Lasten, die senkrecht zur Faserrichtung eingebracht werden, sind die Anforderungen der SIA an die Nagelabstände wesentlich strenger als nach DIN. Für $\rho_k \leq 420 \text{ kg/m}^3$ liegt die übertragbare Kraft / Anschlussfläche für die Norm SIA um den Faktor 2 tiefer im Vergleich zur DIN, da die erforderliche Anschlussfläche gemäss DIN um 50% geringer ist als parallel zur Faserrichtung. Dieses Ergebnis ist durch den Verlauf „SIA / DIN $\rho_k \leq 420 \text{ kg/m}^3$ senkrecht“ in Abbildung 14 dargestellt.

$\rho_k > 420 \text{ kg/m}^3$

- Für den Fall von Rohdichten $\rho_k > 420 \text{ kg/m}^3$ werden gemäss DIN viel grössere Verbindungsmittelabstände vorgeschrieben. Mit Verbindungsmittelabständen von $15d \times 7d$ (im Vergleich zu $10d \times 5d$ gemäss Norm SIA) erfolgt praktisch eine Verdopplung der Anschlussfläche (+110%). Die Laststeigerung beträgt auf Grund der höheren Lochleibungspressung bei diesen Rohdichten aber nur 12% bei $\lambda \geq 9$. Die übertragbare Kraft /

Anschlussfläche ist demzufolge gemäss Norm SIA um den Faktor 2 höher. Dieses Ergebnis ist durch den Verlauf „SIA / DIN $\rho_k > 420 \text{ kg/m}^3$ parallel“ Abbildung 14 dargestellt.

- Für eine Belastung senkrecht zur Faser und $\rho_k > 420 \text{ kg/m}^3$ ist die Situation dieselbe wie für den Fall $\rho_k \leq 420 \text{ kg/m}^3$, die angeschlossene Fläche ist gemäss der Norm SIA ($10d \times 5d$) und der DIN praktisch gleich gross ($7d \times 7d$) und führt zu hohen Anschlusskräften.

Die Verhältniszerte SIA / DIN > 1 stellen in Bezug auf SIA unsichere Werte dar. Betrachtungen an Anschlüssen mit grossen Nageldurchmessern und vorgebohrten Nägeln bestätigen diese Trends, ergeben aber keine neuen Erkenntnisse. Massnahmen kristallisieren sich für drei Fälle heraus: Anpassung der Mindestholzdicken, korrigieren einiger Randabstände, Ergreifen von Massnahmen für nicht vorgebohrte Nagelverbindungen in Holz mit einer Rohdichte von $\rho_k > 420 \text{ kg/m}^3$.

Ergebnisse aus den Vergleichsrechnungen

Bewährtes Nachweisverfahren

Bezüglich der verschiedenen Anforderungen bestehen beträchtliche Unterschiede zwischen der Norm SIA, der DIN und dem EC. Die vorliegenden Untersuchungen haben aber gezeigt, dass nur einige wenige Fälle kritisch sind. Besonders zu beachten sind für den Fall der Nagelverbindungen die Abstände zwischen den Verbindungsmitteln und zum belasteten Rand besonders für Holz hoher Rohdichte mit Lasteintrag parallel zur Faserrichtung für Holz-Holz Verbindungen. Infolge geringer Abstände zum unbelasteten Rand und teilweise geringen Anforderungen in Bezug auf die Holzdicken besteht zudem Unsicherheit bezüglich der Spaltgefahr.

Für Belastungen senkrecht zur Faserrichtung sowie für Stahl-Holz Verbindungen legt die Norm SIA eher konservative Vorgaben vor. Laststeigerungen fallen im Vergleich zu den Tragwiderständen von Holz-Holz Verbindungen bei Stahl-Holz Verbindungen bescheiden aus, wenn mit der DIN oder dem EC verglichen wird.

Die hohen Tragwiderstände eines einzelnen Verbindungsmittels in Holz-Holz und Stahl-Holz Verbindungen lassen sich durch Versuchswerte belegen. Die Korrektur der theoretischen Werte aus dem Modell basierend auf der Fliessgelenktheorie für stabförmige Verbindungsmittel durch einen Anteil Seilwirkung ergibt immer noch nicht die effektiv vorhandenen Tragwiderstände für Nagelverbindungen. Auch Holz-Holz Verbindungen mit langen, glattschaftigen Nägeln ergeben bei günstigen Anschlusskonfigurationen eine beträchtliche Seilwirkung, die in der DIN gar nicht und im EC nur in bescheidenem Mass berücksichtigt wird.

Der EC unterscheidet sich beträchtlich von der DIN was die Anwendung der Reduktion der Tragwiderstände bei mehreren Verbindungsmittel in Lastrichtung hintereinander betrifft und führt zu äusserst konservativen Werten. Die Regelung ist uneinheitlich und nicht nachvollziehbar. Die Vorgehensweise nach der DIN führt in vielen Fällen für praxisübliche Verbindungen annähernd zu einer Übereinstimmung mit der Norm SIA 265 für Anschlüsse mit 5 bis 10 Nägeln, die in Lastrichtung hintereinander angeordnet sind.

Eine Anpassung / Erhöhung der minimalen Holzdicke und auf $t = 9d$ hätte zur Folge, eine möglichst gute Übereinstimmung mit der DIN zu erhalten und geringe Schlankheiten der Verbindungsmittel zu vermeiden. Neben einer reduzierten Spaltgefahr stellen sich für grössere Nagelschlankheiten zudem günstige Versagensmechanismen ein. Korrekturen, um ein Anlehen an diese Norm zu erhalten erscheinen sinnvoll.

Kritisch ist weiter der Fall mit $\rho_k > 420 \text{ kg/m}^3$ bei einem Lasteintrag parallel zur Faserrichtung. Eine Revision der Ziffer 6.4.1.3 drängt sich auf und die Grenze zum Vorbohren müsste neu ab 420 kg/m^3 festgelegt werden. Dies betrifft gemäss Norm SIA 265 die Sortimente C45, GL36h und GL36k, die in hochbelasteten Ingenieurtragwerken zum Einsatz kommen, und bei denen

ein Vorbohren der Nägel eine gerechtfertigte Massnahme zur Qualitätssicherung darstellt. Verbindungen in Laubholz sind in jedem Fall vorzubohren. Zu beachten ist, dass gemäss DIN das BSH bezüglich der Verbindungsmittelabstände generell der Klasse $\rho_k \leq 420 \text{ kg/m}^3$ zugeordnet wird und enge Nagelabstände zulässt, die den Anforderungen der Norm SIA heute entsprechen. Die hohen Festigkeitsklassen von BSH würden damit im Vergleich zu DIN / EC ungünstiger behandelt, d.h. diese Verbindungen müssten vorgebohrt werden.

Aufgrund der Ergebnisse aus diesen Untersuchungen, und da das Nachweisverfahren gemäss SIA 265 bewährt und einfach anwendbar ist, bleibt die Ermittlung der Tragwiderstände für Nägel in der vorliegenden Form bestehen. Das heute gültige Verfahren zur Bemessung und Berechnung von Nagelverbindungen mit einigen Anpassungen beibehalten.

Anpassungen in der Norm SIA 265 in Bezug auf Nagelverbindungen

Allgemeines, Ziffer 6.4.1

Anforderungen an die Nägel

Die Angaben der Norm beziehen sich neu auf Nägel nach EN 14592. Ausser dem glattschäftigen Nagel mit $d = 8.5 \text{ mm}$ sind alle üblichen Nägel abgedeckt. Die Mindestzugfestigkeit des Stahls muss 600 N/mm^2 sowohl für glattschaftige als auch für Rillen- und Schraubnägel betragen.

Reduktionsbeiwert

Für alle stabförmigen Verbindungsmittel wird der Reduktionsbeiwert zur Berücksichtigung der Anschlussgrösse gleich definiert. Für die Ermittlung von k_{red} ist die Anzahl Verbindungsmittel, die in Lastrichtung hintereinander zu liegen kommen, massgebend. Bei Belastungen rechtwinklig zur Faserrichtung erfolgt keine Reduktion der Tragwiderstand. Es ist aber zu beachten, dass in diesen Fällen der Querschnittsnachweis im Holz massgebend sein kann. Für den Nachweis der gesamten Verbindung wird die gesamte Anzahl Verbindungsmittel n_{tot} betrachtet.

Vorbohren, Spaltgefahr

Holz mit einer charakteristischen Rohdichte von $\rho_k = 420 \text{ kg/m}^3$ ist generell vorzubohren. Durch diese Anpassung erübrigt sich die Nagelabstände von der Rohdichte des Holze abhängig zu machen. Betroffen sind durch diese Regelung nur gerade die Festigkeitsklassen C40 und hochfestes Brettschichtholz. Aufgrund der hohen Beanspruchungen solcher Sortimenten, die insbesondere im tragenden Ingenieurholzbau eingesetzt werden, sollte die Nagelverbindung im Sinn der Qualitätssicherung sowieso in jedem Fall vorgebohrt werden.

Nagelverbindungen ohne Vorbohren, Abscheren, Ziffer 6.4.2

Tragwiderstände

Die Gleichungen zur Ermittlung der Tragwiderstände bleiben unverändert. Eine Erhöhung der Tragwiderstände bei grösseren als geforderten Einschlagtiefen entfällt, was eine weitere Angleichung an die DIN mit sich bringt. Die Anforderungen an die Einschlagtiefen werden vereinheitlicht und praxisnaher gestaltet. Es gelten neu folgende Regelungen für alle Nageltypen sowohl für einschnittige als auch mehrschnittigen Verbindungen:

- erforderliche Einschlagtiefe, damit mit dem maximalen Tragwiderstand gerechnet werden kann: $s \geq 9d$
- minimale Einschlagtiefe, damit mit einem proportional reduzierten Tragwiderstand gerechnet werden kann: $s \geq 6d$

Holzdecken, Spaltgefahr

Zur Verminderung der Spaltgefahr, und damit günstigere Versagensmodi in den Verbindungen erreicht werden, wird in Tabelle 23 eine erforderliche Holzdicke von $9d$ vorgeschrieben. Diese kann mit gleichzeitiger, proportionaler Reduktion des Tragwiderstands auf $7d$ reduziert werden.

Weiter werden zur Verminderung der Spaltgefahr die Randabstände rechtwinklig zur Faserrichtung zum beanspruchten und unbeanspruchten Rand beinahe verdoppelt. Damit werden die bisherigen, viel zu geringen Vorgaben der Norm SIA korrigiert und die Anforderungen der DIN und des EC übernommen. Da nur die Randbereiche einer Verbindung betroffen sind, wirkt sich diese Regelung nicht ungünstig auf den Entwurf des Anschlusses aus.

Gebrauchstauglichkeit

Keine Änderung zur bestehenden Ausgabe der Norm SIA 265.

Nagelverbindungen ohne Vorbohren, Ausziehen, Ziffer 6.4.2.3**Tragwiderstände**

Inhaltlich erfolgen keine Neuerungen. Die Rand- und Einsatzbedingungen wurden präzisiert und aktualisiert. Ebenso wurde die Schreibweise an die bestehenden Regeln angepasst. Der Tragwiderstand von Nägeln in Schaftrichtung kann unter Verwendung der Ausziehparameter und Kopfdurchziehparameter gemäss Herstellerangaben erfolgen, um dem teilweise günstigeren Tragverhalten von speziellen Produkten Rechnung zu tragen.

Nagelverbindungen mit Vorbohren, Abscheren, Ziffer 6.4.3**Tragwiderstände und Gebrauchstauglichkeit**

Die Anpassungen entsprechen denjenigen der Nagelverbindungen ohne Vorbohren. Zur Verminderung der Spaltgefahr, und damit günstigere Versagensmodi in den Verbindungen erreicht werden, wird in Tabelle 28 eine erforderliche Holzdicke von $9d$ vorgeschrieben. Diese kann mit gleichzeitiger Reduktion des Tragwiderstands auf $4d$ reduziert werden.

Zur Verminderung der Spaltgefahr werden die Randabstände parallel zur Faserrichtung zum beanspruchten Rand um 20% vergrössert.

Literatur

- [1] Norm SIA 265 „Holzbau“, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2003-03, Zürich
- [2] DIN 1052:2004 Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken: Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau. Deutsche Fassung ed. 2004, Berlin, Deutschland: Deutsches Institut für Normung
- [3] Erläuterung zu DIN 1052:2004-08: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken, 2. Auflage März 2005, München, DGfH Innovations und Service GmbH
- [4] Europäisches Komitee für Normung CEN, EN 1995-1-1: EC 5:2004 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau. 2004, CEN, Brüssel, Belgien
- [5] Sigrist C., Verbindungen I, Systematisierung von Verbindungsmitteln und Darstellung ihres Tragverhaltens als Grundlage für die Bemessung von Anschlüssen, Einführungskurs SIA 265, Dokumentation D 0185, p 109 – 125, Zürich, 2003
- [6] Sigrist C., Bemessung von Nagelverbindungen, Verbindungstechniken im Holzbau, 32. SAH Fortbildungskurs, 15. - 16. November 2000
- [7] Sigrist, C., Nailed joints in engineered timber structures using Australian hardwoods, PhD Theses, School of Civil Engineering, University of Technology, Sydney, Australia, 1992

