

Vorlesung Holzbau I



DIN EN 1995-1-1 Eurocode 5:2010-12
DIN EN 1995-1-1 Nationaler Anhang:2013-08
DIN EN 1995-1-1/A2:2014-07

Teil 1
Baustoffeigenschaften
Querschnittsnachweise
Stabilität

Ab 02/2020

Inhaltsverzeichnis Teil 1 - Baustoffeigenschaften, Querschnittsnachweise und Stabilität

Beispielverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
Vorwort.....	5
1 Holz als Baustoff.....	7
1.1 Einleitung	7
1.2 Die Holzstruktur	7
1.3 Rohdichte	8
1.4 Holz und Feuchte.....	9
1.5 Schwinden und Quellen	10
1.6 Feuchte und mechanische Eigenschaften	11
1.7 Langzeitbelastung	12
2 Holzeigenschaften nach den Normen	15
2.1 Nutzungsklassen NKL.....	15
2.2 Bemessungswerte der Festigkeiten für die Nutzungsklassen 1 und 2 bei Beanspruchung parallel und rechtwinklig zur Faserrichtung	16
2.3 Bemessungswerte der Druckfestigkeiten für die Nutzungsklassen 1 und 2 bei Beanspruchung unter einem Winkel α zur Faserrichtung.....	20
3 Querschnittsnachweise für Zug parallel zur Faserrichtung des Holzes.....	21
3.1 Querschnittsschwächungen bei der Berechnung der Nettoquerschnittsfläche	21
3.2 Besondere Regeln für Querschnittsnachweise von Hölzern in Zugverbindungen	22
4 Querschnittsnachweise für Druck	27
4.1 Druck parallel zur Faserrichtung des Holzes	27
4.2 Regeln für die Bestimmung der Nettoquerschnittsfläche bei Druckbeanspruchung:	27
4.3 Druck rechtwinklig zur Faserrichtung des Holzes.....	28
4.4 Druck unter einem Winkel zur Faserrichtung des Holzes	29
5 Querschnittsnachweise für Biegung.....	31
5.1 Regeln für die Bestimmung der Nettoquerschnittswerte bei Biegebeanspruchung:	31
5.2 Biegung ohne Normalkraft	31
5.3 Biegung mit Zugkraft	34
5.4 Biegung mit Druckkraft	34
6 Querschnittsnachweise für Schub.....	37
6.1 Schub aus Querkraft bei einachsiger Biegung	37
6.2 Regeln für die Bestimmung der reduzierten Querkraft bei Auflagern.....	37
6.3 Schub aus Querkraft bei zweiachsiger Biegung	38
6.4 Schub aus Torsion	38
6.5 Schub aus Querkraft und Torsion.....	38
7 Stabilitätsnachweis von Druckstäben (Biegeknicken nach Ersatzstabverfahren).....	41
7.1 Bestimmung des Schlankheitsgrades	41
7.2 Berechnung des Knickbeiwertes	41

7.3	Regeln für den Nachweis der Knickstabilität eines Druckstabes	41
8	Stabilitätsnachweis von Biegestäben ohne Normalkraft (Biegedrillknicken/Kippen nach Ersatzstabverfahren)	49
8.1	Biegestäbe mit Rechteckquerschnitt ohne Normalkraft	49
8.2	Regeln für den Nachweis der Kippstabilität	51
9	Stabilitätsnachweis von Biegestäben mit Normalkraft nach Ersatzstabverfahren.....	55
9.1	Stäbe mit Rechteckquerschnitt durch Biegung und Druckkraft belastet.....	55
9.2	Stäbe mit Rechteckquerschnitt durch Biegung und Zugkraft beansprucht	55
	Literaturverzeichnis.....	61
	Stichwortverzeichnis	63

Beispielverzeichnis

Beispiel 1-1	Veränderung der Querschnittsabmessungen durch Trocknung	10
Beispiel 3-1	Zugbelasteter Laschenstoß aus Nadelvollholz C24	24
Beispiel 3-2	Zugstab aus GL24h mit innen liegender Stahllasche und Stabdübeln	25
Beispiel 4-1	Druckbelasteter C30-Querschnitt mit zwei Bohrungen.....	27
Beispiel 4-2	Auflager- und Schwellendruck auf GL28h rechtwinklig zur Faserrichtung	29
Beispiel 4-3	Druck auf GL28h-Querschnitt unter Winkel α zur Faser	30
Beispiel 5-1	C30-Querschnitt mit zwei Stabdübeln unter einachsiger Biegung.....	32
Beispiel 5-2	Zweiachsige Biegung an einem Rechteckquerschnitt aus GL32c	33
Beispiel 5-3	C30-Querschnitt mit zwei Stabdübeln unter einachsiger Biegung mit Zug.....	35
Beispiel 5-4	Zweiachsige Biegung mit Druckkraft an einem Rechteckquerschnitt GL32c.....	36
Beispiel 6-1	Nachweis der Schubspannungen an Träger GL28c aus reduzierter Auflagerkraft...	39
Beispiel 7-1	Stabilitätsnachweis einer quadratischen Vollholzstütze C30	45
Beispiel 7-2	Stabilitätsnachweis einer Stützenreihe GL28h	46
Beispiel 8-1	Stabilitätsnachweis eines GL24h-Trägers unter einachsiger Biegung	53
Beispiel 8-2	Vollholzbalken C24 unter zweiachsiger Biegung	54
Beispiel 9-1	Biegung und Druck in einem Einfeldträger GL24h.....	56
Beispiel 9-2	Biegung und Druck in den GL24h-Pfosten einer Außenwand	57

Tabellenverzeichnis

Tab. 1-1	Änderung der Holzeigenschaften bei Änderung der Holzfeuchte	12
Tab. 1-2	Modifikationsbeiwerte k_{mod}	13
Tab. 2-1	Verformungsbeiwerte k_{def} in NKL 1 und 2	16
Tab. 2-2	Teilsicherheitsbeiwerte γ_M	16
Tab. 2-3	Festigkeitswerte $f_m / f_{t,0} / f_{t,90} / f_{c,0} / f_{c,90} / f_v$ für Nadelvollholz	17
Tab. 2-4	Erhöhungswerte k_h Biege-/Zugfestigkeit für Vollholz aus Nadelholz	17
Tab. 2-5	Steifigkeiten E, G und Rohdichten ρ für Vollholz aus Nadelholz	17
Tab. 2-6	Festigkeitswerte $f_m / f_{t,0} / f_{t,90} / f_{c,0} / f_{c,90} / f_v$ für Brettschichtholz	18
Tab. 2-7	Erhöhungswerte k_h Biege-/Zugfestigkeit für Brettschichtholz	18
Tab. 2-8	Steifigkeiten E, G und Rohdichten ρ für Brettschichtholz	19
Tab. 2-9	Druckfestigkeiten $f_{c,\alpha,d}$ für Nadelvollholz und Brettschichtholz	20
Tab. 4-1	Beiwerte $k_{c,90}$	28
Tab. 6-1	Formbeiwerte k_{shape} für Schubspannungen aus Torsion in Rechteckquerschnitten	38
Tab. 7-1	Knickbeiwerte k_c für Nadelvollholz und Brettschichtholz	42
Tab. 7-2	Knicklängen l_{ef} bei Einzelstabknicken	43
Tab. 7-3	Knicklängen l_{ef} bei Kehlbalkendächern und Fachwerkstäben	43
Tab. 7-4	Knicklängen l_{ef} bei Stützenreihen, Bögen und Rahmen	44
Tab. 8-1	Materialkonstante κ_m und Grenzwerte für den Kippbeiwert $k_{\text{crit}} = 1$	51
Tab. 8-2	Kippbeiwerte k_{crit}	51
Tab. 8-3	Ersatzstablängen l_{ef} beim Kippnachweis	52

Vorwort

Das vorliegende zweiteilige Skript soll die Lehrveranstaltung Holzbau I im Bachelorstudiengang Bauingenieurwesen unterstützen. Begleitend zum Vorlesungsskript stehen eine Sammlung von Übungsaufgaben und die dazu gehörigen Musterlösungen zur Verfügung. Themenschwerpunkte von Teil 1 sind Querschnittsnachweise und Stabilitätsnachweise nach dem Ersatzstabverfahren. Teil 2 enthält die konstruktiven Regeln und Tragfähigkeitsnachweise für stiftförmige Verbindungsmittel.

Der Stand der zugrundeliegenden technischen Baubestimmungen entspricht DIN EN 1995-1-1:2010-12 [DIN 1] (EC5) einschließlich der Änderungen A1 und A2 [DIN 3] und DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08 [DIN 2], Nationaler Anhang zu EC5.

Das Skript und die zugehörigen Übungsaufgaben werden in unregelmäßigen Abständen möglichst zeitnah überarbeitet, da sich die Regelungen für den Holzbau im Umbruch befinden.

Berlin, Februar 2020

Prof. Ralf-W. Boddenberg

1 Holz als Baustoff

1.1 Einleitung

Die folgenden Ausführungen zum Werkstoff Holz sind [2] entnommen. Holz ist ein natürlicher, organischer, aus Zellen aufgebauter Stoff. Er ist ein Verbund aus einem chemischen Komplex aus Zellulose, Hemizellulose, Lignin und Inhaltstoffen. Holz ist ein *anisotroper* Werkstoff, hauptsächlich wegen des länglichen Aufbaus der Holzzellen und der Orientierung der Zellwände. Zusätzlich resultiert die Anisotropie aus den unterschiedlichen Zellgrößen während einer Wachstumsperiode und teilweise aus einer bevorzugten Richtung bestimmter Zelltypen (z.B. Holzstrahlen).

Die Feinstruktur der Zellwände, die Zellansammlung im fehlerfreien Holz und die Wuchsunregelmäßigkeiten von Bauholz stellen die drei strukturellen Stufen dar, die alle einen großen Einfluss auf die Eigenschaften des Holzes als Baustoff haben. So erklärt der Aufbau der Zellwände unter anderem, dass *Schwinden* und *Quellen* rechtwinklig zur Faserrichtung in der Regel 10- bis 20-mal größer ist als in Faserrichtung. Der mikroskopische Aufbau des fehlerfreien Holzes begründet die 20- bis 40-fach höhere Steifigkeit des Holzes in Längsrichtung bezogen auf die Querrichtung. Die Makrostruktur (Äste, Faserneigung) gibt Aufschluss über die Zugfestigkeit in Faserrichtung, die von über 100 N/mm^2 bei fehlerfreiem Holz auf unter 10 N/mm^2 bei Bauholz geringer Qualität zurückgehen kann.

1.2 Die Holzstruktur

Holz erhält man aus zwei Hauptgruppen von Pflanzen, die als Laub- oder Harthölzer und Nadel- oder Weichhölzer bezeichnet werden.

Beobachtungen an Holz ohne optische Hilfsmittel zeigen nicht nur Unterschiede zwischen Laub- und Nadelholz und zwischen den Holzarten, sondern auch Unterschiede innerhalb einer Holzart, z. B. Kern- und Splintholz, Früh- und Spätholz, Porenanordnung und das Auftreten von Reaktionsholz. Diese Erscheinungen sind Folge der Entwicklung und des Wachstums des Holzgewebes. Nadel- und Laubhölzer haben unterschiedliche Zelltypen.

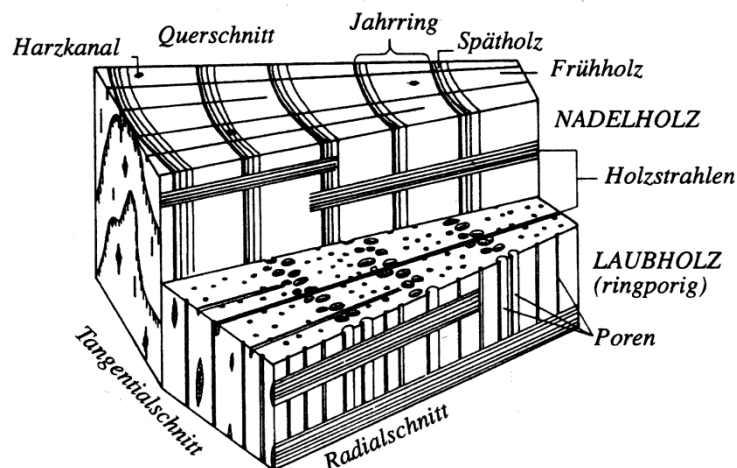


Abb. 1-1 Modelle eines Nadel- und Laubholzkeiles zeigen die Hauptebenen der Anisotropie (Fengel und Wegener, 1984)

Jahrringe

Bei den meisten Nadelhölzern und ringporigen Laubhölzern besteht eine Korrelation zwischen Jahrringbreite und Rohdichte. Nadelholz neigt dazu, Spätholzringe relativ konstanter Dicke mit hoher Rohdichte zu erzeugen. Die wesentlichen Änderungen in der Jahrringbreite werden durch die Frühholzringe mit niedriger Rohdichte hervorgerufen. Daher nimmt bei den meisten Nadelhölzern die

Rohdichte mit zunehmender Jahrringbreite ab. Dies erklärt, warum die Jahrringbreite in den in Europa verwendeten Sortiervorschriften als Sortierparameter aufgenommen wurde. Dennoch sollte man bei der Anwendung dieses Zusammenhanges vorsichtig sein. Die Rohdichte hängt für eine bestimmte Jahrringbreite vom Boden, den klimatischen Bedingungen, waldbaulicher Praxis etc. ab. Daher lässt sich für das übliche Bauholz aus Nadelholz die Rohdichte aus der Jahrringbreite nur ungenau abschätzen.

Splintholz und Kernholz

Die jüngeren äußeren Bereiche eines Baumstammes leiten den Saftfluss von der Wurzel aufwärts zur Baumkrone. Dieser Teil des Stammes wird als *Splintholz* bezeichnet. Mit dem Altern der Zellen stellen sie ihre physiologische Funktion ein; diesen inneren Bereich des Stammes bezeichnet man als Kernholz.

Bei den meisten Holzarten ist das *Kernholz* durch Einlagerungen von Kernstoffen dunkler gefärbt. Durch diese Stoffe ist Kernholz widerstandsfähiger gegen Fäulnis und Holz zerstörende Insekten. Bei der Bildung von Kernholz reduziert sich in der Regel die Holzfeuchte erheblich. Bei vielen Laubholzarten verschließen sich die Gefäße. Dies hat eine deutliche Abnahme der Durchlässigkeit zur Folge. Bei einigen Holzarten (z. B. Fichte, Buche) ist das Kernholz nicht gefärbt. Trotzdem bewirken die Kernstoffe und physikalischen Veränderungen einen Unterschied zwischen Kern- und Splintholz.

Drehwuchs

Einige Bäume bilden um den Baumstamm spiralförmige Zellen aus. Dieser *Drehwuchs* ist bei manchen Hölzern verbreitet, in anderen tritt er selten auf. Er kommt besonders in jungen Bäumen vor. Holz, das aus diesen Bäumen herausgeschnitten wurde, weist oft Faserabweichungen auf, die es für Bauzwecke unbrauchbar machen. In den meisten visuellen Sortiervorschriften werden Grenzwerte der Faserabweichung angegeben; dabei wird üblicherweise eine Faserabweichung von bis 1 zu 10 bei Holz hoher Qualität und bis 1 zu 5 bei Holz geringer Qualität akzeptiert.

Äste

Äste sind die Teile der Zweige, die im Hauptstamm des Baumes eingebettet sind. Der Seiten-Ast ist mit der Markröhre des Hauptstammes verbunden. Wenn der Stammumfang wächst, umhüllen die nachfolgenden Jahrringe den Stamm und die Äste und ein kegelförmiger Bereich von Astholz, ein verwachsener Ast, entsteht. Diese Äste bezeichnet man als feste Äste, da sie mit dem umgebenden Holz fest verwachsen sind. An einigen Stellen sterben die Äste ab oder brechen ab. Dann schließen die nachfolgenden Jahrringe den toten Aststumpf lediglich ein, und der tote Teil des Astes wird Totast genannt. Er ist nicht fest eingewachsen und wird daher auch als Durchfallast, der häufig auch Rinde mit einschließt, bezeichnet.

Nadelholzbäume sind durch einen dominanten Stamm gekennzeichnet, von dem in regelmäßigen Abständen oder Knoten seitliche Äste ausgehen (Astquirl). Nadelholzbretter zeigen daher Astansammlungen, die durch astfreies Holz getrennt sind. Im Hinblick auf die mechanischen Eigenschaften sind Äste der bedeutendste Holzfehler.

1.3 Rohdichte

Die *Rohdichte* ist die wichtigste physikalische Charakteristik des Holzes. Die meisten mechanischen Holzeigenschaften wie auch die Tragfähigkeit von Verbindungen sind positiv mit der Rohdichte korreliert. Daher sind Rohdichtegrenzwerte für die Festigkeitsklassen nach prEN 338 "Bauholz -Festigkeitsklassen" angegeben.

Die Rohdichte ist definiert als:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.1)$$

Dabei ist m die Masse (kg) des Holzes und V das Volumen (m^3). Die Rohdichte ist von der Holzfeuchte abhängig, da die Feuchte die Masse vergrößert und das Volumen aufquellen lässt. Die Rohdichte ρ_ω bei einer Holzfeuchte $\omega[\%]$, wird ausgedrückt durch:

$$\rho_\omega = \frac{m_\omega}{V_\omega} = \frac{m_0 \cdot (1 + 0,01 \cdot \omega)}{V_0 \cdot (1 + 0,01 \cdot \beta_V \cdot \omega)} = \rho_0 \cdot \frac{1 + 0,01 \cdot \omega}{1 + 0,01 \cdot \beta_V \cdot \omega} \quad (1.2)$$

m_0, V_0, ρ_0 Masse, Volumen und Rohdichte in völlig trockenem Zustand

$m_\omega, V_\omega, \rho_\omega$ Masse, Volumen und Rohdichte bei Feuchtegehalt ω

$\beta_V = \frac{\text{Ausdehnung} [\%]}{\text{Feuchteänderung} [\%]}$ Volumenausdehnungskoeffizient

Quellen tritt nur dann auf, wenn Wasser in die Zellwände eindringt. Die Feuchte, bei der die Zellwände gesättigt sind, wird *Fasersättigungspunkt* ϖ_f genannt. Dieser liegt bei einem Feuchtegehalt von etwa 28%. Darüber tritt kein weiteres Quellen mehr auf. Unterhalb des Fasersättigungspunktes kann für die praktische Anwendung Quellen und Schwinden linear zum Feuchtegehalt angenommen werden.

In der Holztechnologie und im Ingenieurholzbau werden hauptsächlich die

- Darr-Rohdichte ρ_0 und die
- Rohdichte bei 12% Holzfeuchte ρ_{12} verwendet.

Die Rohdichtewerte beziehen sich auf Masse und Volumen bei der Gleichgewichtsfeuchte ρ_{12} , die sich bei einer Temperatur von 20°C und einer relativen Luftfeuchte von 65% einstellt.

Die Rohdichte von Holz streut in weiten Grenzen, selbst wenn eine Stichprobe aus einem einzigen Wuchsgebiet entnommen wurde. In prEN 338 "Bauholz–Festigkeitsklassen" sind charakteristische Rohdichtewerte für Nadelholz zwischen 290 kg/m³ für die niedrige Festigkeitsklasse C14 und 420 kg/m³ für die höchste Festigkeitsklasse C40 definiert. Bei der visuellen Holzsortierung ist die Bestimmung der Jahrringbreite nur von eingeschränkter Aussagekraft.

1.4 Holz und Feuchte

Der *Holzfeuchtegehalt* ist definiert als das Verhältnis aus der Masse des ausgetretenen Wassers m_w und der Masse des trockenen Holzes m_0 . Die Trockenmasse wird durch Trocknung im Ofen bei $103^\circ \pm 2^\circ\text{C}$ erhalten. Die Holzfeuchte kann als Bruch oder in Prozent ausgedrückt werden. Üblich ist die Angabe der Holzfeuchte in Prozent.

$$\omega(\%) = \frac{m_w}{m_0} \cdot 100 = \frac{m_\omega - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad (1.3)$$

m_w Masse des ausgetretenen Wassers

m_ω Masse bei Feuchtegehalt ω

m_0 Masse des trockenen Holzes

Da Holz hygroskopisch ist, tauscht es kontinuierlich Feuchte mit der Umgebung aus. Für jede Kombination aus Temperatur und Feuchte der umgebenden Luft gibt es eine zugehörige Holzfeuchte, bei der die ins Holz gehende Diffusion der Feuchte im Gleichgewicht mit der aus dem Holz austretenden Diffusion ist. Diese Feuchte wird als *Gleichgewichtsfeuchte* ϖ_w bezeichnet. Jedoch befindet sich Holz

selten exakt im Zustand der Gleichgewichtsfeuchte, da sich die klimatischen Verhältnisse der Umgebung ständig ändern. Der Feuchtegehalt und sogar die Größe und Geschwindigkeit des Feuchtetransportes haben einen großen Einfluss auf fast alle für den Ingenieur wichtigen Eigenschaften des Holzes.

1.5 Schwinden und Quellen

Feuchte weist eine solche Affinität zur Substanz der Holzzellwand auf, dass sie sich ihren Weg in dieses eigentlich nicht poröse Material erzwingen kann. Das daraus resultierende Quellen der Zellwand kann für praktische Anwendungen als Äquivalent zum Volumen des aufgenommenen Wassers angenommen werden. Beim Quellen bleibt das Volumen der Zellhohlräume konstant. Daraus ergibt sich, dass das volumenmäßige Quellen von Holz gleich dem Volumen des aufgenommenen Wassers ist. Tritt Feuchte aus der Zellwand aus, schwindet das Holz. Schwinden und Quellen innerhalb der üblichen Feuchteänderungen in Holzkonstruktionen werden als *feuchtebedingte Verformungen* bezeichnet.

Diese richtungsabhängigen Verformungen des Holzes hängen vor allem von der Faserrichtung ab. Fast alle feuchtebedingten Verformungen treten in Querrichtung auf. Die Anisotropie zwischen feuchtebedingten Quer- und Längsverformungen liegen in der Größenordnung von 20 zu 1. Auch in Querrichtung besteht bezüglich der Feuchteabhängigkeit des Holzes eine Anisotropie. *Tangentiale feuchtebedingte Verformungen* können praktisch doppelt so groß wie *radiale* angenommen werden. Für die ingenieurmäßige Anwendung ist es jedoch unnötig zwischen den beiden Querrichtungen zu unterscheiden, so dass feuchtebedingte Verformungen in Querrichtung oft als Mittelwert genommen werden.

Die Abmessungen des Holzes verändern sich linear mit der Feuchte im Bereich zwischen 5% und 20% Holzfeuchtegehalt. In diesem Bereich können feuchtebedingte Verformungen berechnet werden aus

$$h_2 = h_1 \cdot \frac{[100 + \beta \cdot (\varpi_2 - \varpi_1)]}{100} \quad (1.4)$$

h_1 Querschnittsabmessungen bei einem Holzfeuchtegehalt ϖ_1

h_2 Querschnittsabmessungen bei einem Holzfeuchtegehalt ϖ_2

β Quell- oder Schwindmaß in Prozent je Prozent Feuchteänderung

Für die meisten Holzarten wie Fichte, Tanne, Kiefer, Lärche, Pappel und Eiche können für die ingenieurmäßige Anwendung die *Ausdehnungskoeffizienten*

- in Längsrichtung $\beta_0 = 0,01$ und

- in Querrichtung $\beta_{90} = 0,2$

verwendet werden. Für Holzarten mit sehr hohen Dichten wie Buche und Bongossi sollte in Querrichtung $\beta_{90} = 0,3$ verwendet werden.

Beispiel 1-1 Veränderung der Querschnittsabmessungen durch Trocknung

Ein Vollholzquerschnitt aus Nadelholz mit den ursprünglichen Querschnittsabmessungen von 100/240 mm wird mit einer Holzfeuchte von 22% eingebaut und in einem Umgebungsklima der NKL 1 verwendet. Welche Höhe weist der Querschnitt nach Eintreten der Gleichgewichtsfeuchte auf?

$\beta_{\text{NH}} = 0,24\%/%$	Schwind- und Quellmaß von Nadelholz
$\varpi_1 = 22\%$	Einbaufeuchte
$\varpi_2 = 12\%$	mittlere Ausgleichsfeuchte bei NKL 1
$h_1 = 240 \text{ mm}$	Querschnittshöhe bei Einbau

$$h_2 = h_1 \cdot \frac{[100 + \beta \cdot (\varpi_2 - \varpi_1)]}{100}$$

$$h_2 = 240 \cdot \frac{100 + 0,24 \cdot (12 - 22)}{100} = 240 \cdot \underbrace{0,976}_{\text{Schwinden um 2,4\%}} = 234,2 \text{ mm}$$

Der Querschnitt schwindet um 2,4% in Höhe und Breite. Die Höhe bei Gleichgewichtsfeuchte ist um ca. 6 mm geringer als beim Einbau

Ende Beispiel 1-1 Veränderung der Querschnittsabmessungen durch Trocknung

Wird die Ausdehnung des Holzes behindert (z. B. in Stabdübelverbindungen) erzeugt die Feuchteaufnahme innere Kräfte. Bedingt durch das viskoelastische/plastische Verhalten des Holzes werden solche Spannungen eventuell abgebaut und es treten irreversible Dimensionsänderungen auf. Kehrt das Holz zu seiner ursprünglichen Feuchte zurück, sind die Abmessungen geschrumpft und die Stabdübelverbindung hat ihre Passgenauigkeit und somit einen Teil ihrer Tragfähigkeit verloren. Es ist deshalb bei der Bemessung wichtig, den Zugang zu solchen Konstruktionsdetails, die Nachspannen benötigen könnten, zu ermöglichen.

Um die Probleme der feuchtebedingten Verformungen zu minimieren, sollte Holz immer mit einem Feuchtegehalt möglichst entsprechend der später zu erwartenden Gleichgewichtsfeuchte eingebaut werden. Holz mit einem Feuchtegehalt von über 20-22% sollte nur dann eingebaut werden, wenn entsprechend schnelle Trocknung der Konstruktion ohne Gefahr des biologischen Abbaus oder bleibenden Verformungen durch Kriechen möglich ist.

Im Falle großer Bauteile aus Holz ist es nicht immer möglich, die *longitudinalen Verformungen* infolge Feuchteänderungen zu vernachlässigen. Wenn sich z. B. der Feuchtegehalt im oberen und unteren Teil eines Brettschichholzträgers unterscheidet, führt dies zu erheblichen Krümmungen. Ein Dachbalken, der in die Isolierung eingebettet ist, kann während des Winters dem warmen trockenen Klima des geheizten Raumes auf seiner Unterseite und dem unbeheizten Dachboden auf seiner Oberseite ausgesetzt sein, was ebenfalls zu einer ungewünschten Krümmung führt.

1.6 Feuchte und mechanische Eigenschaften

Die mechanischen Eigenschaften des Holzes hängen von der Feuchte ab.

Eine Feuchtezunahme bewirkt eine Verringerung der Festigkeits- und Steifigkeitswerte.

Dieser Effekt wird teilweise durch das Quellen der Zellwand erklärt, wodurch weniger Zellwandmaterial pro Flächeneinheit zur Verfügung steht. Wichtiger jedoch ist, dass Wasser in die Zellwand eindringt und die Wasserstoffbindungen, durch die die Zellwand zusammengehalten wird, schwächt. Feuchteänderungen über dem Fasersättigungspunkt haben keinen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften, da dann nur noch freies Wasser in die Zellhohlräume eingelagert wird.

Die Auswirkung von Feuchteänderungen auf die verschiedenen mechanischen Eigenschaften ist unterschiedlich. So wird zum Beispiel das Versagen bei Druckbeanspruchung in Faserrichtung durch ein Ausknicken der Fasern verursacht. Andererseits bedeutet Zugversagen in Faserrichtung ein Abreißen der Zellwände. Die Druckfestigkeit reagiert daher empfindlicher auf Feuchte als die Zugfestigkeit.

Werte für die Auswirkung der Feuchte auf die mechanischen Eigenschaften von fehlerfreiem Holz sind in der folgenden Tabelle gegeben. Für die praktische Anwendung kann ein linearer Zusammenhang zwischen dem Feuchtegehalt von 8% bis 20% und den Holzeigenschaften angenommen werden.

Festigkeitseigenschaft	Änderung
Druckfestigkeit in Faserrichtung	6 %
Druckfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung	5 %
Biegefestigkeit in Faserrichtung	4 %
Zugfestigkeit in Faserrichtung	2,5 %
Zugfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung	2 %
Schubfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung	2,5 %
Elastizitätsmodul in Faserrichtung	1,5 %

Tab. 1-1 Änderung der Holzeigenschaften bei Änderung der Holzfeuchte

1.7 Langzeitbelastung

Holz zeigt unter Belastung einen erheblichen Verlust seiner Festigkeit im Laufe der Zeit.

Die Festigkeitswerte, die bei der Bemessung von Holzbauteilen unter ständigen Lasten verwendet werden, liegen nur bei etwa 60% der Festigkeitswerte, die in Kurzzeitversuchen im Labor ermittelt werden.

Der Hintergrund für diesen Modifikationsfaktor von 0,60 geht in die späten vierziger Jahre zurück. Auf der Grundlage von Versuchen an kleinen, fehlerfreien Proben, die bis zu sieben Jahren einer Biegebeanspruchung ausgesetzt waren, wurde ein Zusammenhang zwischen Festigkeit und Lebensdauer ermittelt. Damit kann die Festigkeit nach 10 Jahren als etwas weniger als 60% der Kurzzeitfestigkeit vorhergesagt werden. Die meisten Länder haben seither in ihre Bemessungsnormen diesen Modifikationsfaktor nicht nur für Biegung sondern auch für alle anderen Festigkeitseigenschaften, Qualitäten und Holzarten übernommen.

Die Holzfeuchte hat einen erheblichen Einfluss auf das *Langzeitverhalten*. Beim gleichen Verhältnis aus Langzeit- zur Kurzzeitfestigkeit versagen Träger mit hoher Feuchte früher als Träger mit geringer Holzfeuchte. Natürlich waren die trockeneren Träger einer höheren Belastung ausgesetzt, da ihre Kurzzeitfestigkeit entsprechend höher ist.

Feuchteänderungen vergrößern erheblich das Kriechen von Holz.

Das Langzeitverhalten von Plattenwerkstoffen variiert in einem weiten Bereich. Für Sperrholz wird ein ähnliches Verhalten wie bei Holz angenommen. Das Verhalten von Spanplatten ist eng mit der Spangröße und -orientierung verbunden und für Span- und Faserplatten ist die Leimqualität von größter Bedeutung für die Langzeiteigenschaften. Während für die besten Spanplattenprodukte ein Modifikationsfaktor von 0,4 für ständige Belastung angenommen werden kann, werden Faserplatten mit bis zu 0,2 eingestuft.

Bei der Bemessung von Holzbauteilen wird der Einfluss von Holzfeuchte und Lasteinwirkungsdauer berücksichtigt, indem die Konstruktion in *Nutzungsklassen* und *Klassen der Lasteinwirkungsdauer* (KLED) eingeordnet wird. Der Einfluss von Holzfeuchte und Lasteinwirkungsdauer auf die Bemessungswerte der Festigkeit werden durch den *Modifikationsbeiwert* k_{mod} berücksichtigt.

	Vollholz und BSH Balkenschichtholz Furnierschichtholz (LVL) Brettsperrholz Sperrholz Massivholzplatten	Kunstharzgebundene Spanplatten DIN EN 312					
		Typ P4, P5	Typ P5	Typ P6, P7	Typ P7		
KLED	NKL 1 und 2	NKL 1	NKL 2	NKL 1	NKL 2		
ständig	0,60	0,30	0,20	0,40	0,30		
lang	0,70	0,45	0,30	0,50	0,40		
mittel	0,80	0,65	0,45	0,70	0,55		
kurz	0,90	0,85	0,60	0,90	0,70		
sehr kurz	1,10	1,10	0,80	1,10	0,90		
	OSB-Platten nach DIN EN 300			Zementgebundene Spanplatten	Gipsplatten (GKB ¹⁾ , GKF ¹⁾ , GKBI und GKFI DIN 18180) Gipsfaserplatten (DIN EN 15283-2)		
	OSB/2 ¹⁾	OSB/3, OSB/4					
KLED	NKL 1	NKL 1	NKL 2	NKL 1	NKL 2	NKL 1	NKL 2
ständig	0,30	0,40	0,30	0,30	0,20	0,20	0,15
lang	0,45	0,50	0,40	0,45	0,30	0,40	0,30
mittel	0,65	0,70	0,55	0,65	0,45	0,60	0,45
kurz	0,85	0,90	0,70	0,85	0,60	0,80	0,60
sehr kurz	1,10	1,10	0,90	1,10	0,80	1,10	0,80
1) nur in NKL 1							

Tab. 1-2 Modifikationsbeiwerte k_{mod}

2 Holzeigenschaften nach den Normen

2.1 Nutzungsklassen NKL

Das Umgebungsklima beeinflusst die sich einstellende Ausgleichsfeuchte des Holzes. Eine Vereinfachung für den Tragwerksplaner ist die Einführung von nur drei *Nutzungsklassen*.

Nutzungsklasse 1: Bauteile, die in einem dauerhaften, geschlossenen Baukörper gegenüber dem Außenklima geschützt sind. Das trifft vor allem auf Bauteile in allseitig geschlossenen beheizbaren Bauwerken zu. Die meisten Nadelhölzer überschreiten in der NKL 1 eine mittlere Ausgleichsfeuchte von 12% nicht.

Nutzungsklasse 2: Bauteile in offenen, aber überdachten Bauwerken, die nicht der Bewitterung ausgesetzt sind. Die meisten Nadelhölzer überschreiten in der NKL 2 eine mittlere Ausgleichsfeuchte von 20% nicht.

Nutzungsklasse 3: Bauteile, mit mittlerer Holzfeuchte über 20%. Das sind z.B. Bauteile, die frei der Bewitterung ausgesetzt sind. Auf diese Nutzungsklasse wird hier nicht näher eingegangen.

In Abhängigkeit von der NKL und der *Klasse der Lasteinwirkungsdauer* werden die charakteristischen Festigkeiten der Baustoffe mit einem Modifikationsbeiwert k_{mod} abgemindert. Für Vollholzprodukte ist dieser Zusammenhang in Tab. 2-1 gezeigt. Werte für k_{mod} anderer Holzwerkstoffe sind [DIN 1] und [DIN 2] zu entnehmen.

Lastfall-Kombinationen		KLED
Eigenlasten		ständig
Eigenlasten mit lotrechten Nutzlasten	bei Anhäufungen von Gütern	lang
	Regelfälle: Wohn-, Büro- und Ladenflächen, Treppen und Flure	mittel
	Balkone, nicht begehbare Dächer	kurz
Eigenlasten mit horizontalen Nutzlasten	Brüstungen, Geländer, Absperrungen	kurz
Lastfall-Kombinationen mit Wind- oder Schneelasten (<1000m ü. NN)		kurz
Lastfall-Kombinationen mit Wind- oder Schneelasten (>1000m ü. NN)		mittel

Tab. 2-1 Zuordnung KLED zu Lasten

Ebenfalls in Abhängigkeit von der NKL und der Klasse der Lasteinwirkungsdauer werden die Verformungsanteile infolge *Kriechen* der Baustoffe bei ständiger Lasteinwirkung mit einem Verformungsbeiwert k_{def} berechnet. Für Vollholzprodukte und Plattenwerkstoffe ist dieser Zusammenhang in Tab. 2-1 gezeigt.

Baustoff		NKL 1	NKL 2
Vollholz, BSH, Balkenschichtholz, Furnierschichtholz (LVL), Brettsperrholz, Massivholzplatten		0,60	0,80
Sperrholz	DIN EN 636-1	0,80	---
	DIN EN 636-2 und -3	0,80	1,00
Spanplatten DIN EN 312	Typ P4	2,25	---
	Typ P5	2,25	3,00
	Typ P6	1,50	---
	Typ P7	1,50	2,25
OSB DIN EN 300	OSB/2	2,25	---
	OSB/3, OSB/4	1,50	2,25
Zementgebundene Spanplatten		2,25	3,00
Gipsplatten GKB ¹⁾ , GKF ¹⁾ , GKBI und GKFI DIN 18180 Gipsfaserplatten DIN EN 15283-2		3,00	4,00

Tab. 2-1 Verformungsbeiwerte k_{def} in NKL 1 und 2

2.2 Bemessungswerte der Festigkeiten für die Nutzungsklassen 1 und 2 bei Beanspruchung parallel und rechtwinklig zur Faserrichtung

Die jeweiligen *Bemessungswerte der Festigkeiten* werden nach Formel (2.1) ermittelt

$$f_{\text{...d}} = k_{\text{mod}} \cdot \frac{f_{\text{...k}}}{\gamma_{\text{M}}} \quad (2.1)$$

$f_{\text{...d}}$ Bemessungswert der Festigkeit

$f_{\text{...k}}$ Charakteristischer Wert der Festigkeit

k_{mod} Modifikationsbeiwert des Baustoffes in Abhängigkeit von Nutzungsklasse (NKL) und Klasse der Lasteinwirkungsdauer (KLED) nach Tab. 1-2

γ_{M} Teilsicherheitsbeiwert für eine Baustoffeigenschaft ('M'aterial) nach Tab. 2-2

Baustoff		γ_{M}
Holz, Brettschichtholz und Holzwerkstoffe		1,3
Stahl in Verbindungen	auf Biegung beanspruchte stiftförmige Verbindungsmittel	1,3
	auf Zug oder Scheren beanspruchte Teile beim Nachweis gegen die Streckgrenze im Nettoquerschnitt	1,3
	Plattennachweis auf Tragfähigkeit für Nagelplatten	1,25

Tab. 2-2 Teilsicherheitsbeiwerte γ_{M}

Die nachfolgenden Tabellen enthalten die Festigkeits-, Steifigkeits- und Rohdichtekennwerte und für die gebräuchlichsten Klassen von Nadelvollholz nach [DIN 4].

Festigkeitswerte in N/mm ²	charakteristische Werte			Bemessungswerte für NKL 1+2 bei KLED=mittel		
		C24	C30		C24	C30
Biegung ('m'oment) ¹⁾	$f_{m,k}$	24	30	$f_{m,d}$	14,8	18,5
Zug parallel ('t'ension) ¹⁾	$f_{t,0,k}$	14,5	19	$f_{t,0,d}$	8,9	11,7
Zug rechtwinklig	$f_{t,90,k}$	0,4		$f_{t,90,d}$	0,246	
Druck parallel ('c'ompression)	$f_{c,0,k}$	21	24	$f_{c,0,d}$	12,9	14,8
Druck rechtwinklig	$f_{c,90,k}$	2,5	2,7	$f_{c,90,d}$	1,54	1,66
Schub und Torsion	$f_{v,k}$	4,0	4,0	$f_{v,d}$	2,46	2,46
	$k_{cr} \cdot f_{v,k}^{(2)}$	2,0		$k_{cr} \cdot f_{v,d}^{(2)}$	1,23	

¹⁾ Die Festigkeitswerte für Biegung und Zug dürfen bei $b < 150$ mm bzw. $h < 150$ mm mit dem Beiwert k_h multipliziert werden, siehe Tab. 2-4

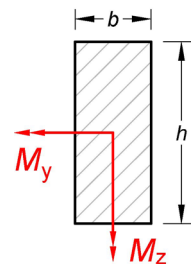
²⁾ Querschnittsnachweise für Schub und Torsion unter Berücksichtigung von Rissen gemäß NDP 6.1.7(2) in [DIN 2]. Bei Stäben aus Nadelnschittholz dürfen die Werte für $k_{cr} \cdot f_{v,k}$ in Bereichen die mindestens 1,50 m vom Hirnholzende des Holzes entfernt liegen, um 30 % erhöht werden.

Für andere KLED sind die Bemessungswerte zu multiplizieren mit: **ständig: 0,75; lang: 0,875; kurz: 1,125**

Tab. 2-3 Festigkeitswerte $f_m / f_{t,0} / f_{t,90} / f_{c,0} / f_{c,90} / f_v$ für Nadelvollholz

Für Bauteile mit Rechteckquerschnitten aus Vollholz mit einer charakteristischen Rohdichte $\rho_k \leq 700 \text{ kg/m}^3$ dürfen folgende Festigkeitswerte erhöht werden, wenn die entsprechenden Querschnittsabmessungen ≤ 150 mm betragen:

- Biegefestigkeit $f_{m,y,k} = k_{h,y} \cdot f_{m,k}$ bei $h < 150$ mm
- Biegefestigkeit $f_{m,z,k} = k_{h,z} \cdot f_{m,k}$ bei $b < 150$ mm
- Zugfestigkeit $k_{h,t} \cdot f_{t,0,k}$ bei $\max\{b; h\} < 150$ mm



$$k_{h,y} = \min \left\{ \left(\frac{150}{h} \right)^{0,2}; 1,3 \right\} \quad \left| \quad k_{h,z} = \min \left\{ \left(\frac{150}{b} \right)^{0,2}; 1,3 \right\} \quad \left| \quad k_{h,t} = \min \left\{ \left(\frac{150}{\max\{b; h\}} \right)^{0,2}; 1,3 \right\} \quad (2.2)$$

$h \mid b \mid \max\{b; h\}$	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	≥ 150
$k_{h,y} \mid k_{h,z} \mid k_{h,t}$	1,300	1,300	1,300	1,246	1,201	1,165	1,134	1,108	1,084	1,064	1,046	1,029	1,014	1,0

Tab. 2-4 Erhöhungswerte k_h Biege-/Zugfestigkeit für Vollholz aus Nadelholz

			C24	C30
E-Modul parallel	$E_{0,mean}$	N/mm ²	11.000	12.000
	$E_{0,05}$	N/mm ²	7.400	8.000
E-Modul senkrecht	$E_{90,mean}$	N/mm ²	370	400
	$E_{90,05}$	N/mm ²	247	267
Schubmodul	G_{mean}	N/mm ²	690	750
	G_{05}	N/mm ²	460	500
Char. Rohdichte	ρ_k	kg/m ³	350	380
Mittlere Rohdichte	ρ_{mean}	kg/m ³	420	460

Tab. 2-5 Steifigkeiten E, G und Rohdichten ρ für Vollholz aus Nadelholz

Die nachfolgenden Tabellen enthalten die Kennwerte für Brettschichtholz aus Nadelholz. „GL“ steht für *glued laminated timber* – geleimtes Schichtholz, Kurzform *Gluelam* oder *Glulam*.

	Homogenes Brettschichtholz							
	charakteristische Werte				Bemessungswerte für NKL 1+2 bei KLED=mittel			
Festigkeitswerte in N/mm ²		GL24h	GL28h	GL32h		GL24h	GL28h	GL32h
Biegung ¹⁾	$f_{m,k}$	24	28	32	$f_{m,d}$	14,8	17,2	19,7
Zug parallel	$f_{t,0,k}$	19,2	22,3	25,6	$f_{t,0,d}$	11,8	13,7	15,8
Zug rechtwinklig	$f_{t,90,k}$	0,5			$f_{t,90,d}$	0,308		
Druck parallel	$f_{c,0,k}$	24	28	32	$f_{c,0,d}$	14,8	17,2	19,7
Druck rechtwinklig	$f_{c,90,k}$	2,5			$f_{c,90,d}$	1,54		
Schub und Torsion	$f_{v,k}$	3,5			$f_{v,d}$	2,15		
	$k_{cr} \cdot f_{v,k}^{2)}$	2,5			$k_{cr} \cdot f_{v,d}^{2)}$	1,54		

	Kombiniertes Brettschichtholz							
	charakteristische Werte				Bemessungswerte für NKL 1+2 bei KLED=mittel			
Festigkeitswerte in N/mm ²		GL24c	GL28c	GL32c		GL24c	GL28c	GL32c
Biegung ¹⁾	$f_{m,k}$	24	28	32	$f_{m,d}$	14,8	17,2	19,7
Zug parallel	$f_{t,0,k}$	17	19,5	19,5	$f_{t,0,d}$	10,5	12,0	12,0
Zug rechtwinklig	$f_{t,90,k}$	0,5			$f_{t,90,d}$	0,308		
Druck parallel	$f_{c,0,k}$	21,5	24	24,5	$f_{c,0,d}$	13,2	14,8	15,1
Druck rechtwinklig	$f_{c,90,k}$	2,5			$f_{c,90,d}$	1,54		
Schub und Torsion	$f_{v,k}$	3,5			$f_{v,d}$	2,15		
	$k_{cr} \cdot f_{v,k}^{2)}$	2,5			$k_{cr} \cdot f_{v,d}^{2)}$	1,54		

¹⁾ Der Wert der Biegefestigkeit darf mit $k_{h,y}$ bzw. $k_{h,t}$ erhöht werden

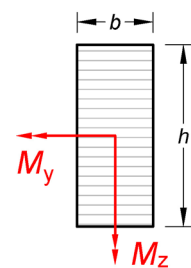
²⁾ Querschnittsnachweise für Schub und Torsion unter Berücksichtigung des Einflusses von Rissen gemäß NDP 6.1.7(2) in [DIN 2]. Für alle Festigkeitsklassen gilt die gleiche Schubfestigkeit.

Für andere **KLED** sind die **Bemessungswerte** zu multiplizieren mit: **ständig: 0,75; lang: 0,875; kurz: 1,125**

Tab. 2-6 Festigkeitswerte $f_m / f_{t,0} / f_{t,90} / f_{c,0} / f_{c,90} / f_v$ für Brettschichtholz

Erhöhung der Festigkeitswerte für Rechteckquerschnitte aus Brettschichtholz:

- Biegefestigkeit $f_{m,y,k} = k_{h,y} \cdot f_{m,k}$ bei $h \leq 600$ mm ,
- Biegefestigkeit $f_{m,z,k} = 1,2 \cdot f_{m,k}$, wenn der Querschnitt mindestens aus 4 Lammellen (aufeinander geklebte Brettlagen) besteht,
- Zugfestigkeit $k_{h,t} \cdot f_{t,0,k}$, bei $\max\{b;h\} < 600$ mm



$$k_{h,y} = \min \left\{ \left(\frac{600}{h} \right)^{0,1} ; 1,1 \right\} \quad \left| \quad k_{h,t} = \min \left\{ \left(\frac{600}{\max\{b;h\}} \right)^{0,1} ; 1,1 \right\} \right. \quad (2.3)$$

$h \mid \max\{b;h\}$	≤ 230	240	260	280	300	320	340	360	380	400
$k_{h,y} \mid k_{h,t}$	1,1	1,096	1,087	1,079	1,072	1,065	1,058	1,052	1,047	1,041
$h \mid \max\{b;h\}$	420	440	460	480	500	520	540	560	580	≥ 600
$k_{h,y} \mid k_{h,t}$	1,036	1,032	1,027	1,023	1,018	1,014	1,011	1,007	1,003	1,0

Tab. 2-7 Erhöhungswerte k_h Biege-/Zugfestigkeit für Brettschichtholz

			GL24c	GL24h	GL28c	GL28h	GL32c	GL32h
E-Modul parallel	$E_{0,\text{mean}}$	N/mm ²	11.000	11.500	12.500	12.600	13.500	14.200
	$E_{0,05}$	N/mm ²	9.100	9.600	10.400	10.500	11.200	11.800
E-Modul senkrecht in	$E_{90,\text{mean}}$	N/mm ²	300					
	$E_{90,05}$	N/mm ²	250					
Schubmodul	G_{mean}	N/mm ²	650					
	G_{05}	N/mm ²	540					
Char. Rohdichte	ρ_k	kg/m ³	365	385	390	425	400	440
Mittlere Rohdichte	ρ_{mean}	kg/m ³	400	420	420	460	440	490
5%-Quantilwerte: $E_{0,05} = 5/6 \cdot E_{0,\text{mean}}$ $E_{90,05} = 5/6 \cdot E_{90,\text{mean}}$ $G_{05} = 5/6 \cdot G_{\text{mean}}$								

Tab. 2-8 Steifigkeiten E, G und Rohdichten ρ für Brettschichtholz

2.3 Bemessungswerte der Druckfestigkeiten für die Nutzungsklassen 1 und 2 bei Beanspruchung unter einem Winkel α zur Faserrichtung

Die Anisotropie des Holzes darf zur rechnerischen Vereinfachung als *Orthotropie* berücksichtigt werden. Für einen Winkel α zwischen Kraft- und Faserrichtung, dessen Werte zwischen 0° und 90° liegen können, wird die Druckfestigkeit wie folgt berechnet:

$$f_{c,\alpha,d} = \frac{f_{c,0,d}}{\frac{f_{c,0,d}}{k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (2.4)$$

$f_{c,\alpha,d}$ Bemessungswert der Druckfestigkeit für einen Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung

α Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung

$k_{c,90}$ Beiwert, der für Nadelvollholz und BSH aus Nadelholz den Einfluss der Druckspannungen senkrecht zur Faserrichtung berücksichtigt, siehe 4.3 (S.28)

Für einige Hölzer sind in der folgenden Tab. 2-9 Druckfestigkeitswerte angegeben.

Bemessungswert der Druckfestigkeit $f_{c,\alpha,d}$ in N/mm ² bei NKL 1+2 für KLED=mittel ¹⁾																					
α	Nadelvollholz						Brettschichtholz														
	C24			C30			GL24c			GL24h GL28c			GL28h			GL32c			GL32h		
	$k_{c,90}$			$k_{c,90}$			$k_{c,90}$			$k_{c,90}$			$k_{c,90}$			$k_{c,90}$			$k_{c,90}$		
	1,0	1,25	1,5	1,0	1,25	1,5	1,0	1,5	1,75	1,0	1,5	1,75	1,0	1,5	1,75	1,0	1,5	1,75	1,0	1,5	1,75
0°	12,9	12,9	12,9	14,2	14,2	14,2	13,2	13,2	13,2	14,8	14,8	14,8	17,2	17,2	17,2	15,1	15,1	15,1	19,7	19,7	19,7
5°	12,2	12,4	12,5	13,4	13,6	13,7	12,5	12,8	12,8	13,9	14,2	14,3	16,0	16,4	16,6	14,1	14,5	14,6	18,5	18,9	19,0
10°	10,6	11,0	11,3	11,5	12,0	12,4	10,8	11,6	11,8	11,7	12,7	13,0	13,2	14,4	14,8	11,9	12,9	13,2	15,6	16,9	17,3
15°	8,64	9,34	9,88	9,41	10,2	10,8	8,77	10,05	10,48	9,37	10,85	11,36	10,2	12,0	12,7	9,49	11,00	11,53	12,4	14,4	15,1
20°	6,93	7,74	8,40	7,53	8,42	9,15	7,00	8,52	9,08	7,36	9,05	9,69	7,86	9,81	10,56	7,43	9,15	9,80	9,76	12,01	12,86
25°	5,57	6,39	7,09	6,04	6,94	7,71	5,61	7,17	7,79	5,82	7,52	8,20	6,11	8,00	8,77	5,86	7,58	8,28	7,71	9,97	10,87
30°	4,53	5,32	6,01	4,92	5,77	6,52	4,56	6,06	6,69	4,69	6,28	6,96	4,85	6,59	7,33	4,71	6,33	7,01	6,20	8,32	9,22
35°	3,76	4,48	5,14	4,07	4,86	5,57	3,78	5,17	5,78	3,86	5,32	5,97	3,96	5,51	6,21	3,87	5,35	6,00	5,10	7,04	7,90
40°	3,18	3,84	4,46	3,45	4,16	4,83	3,20	4,48	5,06	3,24	4,57	5,18	3,30	4,69	5,33	3,25	4,59	5,20	4,29	6,04	6,85
45°	2,75	3,35	3,92	2,97	3,62	4,24	2,76	3,93	4,47	2,79	3,99	4,55	2,82	4,07	4,66	2,79	4,00	4,57	3,68	5,28	6,02
50°	2,42	2,97	3,49	2,62	3,21	3,78	2,42	3,50	4,01	2,44	3,54	4,07	2,47	3,59	4,13	2,45	3,55	4,08	3,23	4,68	5,37
55°	2,17	2,67	3,16	2,34	2,89	3,42	2,17	3,17	3,65	2,18	3,19	3,68	2,20	3,23	3,73	2,18	3,20	3,69	2,88	4,22	4,87
60°	1,97	2,44	2,90	2,13	2,64	3,14	1,97	2,91	3,36	1,98	2,92	3,38	1,99	2,95	3,41	1,98	2,93	3,39	2,62	3,86	4,47
65°	1,83	2,27	2,70	1,97	2,45	2,92	1,83	2,71	3,14	1,83	2,72	3,15	1,84	2,73	3,17	1,83	2,72	3,16	2,42	3,59	4,16
70°	1,72	2,14	2,55	1,85	2,31	2,76	1,72	2,55	2,97	1,72	2,56	2,98	1,72	2,57	2,99	1,72	2,56	2,98	2,27	3,38	3,93
75°	1,63	2,04	2,44	1,77	2,20	2,64	1,64	2,44	2,84	1,64	2,45	2,85	1,64	2,45	2,85	1,64	2,45	2,85	2,16	3,23	3,76
80°	1,58	1,97	2,37	1,71	2,13	2,56	1,58	2,37	2,76	1,58	2,37	2,76	1,58	2,37	2,76	1,58	2,37	2,76	2,09	3,13	3,64
85°	1,55	1,94	2,32	1,67	2,09	2,51	1,55	2,32	2,71	1,55	2,32	2,71	1,55	2,32	2,71	1,55	2,32	2,71	2,04	3,07	3,58
90°	1,54	1,92	2,31	1,66	2,08	2,49	1,54	2,31	2,69	1,54	2,31	2,69	1,54	2,31	2,69	1,54	2,31	2,69	2,03	3,05	3,55

Tab. 2-9 Druckfestigkeiten $f_{c,\alpha,d}$ für Nadelvollholz und Brettschichtholz

3 Querschnittsnachweise für Zug parallel zur Faserrichtung des Holzes

Die folgende Bedingung muss erfüllt sein:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} = \frac{\frac{F_d}{A_n}}{f_{t,0,d}} \leq 1 \quad (3.1)$$

$\sigma_{t,0,d}$	Bemessungswert ('d'esign value) Zugspannung ('t'ension) parallel (0°) zur Faserrichtung
F_d	Bemessungswert Zugbeanspruchung
A_n	Nettoquerschnittsfläche
$f_{t,0,d}$	Bemessungswert Zugfestigkeit

3.1 Querschnittsschwächungen bei der Berechnung der Nettoquerschnittsfläche

Querschnittsschwächungen sind bei der Berechnung von A_n zu berücksichtigen!

Bei stiftförmigen Verbindungsmitteln ist bei vorgebohrten Hölzern der Bohrlochdurchmesser und bei nicht vorgebohrten Hölzern der Nenndurchmesser zu verwenden.

Ausgenommen sind Querschnittsschwächungen verursacht durch:

- Nägel und Holzschrauben mit Durchmessern $d \leq 6 \text{ mm}$, wenn sie ohne Vorbohren eingetrieben sind.

Bei Verbindungen mit mehreren Verbindungsmittelreihen sind zur Bestimmung des wirksamen Querschnittes alle Querschnittsschwächungen zu berücksichtigen, die weniger als der halbe Mindestabstand der Verbindungsmittel in Faserrichtung von dem betrachteten Querschnitt entfernt liegen, siehe Abb. 3-1. Dabei dürfen stiftförmige Verbindungsmittel, die jeweils um bis zu $0,5 \cdot d$ gegenüber der Risslinie versetzt sind, als hintereinander liegend angesehen werden.

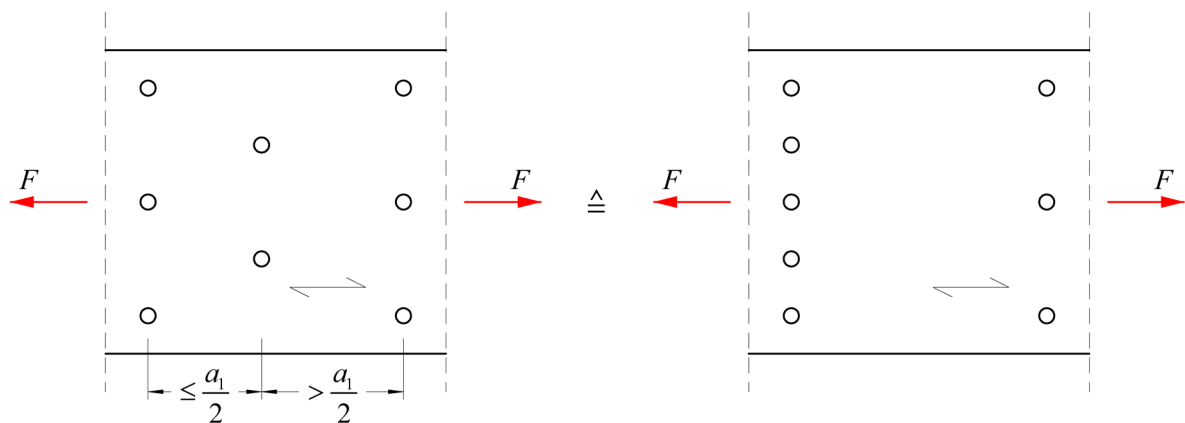


Abb. 3-1 Berücksichtigung von Querschnittsschwächungen aus versetzt angeordneten Verbindungsmitteln

3.2 Besondere Regeln für Querschnittsnachweise von Hölzern in Zugverbindungen

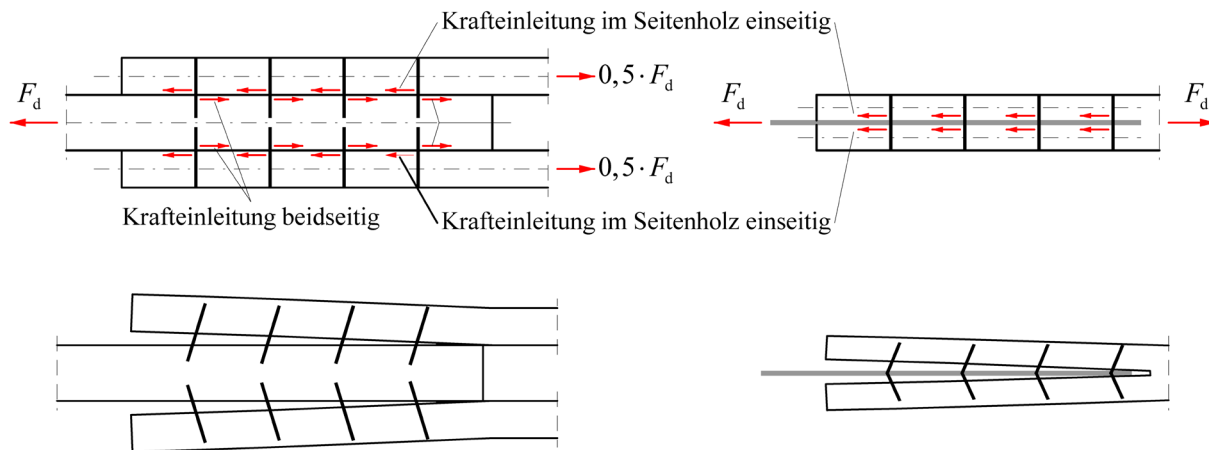


Abb. 3-2 Verkrümmung einseitig beanspruchter Bauteile in Zuganschlüssen

Abb. 3-2 zeigt links eine symmetrische zugbelastete Verbindung von einem innenliegenden Holz (Mittelholz) mit zwei außenliegenden Hölzern (Seitenhölzer). Rechts ist ein eingeschlitzter Holzquerschnitt mit einer innenliegenden Stahllasche dargestellt. Im Bereich der Einschlitzung entstehen zwei Seitenhölzer. Die Übertragung der Zugkraft F_d in die Seitenhölzer erfolgt über Scherkräfte in den Verbindungsmitteln (VM). Im Mittelholz und der Stahllasche wirken diese Scherkräfte beidseitig symmetrisch zur Mittelachse. In den Seitenhölzern liegt eine einseitige Belastung der Querschnitte vor, aus der neben der Zugbelastung ein Moment entsteht, dessen Größe nicht exakt bestimmt werden kann. Dieses Moment bewirkt eine Verkrümmung der Seitenhölzer, die zu einer Aufspreizung der Verbindung führen kann, siehe untere Zeichnungen in Abb. 3-2. Verbindungsmittel, die eine Zugbeanspruchung in Richtung ihrer Längsachse (Herausziehen) aufnehmen können (z.B. Holzschrauben), wirken der Aufspreizung entgegen. Seitenhölzer weisen eine stark verringerte Tragfähigkeit auf wenn ausschließlich Verbindungsmittel verwendet werden, die keine Zugbeanspruchung in Richtung ihrer Längsachse aufnehmen (z.B. Stabdübel).

Um Schäden zu vermeiden wird deshalb für die einseitig belasteten Querschnittsteile (hier die Seitenhölzer) ein Nachweis der Zugspannungen mit reduzierter Zugfestigkeit $f_{t,0,d}$ geführt.

Fall 1: Symmetrisch ausgeführte Zugverbindungen mit Verbindungsmitteln, die durch Zug beanspruchbar sind: **Holzschrauben, Bolzen, Passbolzen, Klammern, nicht vorgebohrte Nägel**

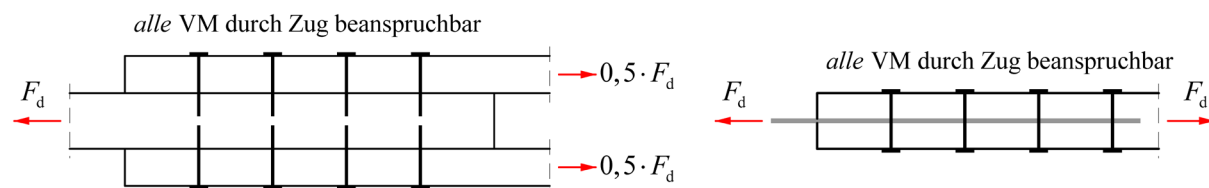


Abb. 3-3 Verbindung mit Verbindungsmitteln, die durch Zug beanspruchbar sind

Beim Nachweis der Tragfähigkeit der einseitig beanspruchten Bauteile muss der Bemessungswert der Zugtragfähigkeit auf zwei Drittel verringert werden.

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{\frac{2}{3} \cdot f_{t,0,d}} \leq 1 \quad (3.2)$$

Fall 2: Symmetrisch ausgeführte Zugverbindungen mit Verbindungsmitteln, die nicht durch Zug beanspruchbar sind: **Stabdübel, vorgebohrte Nägel und Dübel besonderer Bauart zusammen mit einem zusätzlichen Verbindungsmittel, das die Zugkraft $F_{t,d}$ aufnimmt**

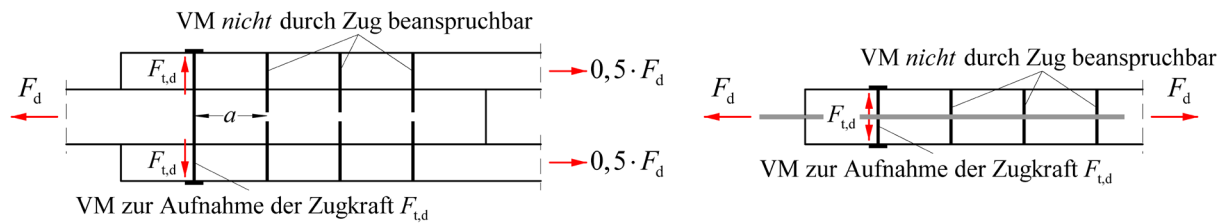


Abb. 3-4 Verbindung mit Verbindungsmitteln, die nicht durch Zug beanspruchbar sind, zusammen mit Verbindungsmitteln, die die Aufspreizung verhindern

Beim Nachweis der Tragfähigkeit der einseitig beanspruchten Bauteile muss der Bemessungswert der Zugtragfähigkeit auf zwei Drittel verringert werden.

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{\frac{2}{3} \cdot f_{t,0,d}} \leq 1 \quad \text{identisch zu Gl. (3.2)}$$

Folgende Voraussetzungen müssen hierbei erfüllt werden:

- bei stiftförmigen Verbindungsmitteln sind in der ersten beziehungsweise letzten Verbindungsmittelreihe Verbindungsmittel mit einer Beanspruchbarkeit auf Herausziehen zu verwenden.
- bei anderen Verbindungsmitteln werden vor beziehungsweise hinter dem eigentlichen Anschluss diese Verbindungsmittel zusätzlich angeordnet.
- die auf Herausziehen beanspruchten Verbindungsmittel sind für eine in Richtung der Stiftachse wirkende Zugkraft $F_{t,d}$ zu bemessen:

$$F_{t,d} = \frac{0,5 \cdot F_d \cdot t}{2 \cdot n \cdot a} \quad (3.3)$$

$0,5 \cdot F_d$ Normalkraft im einseitig beanspruchten Seitenholz.

n Anzahl der zur Übertragung der Scherkraft in Richtung der Kraft F_d hintereinander angeordneten Verbindungsmittel. Falls VM nur zur Aufnahme der Kraft $F_{t,d}$ und nicht gleichzeitig zur Aufnahme von F_d dienen, werden diese nicht mitgezählt.

t Dicke des Seitenholzes

a Abstand der auf Herausziehen beanspruchten Verbindungsmittel von der nächsten Verbindungsmittelreihe

Fall 3: Symmetrisch ausgeführte Zugverbindungen ausschließlich mit Verbindungsmitteln, die nicht durch Zug beanspruchbar sind: **Stabdübel, vorgebohrte Nägel und Dübel besonderer Bauart**

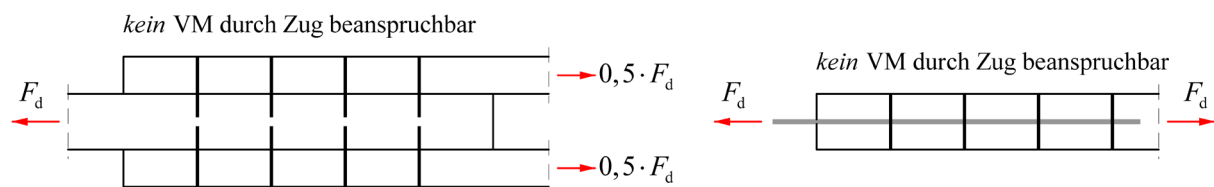


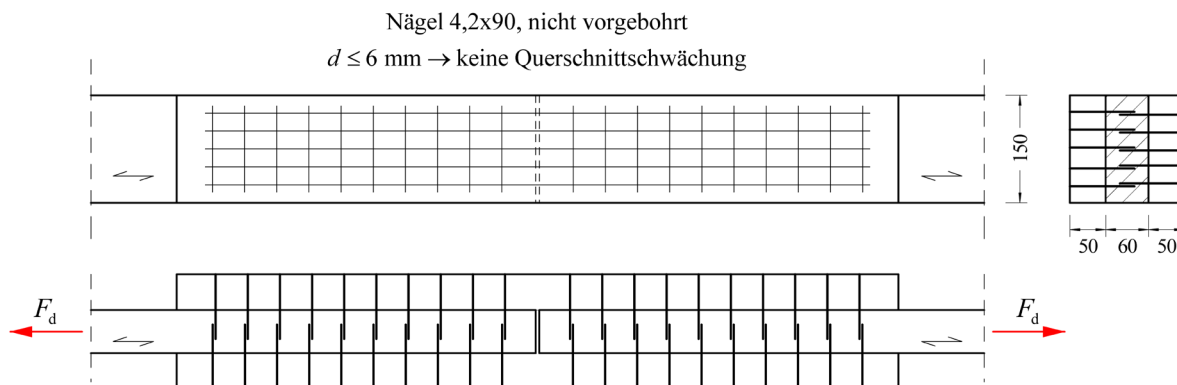
Abb. 3-5 Verbindung mit Verbindungsmitteln, die nicht durch Zug beanspruchbar sind

Beim Nachweis der Tragfähigkeit der einseitig beanspruchten Bauteile muss der Bemessungswert der Zugtragfähigkeit auf 40% verringert werden.

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{0,4 \cdot f_{t,0,d}} \leq 1 \quad (3.4)$$

Beispiel 3-1 Zugbelasteter Laschenstoß aus Nadelvollholz C24

Ein Laschenstoß aus Nadelholz C24 ist durch eine Zugkraft belastet, deren Bemessungswert $F_d = 75 \text{ kN}$ beträgt. Die Nutzungsklasse ist NKL 1 und die Klasse der Lasteinwirkungsdauer ist KLED mittel.



Querschnittsnachweis Zugstab:

$$(\max\{b; h\} = 150 \text{ mm}) \rightarrow f_{t,0,d} = \underbrace{1,0}_{k_{ht}} \cdot \underbrace{1,0}_{\text{KLED mittel}} \cdot 8,9 = 8,9 \text{ N/mm}^2$$

$$A_n = 60 \cdot 150 = 9.000 \text{ mm}^2$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} = \frac{\frac{F_d}{A_n}}{f_{t,0,d}} = \frac{\frac{75.000}{9.000}}{8,9} = \frac{8,33}{8,9} = 0,94 \leq 1$$

Querschnittsnachweis außen liegende Laschen, einseitig beansprucht, nicht vorgebohrte Nägel:

$$(\max\{b; h\} = 150 \text{ mm}) \rightarrow f_{t,0,d} = 8,62 \text{ N/mm}^2$$

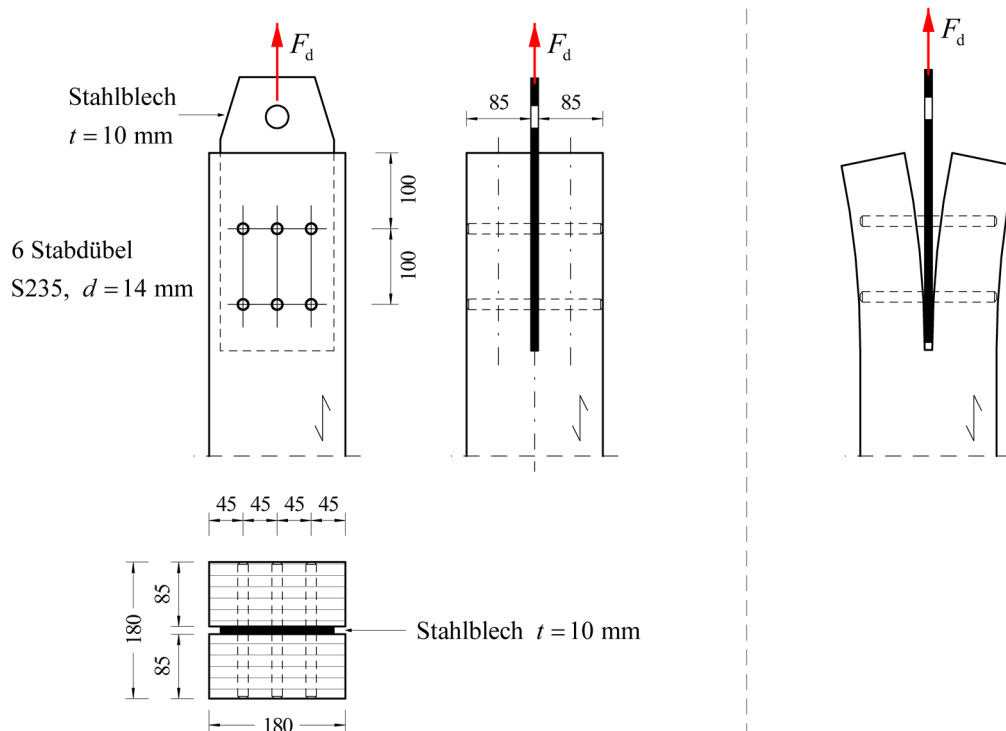
$$A_n = 2 \cdot 50 \cdot 150 = 15.000 \text{ mm}^2$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{\frac{2}{3} \cdot f_{t,0,d}} = \frac{\frac{F_d}{A_n}}{\frac{2}{3} \cdot f_{t,0,d}} = \frac{\frac{75.000}{15.000}}{\frac{2}{3} \cdot 8,62} = \frac{5,00}{5,75} = 0,87 \leq 1$$

Ende Beispiel 3-1

Beispiel 3-2 Zugstab aus GL24h mit innen liegender Stahlflasche und Stabdübeln

Ein Zugstab aus Brettschichtholz GL24h ist durch eine Zugkraft $F_d = 80 \text{ kN}$ belastet, die durch ein mittig eingeschlitztes Stahlblech und Stabdübel eingeleitet wird. Der ungeschwächte Zugstab hat die Abmessungen 180/180 mm. Die Nutzungsklasse ist NKL 1 und die Klasse der Lasteinwirkungsdauer ist KLED lang.

**Querschnittsnachweise**

Außen liegende Querschnittsteile, einseitig beansprucht, Stabdübel:

Die Verkrümmung der einseitig beanspruchten Bauteile wird nicht durch auf Herausziehen beanspruchbare Verbindungsmittel verhindert.

$$(\max\{b; h\} = \max\{85; 180\} = 180 \text{ mm}) < 230 \text{ mm} \rightarrow f_{t,0,d} = \underbrace{1,1}_{k_{h,t}} \cdot \underbrace{0,875}_{\text{KLED lang}} \cdot 11,8 = 10,3 \text{ N/mm}^2$$

$$A_n = \left(180 - \underbrace{10}_{\substack{\text{Stahlblech} \\ t=10 \text{ mm}}} \right) \cdot \left(180 - \underbrace{3 \cdot 14}_{\substack{3 \text{ SDü} \\ d=14 \text{ mm}}} \right) = 23.460 \text{ mm}^2$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{0,4 \cdot f_{t,0,d}} = \frac{\frac{F_d}{A_n}}{0,4 \cdot f_{t,0,d}} = \frac{\frac{80.000}{23.460}}{0,4 \cdot 10,3} = \frac{3,41}{4,12} = 0,83 \leq 1$$

Ende Beispiel 3-2

4 Querschnittsnachweise für Druck

4.1 Druck parallel zur Faserrichtung des Holzes

Die folgende Bedingung muss erfüllt sein:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} = \frac{F_d/A_n}{f_{c,0,d}} \leq 1 \quad (4.1)$$

$\sigma_{c,0,d}$ Bemessungswert der Druckspannung ('c'ompression) parallel zur Faserrichtung

F_d Bemessungswert der Druckkraft

A_n Nettoquerschnittsfläche

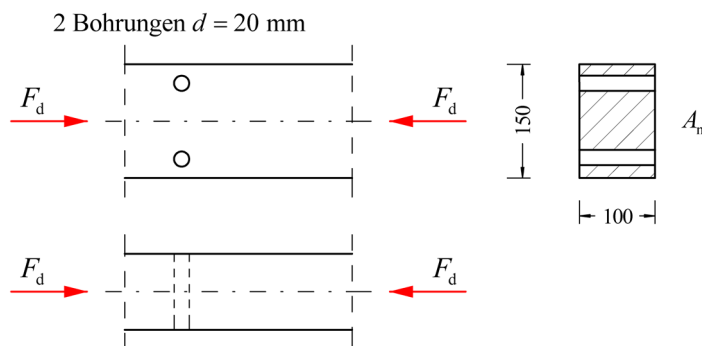
$f_{c,0,d}$ Bemessungswert der Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung

4.2 Regeln für die Bestimmung der Nettoquerschnittsfläche bei Druckbeanspruchung:

- Bei unsymmetrisch angeordneten *Querschnittsschwächungen* ist der Querschnitt für Druck und Biegung nachzuweisen
- Löcher und Aussparungen müssen nicht als Querschnittsschwächungen berücksichtigt werden, wenn sie in der Druckzone von Holzbauteilen liegen und wenn sie mit einem Baustoff ausgefüllt sind, dessen Steifigkeit mindestens der des Holzes oder Holzwerkstoffes entspricht.

Beispiel 4-1 Druckbelasteter C30-Querschnitt mit zwei Bohrungen

Ein Stab aus Nadelholz C30 ist durch eine zentrische Druckkraft belastet, deren Bemessungswert $F_d = 150 \text{ kN}$ beträgt. Die Nutzungsklasse ist NKL 2 und die Klasse der Lasteinwirkungsdauer ist KLED kurz.



Querschnittsnachweis im Bereich der größten Druckspannung

$$f_{c,0,d} = 1,125 \cdot 14,2 = 15,98 \text{ N/mm}^2$$

$$A_n = 100 \cdot (150 - 2 \cdot 20) = 11.000 \text{ mm}^2$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} = \frac{\frac{F_d}{A_n}}{f_{c,0,d}} = \frac{\frac{150.000}{11.000}}{15,98} = \frac{13,64}{15,98} = 0,85 \leq 1$$

Ende Beispiel 4-1

4.3 Druck rechtwinklig zur Faserrichtung des Holzes

Die folgende Bedingung muss erfüllt sein:

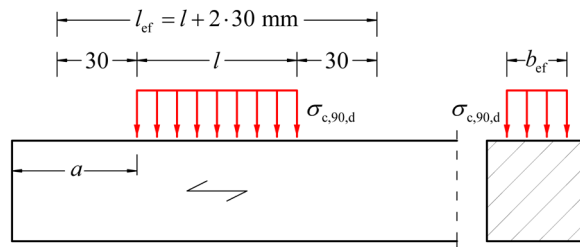
$$\frac{\sigma_{c,90,d}}{k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}} = \frac{(F_d / A_{ef})}{k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}} \leq 1 \quad (4.2)$$

$A_{ef} = l_{ef} \cdot b_{ef}$ wirksame Druckfläche

$k_{c,90}$ Querdruckbeiwert $1,0 \leq k_{c,90} \leq 1,75$

$f_{c,90,d}$ Querdruckfestigkeit. Wichtig: bei Verwendung der Tab. 2-9 (S.20) beachten, dass dort schon die Werte für $k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}$ angegeben sind.

Für die Ermittlung der wirksamen Querdruckfläche A_{ef} darf die vorhandene Länge l der Druckfläche in Faserrichtung an beiden Enden um bis zu 30 mm verlängert werden, jedoch nicht mehr als um a , l und $l_1/2$.

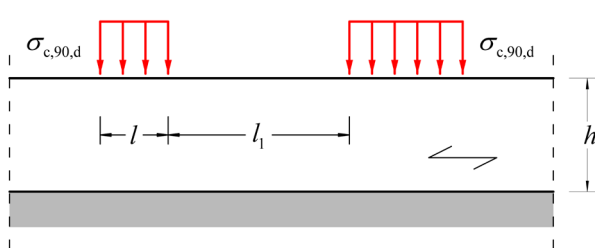


a Abstand vom Rand der Druckfläche bis zum Holzrand

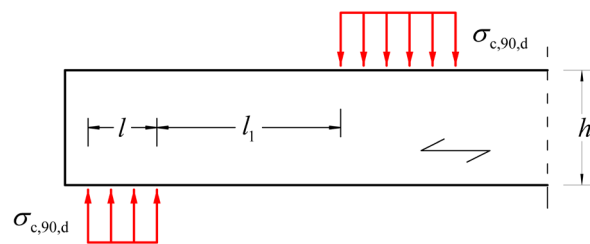
l vorhandene Länge der Druckfläche in Faserrichtung

l_1 lichter Abstand benachbarter Druckflächen

h Querschnittshöhe



a) Schwellendruck



b) Auflagerdruck

Abb. 4-1 Druck rechtwinklig zur Faserrichtung des Holzes

Die Druckfestigkeit von Laubholz darf nicht erhöht werden.

Zur Begrenzung der Verformungen am Tragwerk gelten für Nadelholz die folgenden zwei Regeln:

Fall 1 Benachbarte/gegenüberliegende Druckflächen nach Abb. 4-1 mit lichtem Abstand $l_1 \geq 2 \cdot h$.

Regel: der erhöhte Querdruckbeiwert $k_{c,90}$ darf für beide Druckflächen nach der folgenden Tabelle angenommen werden.

Fall 2 Benachbarte/gegenüberliegende Druckflächen nach Abb. 4-1 mit lichtem Abstand $l_1 < 2 \cdot h$.

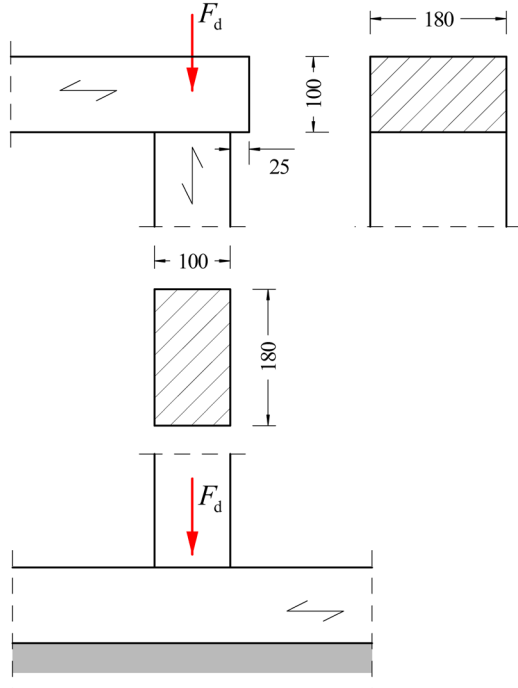
Regel: der erhöhte Querdruckbeiwert $k_{c,90}$ darf nur bei einer der beiden Druckflächen nach der folgenden Tabelle angenommen werden. Für die andere Druckfläche muss der Querdrucknachweis mit $k_{c,90} = 1,0$ geführt werden.

Baustoff	Schwellendruck	Auflagerdruck
BSH aus NH	1,5	1,75
VH aus NH	1,25	1,5

Tab. 4-1 Beiwerte $k_{c,90}$

Beispiel 4-2 Auflager- und Schwellendruck auf GL28h rechtwinklig zur Faserrichtung

Ein Balken aus Brettschichtholz GL28h überträgt eine Auflagerkraft $F_d = 50 \text{ kN}$ in eine einzelne Stütze, die auf einer durchlaufenden Schwelle aus BSH GL28h steht. Das Maß für den Überstand des Balkens beträgt 25 mm. Nutzungsbedingungen: NKL 1 und KLED ständig.

**Nachweis der Auflagerpressung am Balken (oben)**

$$\begin{aligned}
 A_{\text{ef}} &= 180 \cdot (100 + 30 + 25) = 27.900 \text{ mm}^2 \\
 f_{c,90,d} &= 0,750 \cdot 1,54 = 1,16 \text{ N/mm}^2 \\
 k_{c,90} &= 1,75 \\
 \frac{\sigma_{c,90,d}}{k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}} &= \frac{(F_d / A_{\text{ef}})}{k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}} = \frac{(50.000 / 27.900)}{1,75 \cdot 1,16} = 0,88 \leq 1
 \end{aligned}$$

Nachweis der Schwellenpressung (unten)

$$\begin{aligned}
 A_{\text{ef}} &= 180 \cdot (100 + 30 + 30) = 28.800 \text{ mm}^2 \\
 k_{c,90} &= 1,5 \\
 \frac{\sigma_{c,90,d}}{k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}} &= \frac{\frac{F_d}{A_{\text{ef}}}}{k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}} = \frac{\frac{50.000}{28.800}}{1,5 \cdot 1,16} = \frac{1,74}{1,74} = 1,0 \leq 1
 \end{aligned}$$

Ende Beispiel 4-2

4.4 Druck unter einem Winkel zur Faserrichtung des Holzes

Die folgende Bedingung muss erfüllt sein:

$$\frac{\sigma_{c,\alpha,d}}{f_{c,\alpha,d}} = \frac{(F_d / A_{\text{ef}})}{f_{c,\alpha,d}} \leq 1 \quad (4.3)$$

Werte $f_{c,\alpha,d}$ können Tab. 2-9 (S.20) entnommen werden.

$$A_{\text{ef}} \quad A_{\text{ef}} = b_{\text{ef}} \cdot l_{\text{ef}} \text{ bzw. } A_{\text{ef}} = b_{\text{ef}} \cdot t_{\text{ef}}, \text{ siehe Abb. 4-2}$$

α Winkel zwischen Beanspruchungsrichtung und Faserrichtung des Holzes

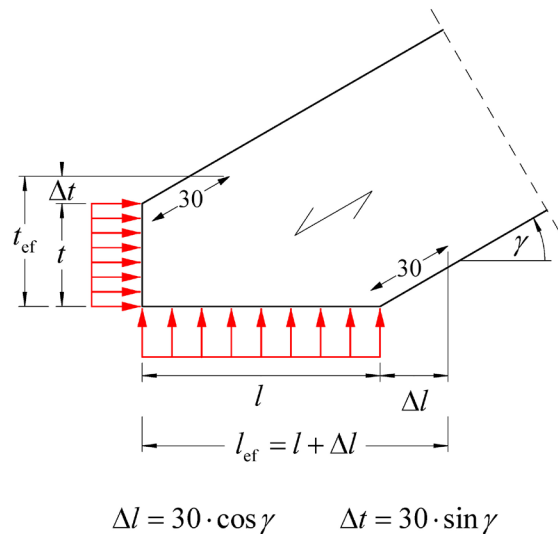
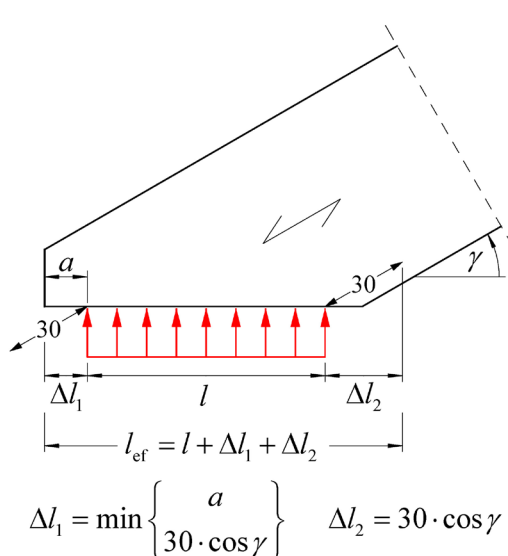
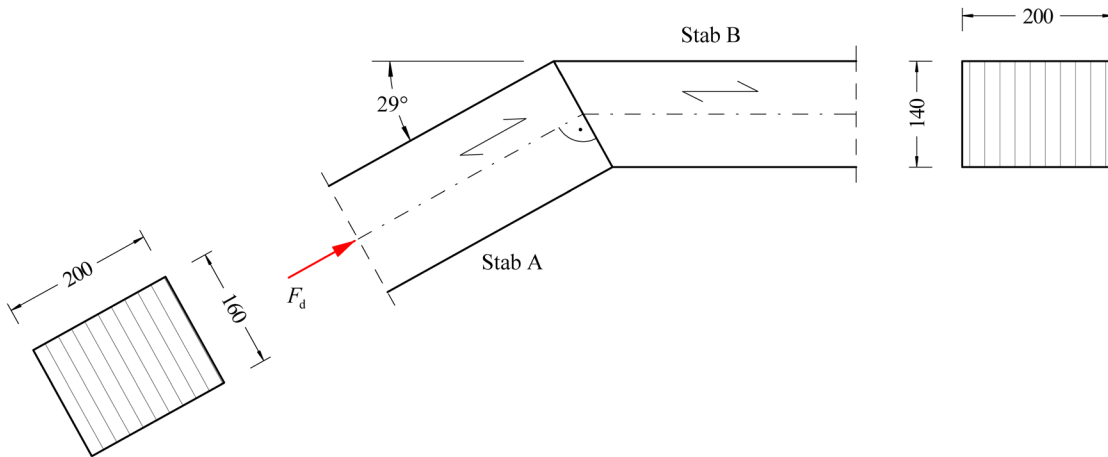


Abb. 4-2 Berechnung von A_{ef} , Maße in mm

Beispiel 4-3 Druck auf GL28h-Querschnitt unter Winkel α zur Faser

Stab A aus Brettschichtholz GL28h überträgt eine Druckkraft $F_d = 190 \text{ kN}$ unter einem Winkel von 29° in Stab B, der ebenfalls aus BSH GL28h besteht. Die Nutzungsklasse ist NKL 2 und die Klasse der Lasteinwirkungsdauer ist KLED lang.

**Nachweis der Druckspannungen in Stab B**

$$k_{c,90} = 1,75 \text{ (Auflagerdruck)}$$

$$f_{c,0,d} = 0,875 \cdot 17,2 = 15,1 \text{ N/mm}^2 / f_{c,90,d} = 0,875 \cdot 1,54 = 1,35 \text{ N/mm}^2$$

$$A_{ef} = b_{ef} \cdot l_{ef} = 200 \cdot (160 + 30 \cdot \cos(90^\circ - 29^\circ)) = 34.909 \text{ mm}^2$$

$$f_{c,\alpha,d} = \frac{f_{c,0,d}}{\frac{f_{c,0,d}}{k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} = \frac{15,1}{\frac{15,1}{1,75 \cdot 1,35} \cdot \sin^2 29^\circ + \cos^2 29^\circ} = 6,66 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Interpolation der Werte aus Tab. 2-9 (S.20): } f_{c,\alpha,d} = 0,875 \cdot 7,62 = 6,67 \text{ N/mm}^2$$

$$\frac{\sigma_{c,\alpha,d}}{f_{c,\alpha,d}} = \frac{\frac{F_{c,\alpha,d}}{A_{ef}}}{f_{c,\alpha,d}} = \frac{\frac{190.000}{34.909}}{6,67} = \frac{5,44}{6,67} = 0,82 < 1$$

Ende Beispiel 4-3

5 Querschnittsnachweise für Biegung

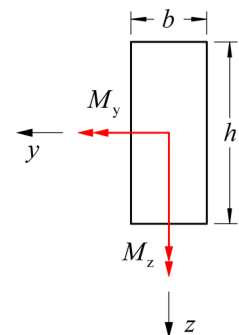
5.1 Regeln für die Bestimmung der Nettoquerschnittswerte bei Biegebeanspruchung:

- Querschnittsschwächungen müssen berücksichtigt werden.
- Löcher und Aussparungen im Biegedruckbereich müssen nicht als Querschnittsschwächungen berücksichtigt werden, wenn sie mit einem Baustoff ausgefüllt sind, dessen Steifigkeit mindestens der des Holzes oder Holzwerkstoffes entspricht.
- Bei örtlichen Schwächungen mit höchstens 10 % der Bruttoquerschnittsfläche darf die Berechnung des Netto-Flächenmomentes 2. Grades (Netto-Trägheitsmoment) hinreichend genau auf die Schwerlinie des ungeschwächten Querschnittes bezogen werden.

5.2 Biegung ohne Normalkraft

Die folgenden Bedingungen müssen gleichzeitig erfüllt sein:

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad \text{und} \quad k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (5.1)$$



$k_m = 0,7$ für Rechteckquerschnitte aus VH, BSH, Furnierschichtholz

$k_m = 1,0$ für andere Querschnitte und Baustoffe

$\sigma_{m,y,d}$ Bemessungswert der Biegeandspannung aus M_y ($\sigma_{m,y,d} = M_{y,d}/W_y$)

$\sigma_{m,z,d}$ Bemessungswert der Biegeandspannung aus M_z ($\sigma_{m,z,d} = M_{z,d}/W_z$)

W_y, W_z Widerstandsmomente des Querschnitts

$f_{m,y,d}, f_{m,z,d}$ Bemessungswerte der Biegefestigkeit für Beanspruchung aus M_y bzw. M_z

Holzwerkstoffe weisen unterschiedliche Biegefestigkeiten bei Beanspruchung durch Biegemomente um die y- und die z-Achse auf. Bei Holzwerkstoffplatten, z.B. Sperrholz, ist hier zwischen den Festigkeitswerten für Beanspruchung als Platte (Last senkrecht zur Plattenebene) oder als Scheibe (Last in der Plattenebene) zu unterscheiden.

Der Nachweis nach Gl. (5.1) für die einachsige Biegung vereinfacht sich für Vollholzquerschnitte

- aus Nadelholz mit Querschnittsabmessungen $b \geq 150 \text{ mm}$ bzw. $h \geq 150 \text{ mm}$
- sowie aus Laubholz

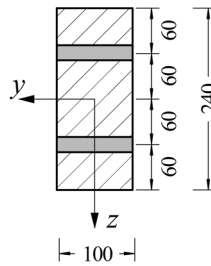
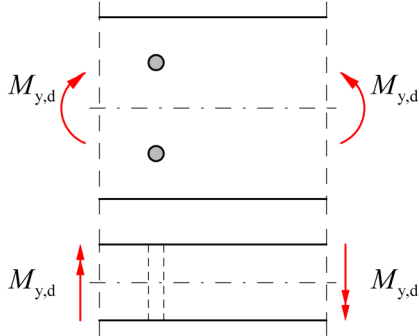
wie folgt:

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad \text{bzw.} \quad \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (5.2)$$

Beispiel 5-1 C30-Querschnitt mit zwei Stabdübeln unter einachsiger Biegung

Ein Balken aus Nadelholz C30 ist durch einachsige Biegung ohne Normalkraft belastet. Die Nutzungs-kategorie ist NKL 2 und die Klasse der Lasteinwirkungsdauer ist KLED kurz.

2 Stabdübel (SDÜ) $d = 20$ mm



$$M_{y,d} = 18,0 \text{ kNm}$$

Querschnittsnachweis im Bereich des geringsten Widerstandsmomentes

Es wird nur die Schwächung im Biegezugbereich berücksichtigt, da die Bohrung im Biegedruckbereich mit einem Stabdübel (Stahl, E-Modul größer als der von Holz) ausgefüllt ist.

Beträgt die Querschnittsschwächung höchstens 10% der Bruttoquerschnittsfläche?

$$A = 100 \cdot 240 = 24.000 \text{ mm}^2$$

$$\Delta A = 100 \cdot 1 \cdot 20 = 2.000 \text{ mm}^2$$

$$\frac{\Delta A}{A} = \frac{2.000}{24.000} = 0,083 < 0,10$$

Berechnung des Netto-Trägheitsmomentes und des Netto-Widerstandsmomentes bezogen auf die Schwerlinie des ungeschwächten Querschnittes

$$I_{y,n} = I_{y,\text{brutto}} - I_{y,\text{Schwächung}} \quad (\text{Werte } I_y \text{ bezogen auf die Schwerlinie des ungeschwächten Querschnittes})$$

$$I_{y,n} = \underbrace{\frac{100 \cdot 240^3}{12}}_{I_{y,\text{brutto}}} - \underbrace{\left(\frac{100 \cdot 20^3}{12} + \underbrace{60^2 \cdot 100 \cdot 20}_{\text{Steineranteil}} \right)}_{I_{y,\text{Schwächung}}} = 115,2 \cdot 10^6 - \left(\underbrace{0,067 \cdot 10^6}_{\substack{\text{Anteil} \\ \text{vernachlässigbar}}} + \underbrace{7,2 \cdot 10^6}_{\text{Steineranteil}} \right) = 108,0 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$W_{y,n} = \frac{I_{y,n}}{|z_{\text{Rand}}|} = \frac{I_{y,n}}{\frac{h}{2}} = \frac{108,0 \cdot 10^6}{120} = 0,900 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

Spannungsnachweis für einachsige Biegung

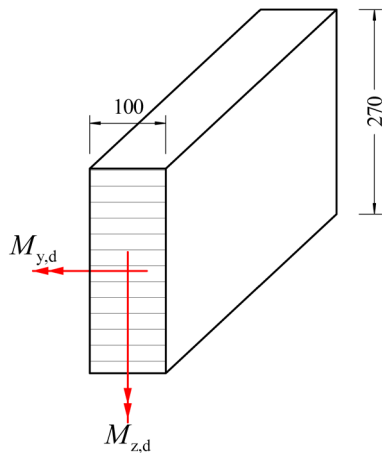
$$(h = 240 \text{ mm}) > 150 \text{ mm} \rightarrow f_{m,d} = \underbrace{k_{h,y}}_{1,0} \cdot \underbrace{1,125}_{\text{KLED kurz}} \cdot 18,5 = 20,8 \text{ N/mm}^2$$

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} = \frac{\frac{M_{y,d}}{W_{y,n}}}{f_{m,d}} = \frac{\frac{18 \cdot 10^6}{0,9 \cdot 10^6}}{20,81} = \frac{20,0}{20,8} = 0,96 \leq 1$$

Ende Beispiel 5-1

Beispiel 5-2 Zweiachsiges Biegen an einem Rechteckquerschnitt aus GL32c

Ein Balken aus BSH GL32c ist durch zweiachsiges Biegen ohne Normalkraft belastet. Die Nutzungs-kategorie ist NKL 1 und die Klasse der Lasteinwirkungsdauer ist KLED lang. Der Querschnitt ist aus mehr als 4 Lamellen hergestellt.



$$M_{y,d} = 17,0 \text{ kNm}$$

$$M_{z,d} = 2,0 \text{ kNm}$$

Berechnung der Widerstandsmomente und Biegeandspannungen

$$W_y = \frac{bh^2}{6} = \frac{100 \cdot 270^2}{6} = 1,215 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

$$W_z = \frac{hb^2}{6} = \frac{270 \cdot 100^2}{6} = 0,450 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{y,d}}{W_y} = \frac{17,0 \cdot 10^6}{1,215 \cdot 10^6} = 13,99 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{m,z,d} = \frac{M_{z,d}}{W_z} = \frac{2,0 \cdot 10^6}{0,450 \cdot 10^6} = 4,44 \text{ N/mm}^2$$

Spannungsnachweis für zweiachsiges Biegen

Die Querschnittshöhe des BSH-Trägers liegt unter 600 mm. Daher darf bei der hier wirkenden Flachkant-Biegebeanspruchung der Lamellen aus M_y der Bemessungswert der Biegefestigkeit erhöht werden. Außerdem darf der Bemessungswert der Biegefestigkeit für die Hochkant-Biegebeanspruchung aus M_z erhöht werden, da der Querschnitt aus mehr als 4 Lamellen hergestellt wurde.

$$(h = 270 \text{ mm}) < 600 \text{ mm} \rightarrow f_{m,y,d} = \underbrace{1,083}_{k_{h,y}} \cdot 0,875 \cdot 19,7 = 18,67 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{m,z,d} = 1,2 \cdot 0,875 \cdot 19,7 = 20,69 \text{ N/mm}^2$$

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = \frac{13,99}{18,67} + 0,7 \cdot \frac{4,44}{20,69} = 0,749 + 0,7 \cdot 0,215 = 0,90 \leq 1$$

$$k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,7 \cdot 0,749 + 0,215 = 0,74 \leq 1$$

Ende Beispiel 5-2

5.3 Biegung mit Zugkraft

Die folgenden Bedingungen müssen gleichzeitig erfüllt sein:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad \text{und} \quad \frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (5.3)$$

$\sigma_{t,0,d}$ Bemessungswert der Normalspannung aus Zugkraft F_d ($\sigma_{t,0,d} = F_d / A_n$)

A_n Nettoquerschnittsfläche

Erklärung der übrigen Parameter siehe Gl. (5.1).

Der Nachweis nach Gl. (5.3) für die einachsige Biegung vereinfacht sich für Vollholzquerschnitte

- aus Nadelholz mit den Querschnittsabmessungen $b \geq 150 \text{ mm}$ bzw. $h \geq 150 \text{ mm}$
- sowie aus Laubholz

wie folgt:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad \text{bzw.} \quad \frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (5.4)$$

5.4 Biegung mit Druckkraft

Die folgenden Bedingungen müssen gleichzeitig erfüllt sein:

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad \text{und} \quad \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (5.5)$$

$\sigma_{c,0,d}$ Bemessungswert der Normalspannung aus Zugkraft F_d ($\sigma_{c,0,d} = F_d / A_n$)

A_n Nettoquerschnittsfläche

Erklärung der übrigen Parameter siehe Gl. (5.1).

Der Nachweis nach Gl. (5.5) für die einachsige Biegung vereinfacht sich für Vollholzquerschnitte

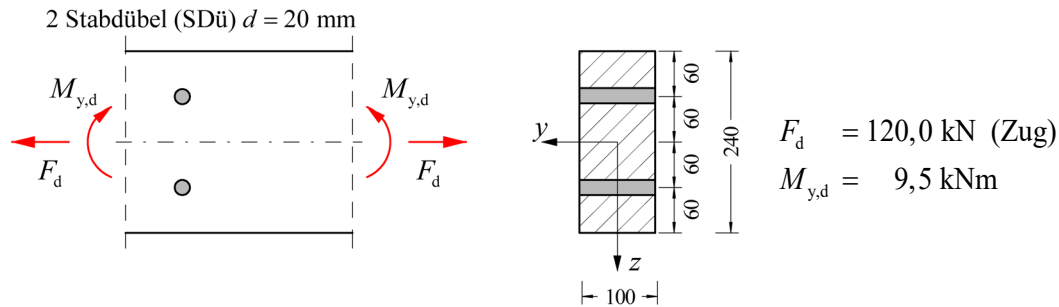
- aus Nadelholz mit den Querschnittsabmessungen $b \geq 150 \text{ mm}$ bzw. $h \geq 150 \text{ mm}$
- sowie aus Laubholz

wie folgt:

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad \text{bzw.} \quad \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (5.6)$$

Beispiel 5-3 C30-Querschnitt mit zwei Stabdübeln unter einachsiger Biegung mit Zug

Ein Balken aus Nadelholz C30 ist durch einachsige Biegung mit Zugkraft belastet. Die Nutzungsklasse ist NKL 2 und die Klasse der Lasteinwirkungsdauer ist KLED kurz.

**Nachweis im geschwächten Querschnitt**

Bei der Berechnung der Biegespannungen wird nur die Schwächung im Biegezugbereich berücksichtigt, da die Bohrung im Biegedruckbereich mit einem Stabdübel (Stahl, E-Modul größer als der von Holz) ausgefüllt ist. Bei der Berechnung der Spannung aus der Zugkraft F_d werden beide Schwächungen als wirksam angesetzt.

Berechnung der Netto-Querschnittsfläche für die Zugbelastung

$$A_{n,Zug} = 100 \cdot (240 - 2 \cdot 20) = 20.000 \text{ mm}^2$$

Berechnung des Netto-Widerstandsmomentes siehe Beispiel 5-1 (S.32).

Spannungsnachweis für einachsige Biegung mit Zugkraft

$$(h = 240 \text{ mm}) > 150 \text{ mm} \rightarrow f_{m,d} = \underbrace{1,0}_{k_{h,y}} \cdot 1,125 \cdot 18,5 = 20,8 \text{ N/mm}^2$$

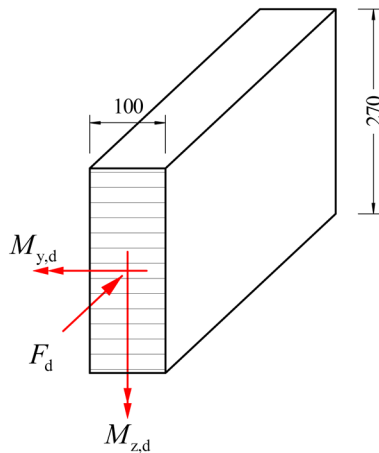
$$(\max\{b; h\} = 240 \text{ mm}) > 150 \text{ mm} \rightarrow f_{t,0,d} = \underbrace{1,0}_{k_{h,t}} \cdot 1,125 \cdot 11,7 = 13,2 \text{ N/mm}^2$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} = \frac{F_d}{A_{n,Zug}} + \frac{M_{y,d}}{W_{y,n}} = \frac{120 \cdot 10^3}{20 \cdot 10^3} + \frac{9,5 \cdot 10^6}{0,9 \cdot 10^6} = 0,455 + 0,507 = 0,96 \leq 1$$

Ende Beispiel 5-3

Beispiel 5-4 Zweiachsiges Biegung mit Druckkraft an einem Rechteckquerschnitt GL32c

Ein Balken aus BSH GL32c ist durch zweiachsiges Biegung mit Druckkraft belastet. Die Nutzungsklasse ist NKL 1 und die Klasse der Lasteinwirkungsdauer ist KLED lang. Der Querschnitt ist aus mehr als 4 Lamellen hergestellt.



$$F_d = 260,0 \text{ kN (Druckkraft)}$$

$$M_{y,d} = 6,5 \text{ kNm}$$

$$M_{z,d} = 2,0 \text{ kNm}$$

Berechnung der Widerstandsmomente siehe Beispiel 5-2.

Normalspannungen und Biegerandspannungen

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{F_d}{A} = \frac{260 \cdot 10^3}{100 \cdot 270} = 9,63 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{m,y,d}}{W_y} = \frac{6,5 \cdot 10^6}{1,215 \cdot 10^6} = 5,35 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{m,z,d} = \frac{M_{m,z,d}}{W_z} = \frac{2,0 \cdot 10^6}{0,450 \cdot 10^6} = 4,44 \text{ N/mm}^2$$

Spannungsnachweis für zweiachsiges Biegung mit Druckkraft

Die Querschnittshöhe des BSH-Trägers liegt unter 600 mm. Daher darf bei der hier wirkenden Flachkant-Biegebeanspruchung der Lamellen aus M_y der Bemessungswert der Biegefestigkeit erhöht werden. Außerdem darf der Bemessungswert der Biegefestigkeit für die Hochkant-Biegebeanspruchung aus M_z erhöht werden, da der Querschnitt aus mehr als 4 Lamellen hergestellt wurde.

$$f_{c,0,d} = 0,875 \cdot 15,1 = 13,2 \text{ N/mm}^2$$

$$k_{h,y} = \min \left\{ \left(\frac{600}{h} \right)^{0,1}; 1,1 \right\} = \min \left\{ \left(\frac{600}{270} \right)^{0,1}; 1,1 \right\} = 1,083$$

$$f_{m,y,d} = 1,083 \cdot 0,875 \cdot 19,7 = 18,67 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{m,z,d} = 1,2 \cdot 0,875 \cdot 19,7 = 20,69 \text{ N/mm}^2$$

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = \left(\frac{9,63}{13,2} \right)^2 + \frac{5,35}{18,67} + 0,7 \cdot \frac{4,44}{20,69} = 0,532 + 0,287 + 0,7 \cdot 0,215 = 0,97 < 1$$

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,532 + 0,7 \cdot 0,287 + 0,215 = 0,95 < 1$$

Ende Beispiel 5-4

6 Querschnittsnachweise für Schub

6.1 Schub aus Querkraft bei einachsiger Biegung

Die folgende Bedingung muss erfüllt sein:

$$\frac{\tau_d}{f_{v,d}} \leq 1 \rightarrow \text{für Rechteckquerschnitte: } \frac{1,5 \cdot \frac{V_d}{k_{cr} \cdot b \cdot h}}{f_{v,d}} = \frac{1,5 \cdot \frac{V_d}{b \cdot h}}{k_{cr} \cdot f_{v,d}} \leq 1 \quad (6.1)$$

τ_d Bemessungswert der Schubspannung

$f_{v,d}$ Bemessungswert der Schubfestigkeit

V_d Bemessungswert der Querkraft

$k_{cr} \cdot b$ effektive Querschnittsbreite rechtwinklig zur Lastrichtung;
der Einfluss von Rissen sollte durch eine Reduzierung der Breite b berücksichtigt werden:

$k_{cr} = 2,0 / f_{v,k}$ für Vollholz und Balkenschichtholz aus Nadelholz

$k_{cr} = 2,5 / f_{v,k}$ für Brettschichtholz

$k_{cr} = 1,0$ für andere Holzarten/Holzwerkstoffe

Bei Biegestäben aus Nadelholz dürfen die Werte für k_{cr} in Bereichen, die mindestens 1,50 m vom Hirnholzende des Holzes entfernt liegen, um 30 % erhöht werden.

$b; h$ Querschnittsbreite (senkrecht zur Last); Querschnittshöhe (in Richtung der Last)

6.2 Regeln für die Bestimmung der reduzierten Querkraft bei Auflagern

Für Biegeträger mit Auflagerung am unteren Trägersrand unter Belastung vom oberen Trägersrand darf der Nachweis der Schubspannungen im Bereich von End- und Zwischenauflagern, wenn dort keine Ausklinkungen und Durchbrüche sind, mit einer reduzierten Querkraft geführt werden.

Der Schubspannungsnachweis darf für die reduzierte Querkraft V_{red} im Abstand h (h = Trägerhöhe) vom Auflager rand geführt werden, siehe Abb. 6-1. Einzellasten innerhalb des Abstands h vom Auflager rand bleiben unberücksichtigt.

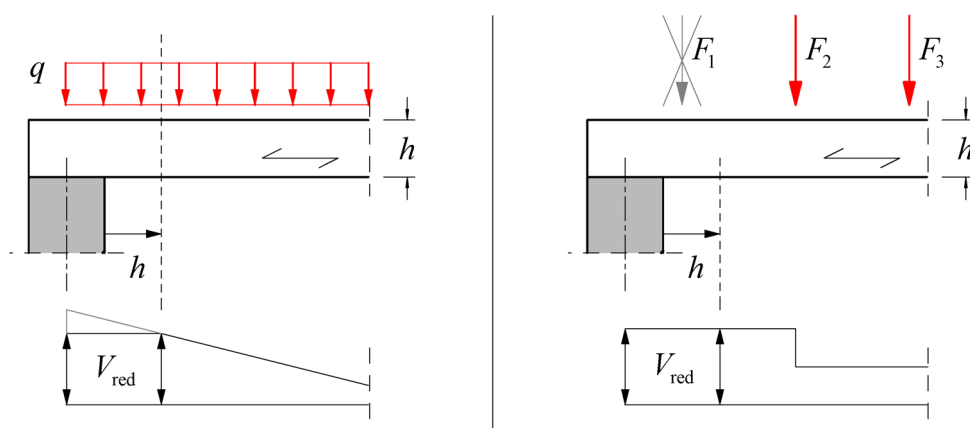


Abb. 6-1 Reduzierte Querkraft am Träger unter Streckenlast und Einzellasten

Bei Trägern mit geneigtem Rand kann für den Wert h die Bauteilhöhe über der Auflagermitte des Auflagers angesetzt werden.

6.3 Schub aus Querkraft bei zweiachsiger Biegung

Die folgende Bedingung muss erfüllt sein:

$$\left(\frac{\tau_{y,d}}{k_{cr} \cdot f_{v,d}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{z,d}}{k_{cr} \cdot f_{v,d}} \right)^2 \leq 1 \quad (6.2)$$

$\tau_{y,d}, \tau_{z,d}$ Bemessungswerte der Schubspannungen in y- bzw. z-Richtung

Für beide Hauptachsen muss der jeweilige Faktor k_{cr} berücksichtigt werden, siehe 6.1.

6.4 Schub aus Torsion

Die folgende Bedingung muss erfüllt sein:

$$\frac{\tau_{tor,d}}{k_{shape} \cdot k_{cr} \cdot f_{v,d}} \leq 1 \quad \text{mit} \quad \tau_{tor,d} = \frac{M_{tor,d}}{W_{tor}} \quad (6.3)$$

$\tau_{tor,d}$ Bemessungswert der Schubspannungen aus Torsion
Bei der Bestimmung der Torsionsspannung braucht der Faktor k_{cr} nicht berücksichtigt zu werden.

k_{shape} Kreisquerschnitte: $k_{shape} = 1,2$

Rechteckquerschnitte: $k_{shape} = \min \left\{ 1 + 0,05 \cdot (h/b), 1,3 \right\}$ (siehe nachfolgende Tabelle)

$M_{tor,d}$ Bemessungswert des Torsionsmomentes

W_{tor} Torsionswiderstandsmoment, zusätzlich angegeben: Torsionsträgheitsmoment I_{tor}

Kreisquerschnitte mit Durchmesser d : $I_{tor} = \frac{\pi}{32} \cdot d^4$ $W_{tor} = \frac{\pi}{16} \cdot d^3$

Rechteckquerschnitte Höhe h , Breite b : $I_{tor} = \alpha \cdot b^3 \cdot h$ $W_{tor} = \beta \cdot b^2 \cdot h$ ($b \leq h$)

Erläuterungen siehe auch Kap. 6.1

h/b	1,00	1,25	1,50	2,00	3,00	4,00	6,00	10,00	∞
α	0,140	0,171	0,196	0,229	0,263	0,281	0,299	3,13	0,333
β	0,208	0,221	0,231	0,246	0,267	0,282	0,299	0,313	0,333
k_{shape}	1,050	1,063	1,075	1,100	1,150	1,200	1,300	1,300	1,300

Tab. 6-1 Formbeiwerte k_{shape} für Schubspannungen aus Torsion in Rechteckquerschnitten

6.5 Schub aus Querkraft und Torsion

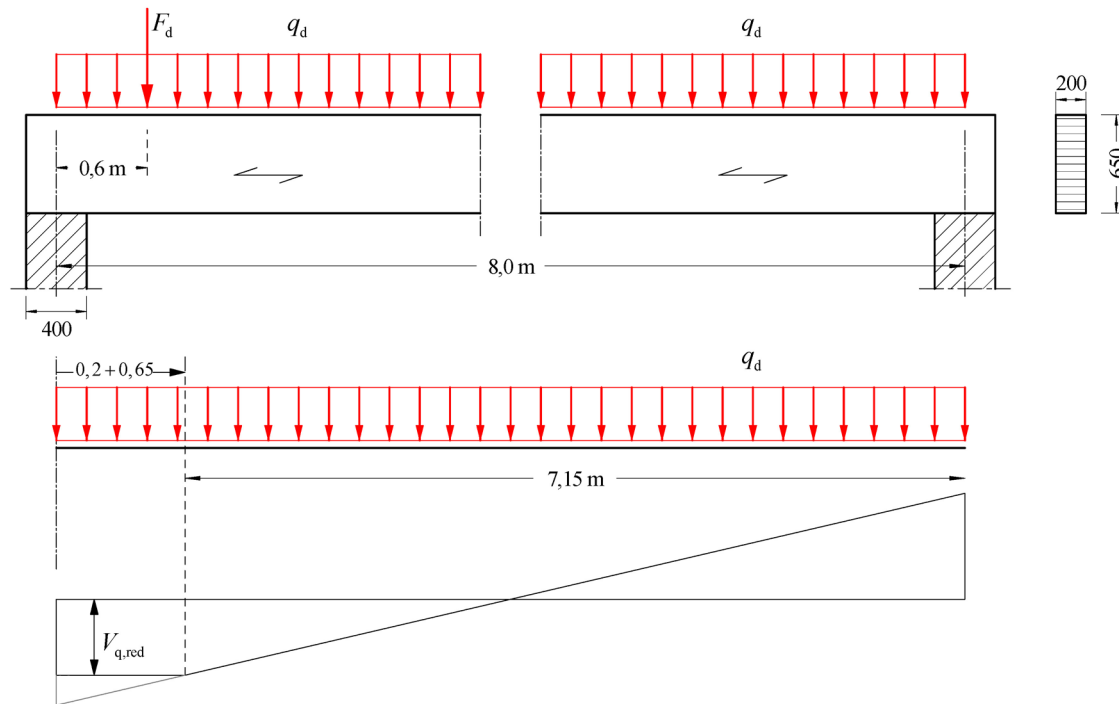
Die folgende Bedingung muss erfüllt sein:

$$\frac{\tau_{tor,d}}{k_{shape} \cdot k_{cr} \cdot f_{v,d}} + \left(\frac{\tau_{y,d}}{k_{cr} \cdot f_{v,d}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{z,d}}{k_{cr} \cdot f_{v,d}} \right)^2 \leq 1 \quad (6.4)$$

Erläuterungen siehe auch Kap. 6.1, 6.3 und 6.4 .

Beispiel 6-1 Nachweis der Schubspannungen an Träger GL28c aus reduzierter Auflagerkraft

Ein Balken aus Brettschichtholz GL28c ist durch eine Gleichstreckenlast $q_d = 45 \text{ kN/m}$ und eine Einzellast $F_d = 110 \text{ kN}$ in Auflagernähe belastet. Die Nutzungsklasse ist NKL 2 und KLED ist kurz.

**Ermittlung der Auflagerkräfte ohne Reduzierung**

$$V_F = \frac{F_d \cdot 7,4}{8,0} = \frac{110 \cdot 7,4}{8,0} = 101,75 \text{ kN (Auflagerkraft aus } F_d)$$

$$V_q = \frac{q_d \cdot l}{2} = \frac{45 \cdot 8}{2} = 180,0 \text{ kN (Auflagerkraft aus } q_d)$$

$$V = V_F + V_q = 101,75 + 180,0 = 281,75 \text{ kN}$$

Nachweis der Schubspannung mit der vollen rechnerischen Querkraft am linken Auflager

$$\frac{\tau_d}{k_{cr} \cdot f_{v,d}} = \frac{1,5 \cdot V}{A} = \frac{1,5 \cdot 281.750}{200 \cdot 650} = \frac{3,25}{1,73} = 1,88 > 1 \rightarrow \text{Berechnung red. Querkraft erforderlich}$$

Berechnung der reduzierten Querkraft am linken Auflager

Anteil aus Einzellast F entfällt, da die Entfernung zum Auflagerrand größer als die Querschnittshöhe ist. Hier ist also $V_{F,red} = 0$.

Anteil aus Streckenlast q

$$V_{q,red} = 180 - 45 \cdot 0,85 = 141,75 \text{ kN}$$

Nachweis der Schubspannung aus der reduzierten Querkraft

$$V_{red} = V_{F,red} + V_{q,red} = 0,0 + 141,75 \rightarrow \frac{\tau_d}{k_{cr} \cdot f_{v,d}} = \frac{1,5 \cdot V_{red}}{A} = \frac{1,5 \cdot 141.750}{200 \cdot 650} = \frac{1,64}{1,73} = 0,95 < 1$$

Ende Beispiel 6-1

7 Stabilitätsnachweis von Druckstäben (Biegeknicken nach Ersatzstabverfahren)

Die folgende Bedingung muss erfüllt sein:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad \text{und} \quad \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (7.1)$$

$\sigma_{c,0,d}$ Bemessungswert der Druckspannung parallel zur Faserrichtung ($\sigma_{c,0,d} = F_d / A$)

F_d Bemessungswert der Druckkraft

A Querschnittsfläche

$k_m = 0,7$ für Rechteckquerschnitte aus VH, BSH, Furnierschichtholz

$k_m = 1,0$ für andere Querschnitte und Baustoffe

$k_{c,y}; k_{c,z}$ *Knickbeiwerte* für Knicken um die y- bzw. z-Achse abhängig von Materialeigenschaften und Schlankheitsgrad λ_y bzw. λ_z

$f_{c,0,d}$ Bemessungswert der Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung

7.1 Bestimmung des Schlankheitsgrades

$$\lambda_y = \frac{l_{\text{ef},y}}{i_y} \quad \text{bzw.} \quad \lambda_z = \frac{l_{\text{ef},z}}{i_z} \quad (7.2)$$

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} \quad \text{bzw.} \quad i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} \quad (7.3)$$

l_{ef} Ersatzstablänge siehe Tab. 7-3 (S.43) bis Tab. 7-5 (S.44)

$i_y; i_z$ Trägheitsradius (z.B. Rechteck: $i_y = \frac{h_{\text{in z-Richtung}}}{\sqrt{12}}$ bzw. $i_z = \frac{h_{\text{in y-Richtung}}}{\sqrt{12}}$ und Kreis: $i = \frac{r}{2}$)

$I_y; I_z$ Flächenträgheitsmoment des Querschnitts um die y- bzw. z-Achse

7.2 Berechnung des Knickbeiwertes

$$k_{c,y} = \min \left\{ \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{\text{rel},y}^2}} ; 1 \right\} \quad \text{bzw.} \quad k_{c,z} = \min \left\{ \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{\text{rel},z}^2}} ; 1 \right\} \quad (7.4)$$

$$k_y = 0,5 \cdot \left[1 + \beta_c \cdot (\lambda_{\text{rel},y} - 0,3) + \lambda_{\text{rel},y}^2 \right] \quad \text{bzw.} \quad k_z = 0,5 \cdot \left[1 + \beta_c \cdot (\lambda_{\text{rel},z} - 0,3) + \lambda_{\text{rel},z}^2 \right] \quad (7.5)$$

$$\lambda_{\text{rel},y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad \text{bzw.} \quad \lambda_{\text{rel},z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad (7.6)$$

β_c Beiwert für Imperfektionen
 = 0,2 für Vollholz
 = 0,1 für Brettschichtholz und Holzwerkstoffe

Alternativ zur Berechnung des Knickbeiwertes nach Gln. (7.4), (7.5) und (7.6) kann dieser aus Tab. 7-1 (S.42) entnommen werden.

7.3 Regeln für den Nachweis der Knickstabilität eines Druckstabes

Befinden sich im mittleren Drittel des Ersatzstabes Querschnittsschwächungen, die eine Weiterleitung der Druckspannungen unterbrechen, ist die Druckspannung $\sigma_{c,0,d}$ mit der Nettofläche A_n zu ermitteln.

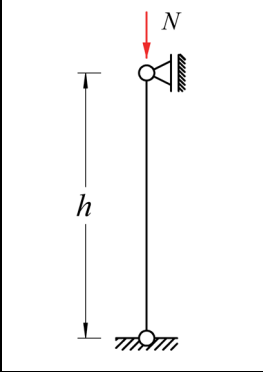
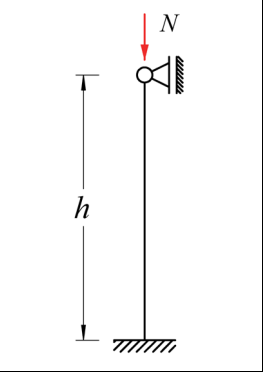
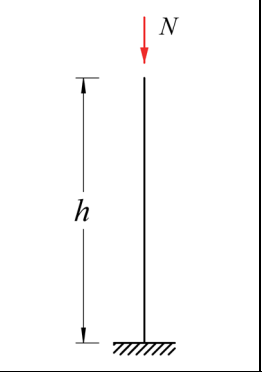
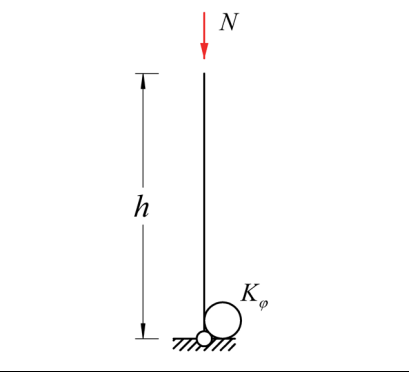
λ	Knickbeiwerte für Nadelvollholz und Brettschichtholz							
	C24	C30	GL24c	GL24h	GL28c	GL28h	GL32c	GL32h
15	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
20	0,991	0,989	0,999	0,998	0,999	0,997	1,000	0,996
25	0,971	0,968	0,990	0,989	0,990	0,987	0,992	0,986
30	0,948	0,943	0,980	0,978	0,980	0,975	0,982	0,975
35	0,920	0,914	0,967	0,965	0,968	0,961	0,971	0,960
40	0,887	0,878	0,952	0,948	0,954	0,943	0,957	0,942
45	0,846	0,834	0,933	0,927	0,935	0,919	0,940	0,917
50	0,796	0,781	0,906	0,897	0,910	0,885	0,917	0,882
55	0,739	0,720	0,870	0,857	0,876	0,839	0,887	0,834
60	0,676	0,655	0,823	0,803	0,830	0,779	0,846	0,773
65	0,614	0,591	0,763	0,740	0,773	0,711	0,794	0,703
70	0,554	0,531	0,698	0,672	0,709	0,641	0,733	0,633
75	0,499	0,477	0,633	0,606	0,644	0,575	0,669	0,567
80	0,450	0,429	0,571	0,545	0,582	0,516	0,608	0,508
85	0,406	0,387	0,516	0,491	0,526	0,464	0,551	0,457
90	0,368	0,351	0,466	0,443	0,476	0,418	0,499	0,412
95	0,335	0,318	0,423	0,402	0,432	0,379	0,454	0,373
100	0,305	0,290	0,385	0,365	0,394	0,344	0,413	0,339
105	0,279	0,265	0,352	0,334	0,359	0,314	0,378	0,309
110	0,256	0,244	0,322	0,305	0,329	0,287	0,346	0,283
115	0,236	0,224	0,296	0,281	0,303	0,264	0,319	0,260
120	0,218	0,207	0,273	0,259	0,279	0,243	0,294	0,239
125	0,202	0,192	0,253	0,239	0,258	0,225	0,272	0,221
130	0,188	0,178	0,234	0,222	0,240	0,208	0,252	0,205
135	0,175	0,166	0,218	0,206	0,223	0,194	0,235	0,191
140	0,163	0,155	0,203	0,192	0,208	0,181	0,219	0,178
145	0,153	0,145	0,190	0,180	0,194	0,169	0,204	0,166
150	0,143	0,136	0,178	0,168	0,182	0,158	0,191	0,155
155	0,134	0,127	0,167	0,158	0,170	0,148	0,180	0,146
160	0,126	0,120	0,157	0,148	0,160	0,139	0,169	0,137
165	0,119	0,113	0,147	0,140	0,151	0,131	0,159	0,129
170	0,112	0,107	0,139	0,132	0,142	0,124	0,150	0,122
175	0,106	0,101	0,131	0,124	0,134	0,117	0,142	0,115
180	0,101	0,095	0,124	0,118	0,127	0,110	0,134	0,109
185	0,096	0,091	0,118	0,112	0,121	0,105	0,127	0,103
190	0,091	0,086	0,112	0,106	0,114	0,099	0,121	0,098
195	0,086	0,082	0,106	0,101	0,109	0,094	0,115	0,093
200	0,082	0,078	0,101	0,096	0,104	0,090	0,109	0,088
205	0,078	0,074	0,096	0,091	0,099	0,086	0,104	0,084
210	0,075	0,071	0,092	0,087	0,094	0,082	0,099	0,080
215	0,071	0,068	0,088	0,083	0,090	0,078	0,095	0,077
220	0,068	0,065	0,084	0,079	0,086	0,074	0,090	0,073
225	0,065	0,062	0,080	0,076	0,082	0,071	0,087	0,070
230	0,063	0,059	0,077	0,073	0,079	0,068	0,083	0,067
235	0,060	0,057	0,074	0,070	0,075	0,065	0,079	0,064
240	0,058	0,055	0,071	0,067	0,072	0,063	0,076	0,062
245	0,055	0,052	0,068	0,064	0,069	0,060	0,073	0,059
250	0,053	0,050	0,065	0,062	0,067	0,058	0,070	0,057

Tab. 7-1 Knickbeiwerte k_c für Nadelvollholz und Brettschichtholz

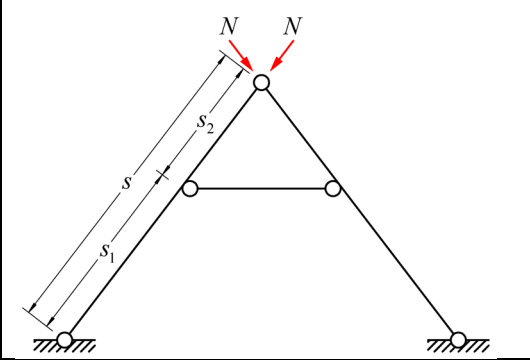
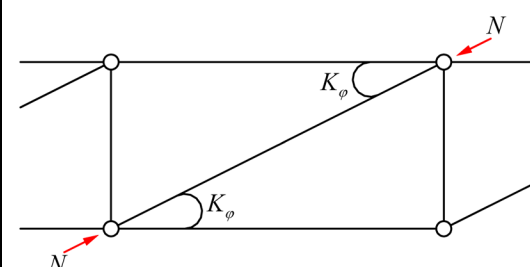
Zur Berechnung der Querschnitts- und Verbindungssteifigkeiten nach Tab. 7-3 und Tab. 7-5 sind die folgenden Moduln einzusetzen:

$$E = \frac{E_{0,\text{mean}}}{\gamma_M}; \quad G = \frac{G_{\text{mean}}}{\gamma_M}; \quad K = \frac{2}{3} \cdot \frac{K_{\text{ser}}}{\gamma_M} \quad (7.7)$$

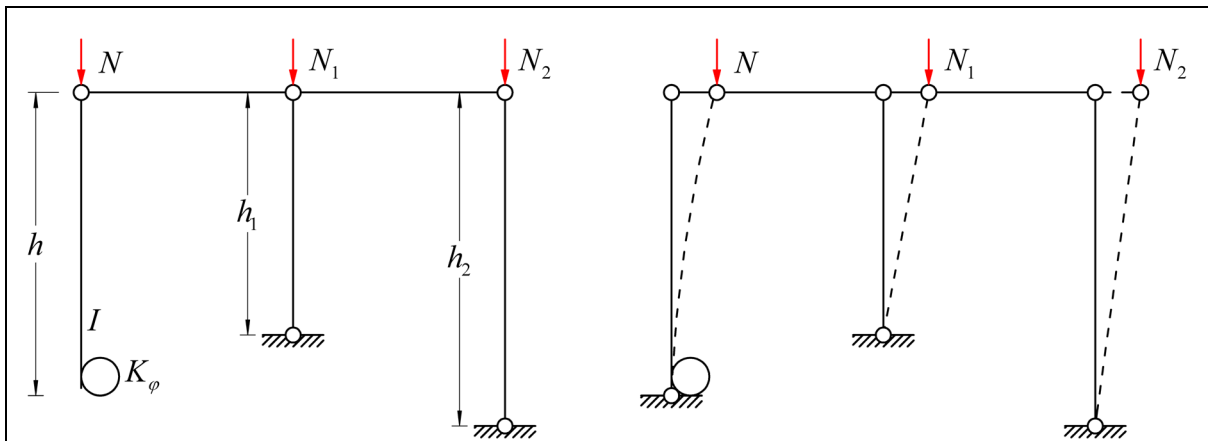
K_{ser} Verschiebungsmodul des verwendeten Verbindungsmittels

			
$\beta = 1$ $l_{\text{ef}} = h$	$\beta = 0,71$ $l_{\text{ef}} = 0,71 \cdot h$	$\beta = 2$ $l_{\text{ef}} = 2 \cdot h$	$\beta = \sqrt{4 + \frac{\pi^2 \cdot (E_{0,\text{mean}}/\gamma_M) \cdot I}{h \cdot K_\phi}}$ K_ϕ Federkonstante elast. Einspannung $l_{\text{ef}} = \beta \cdot h$

Tab. 7-2 Knicklängen l_{ef} bei Einzelstabknicken

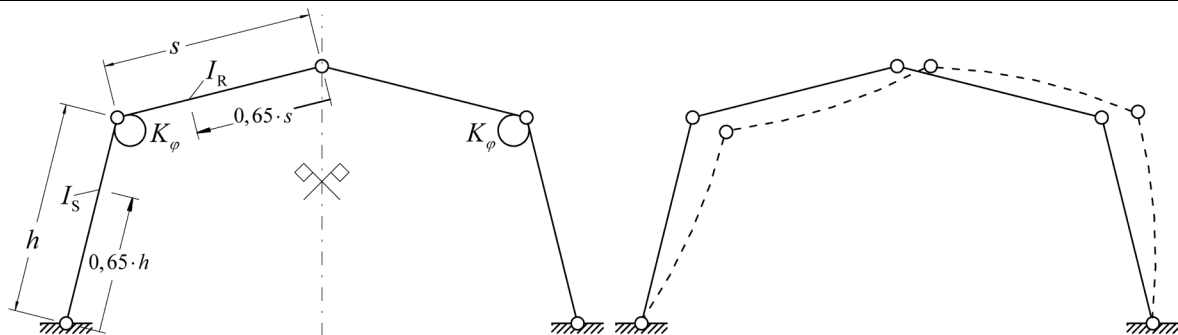
	für $s_1 < 0,7 \cdot s$ $\beta = 0,8 \rightarrow l_{\text{ef}} = 0,8 \cdot s$ für $s_1 \geq 0,7 \cdot s$ $\beta = 1,0 \rightarrow l_{\text{ef}} = 1,0 \cdot s$ für antisymmetrisches Knicken
	gelenkige Lagerung ($K_\phi \approx 0$): $\beta = 1,0 \rightarrow l_{\text{ef}} = 1,0 \cdot s$ nachgiebige Einspannung ($K_\phi \gg 0$): $\beta = 0,8 \rightarrow l_{\text{ef}} = 0,8 \cdot s$

Tab. 7-3 Knicklängen l_{ef} bei Kehlbalkendächern und Fachwerkstäben

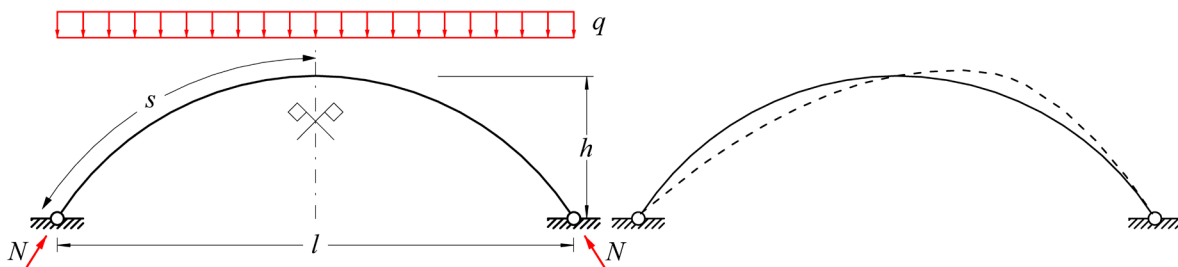


Für die eingespannte Stütze: $l_{ef} = \beta \cdot h$ Biegesteifigkeit $E \cdot I = (E_{0,mean} / \gamma_M) \cdot I$

$$\beta = \sqrt{\left(4 + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{h \cdot K_\phi}\right) \cdot (1 + \alpha)} \quad \text{mit} \quad \alpha = \frac{h}{N} \cdot \sum \frac{N_i}{h_i}$$



für $0,15 \cdot l \leq h \leq 0,5 \cdot l$: $l_{ef} = 1,25 \cdot s$



N_S = Druckkraft Stiel; Neigungswinkel des Stiels gegenüber der Senkrechten $\leq 15^\circ$

N_R = Druckkraft Riegel; Neigungswinkel des Riegels gegenüber der Waagerechten $\leq 20^\circ$

Bei linear veränderlicher Querschnitten wird I_S bei $0,65 \cdot h$ bzw. I_R bei $0,65 \cdot s$ berechnet (siehe Zeichnung).

Knicklänge Stiel: $l_{ef} = \beta_S \cdot h$ Biegesteifigkeit Stiel: $E \cdot I_S = (E_{0,mean} / \gamma_M) \cdot I_S$

$$\beta_S = \sqrt{4 + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_S}{h} \cdot \left(\frac{1}{K_\phi} + \frac{s}{3 \cdot E \cdot I_R} \right) + \frac{E \cdot I_S \cdot N_R \cdot s^2}{E \cdot I_R \cdot N_S \cdot h^2}}$$

Knicklänge Riegel: $l_{ef} = \beta_R \cdot s$ Biegesteifigkeit Riegel: $E \cdot I_R = (E_{0,mean} / \gamma_M) \cdot I_R$

$$\beta_R = \beta_S \cdot \frac{h}{s} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I_R \cdot N_S}{E \cdot I_S \cdot N_R}}$$

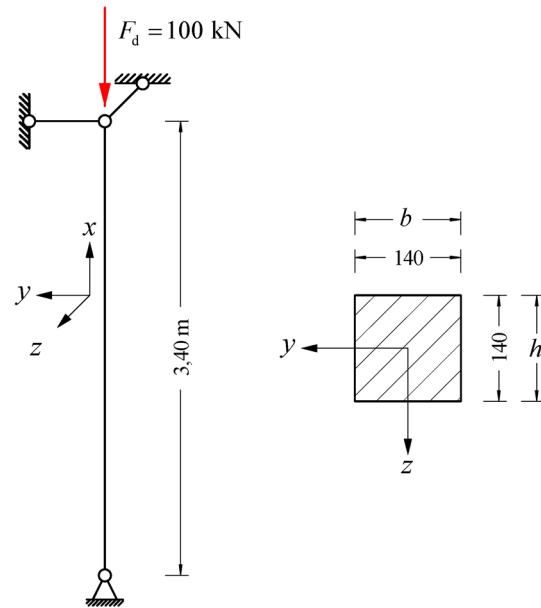
Tab. 7-4 Knicklängen l_{ef} bei Stützenreihen, Bögen und Rahmen

Beispiel 7-1 Stabilitätsnachweis einer quadratischen Vollholzstütze C30

Eine Stütze aus Nadelvollholz C30 ist durch eine zentrische Druckkraft belastet.

Nutzungsklasse: NKL 2

Klasse der Lasteinwirkungsdauer: KLED=lang



Berechnung des Trägheitsradius

$$i_y = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{\frac{b \cdot h^3}{12}}{b \cdot h}} = \sqrt{\frac{h^2}{12}} = \frac{h}{\sqrt{12}} \approx 0,289 \cdot h = 0,289 \cdot 140 = 40,4 \text{ mm}$$

$$i_z = 0,289 \cdot b = 0,289 \cdot 140 = 40,4 \text{ mm}$$

Berechnung des Schlankheitsgrades λ und Interpolation von Knickbeiwert k_c aus Tab. 7-1 (S.42)

$$l_{\text{ef},y} = l_{\text{ef},z} = \beta \cdot s = 1,0 \cdot 3.400 = 3.400 \text{ mm}$$

$$\lambda_y = \lambda_z = \frac{l_{\text{ef}}}{i} = \frac{3.400}{40,4} = 84,1 \rightarrow k_c = 0,410$$

Direkte Berechnung des Knickbeiwertes k_c zum Vergleich:

$$\lambda_{\text{rel},y} = \lambda_{\text{rel},z} = \frac{\lambda_y}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{84,1}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{23,0}{8.000}} = 1,435$$

$$k_y = k_z = 0,5 \cdot \left[1 + \beta_c \cdot (\lambda_{\text{rel},y} - 0,3) + \lambda_{\text{rel},y}^2 \right] = 0,5 \cdot \left[1 + 0,2 \cdot (1,435 - 0,3) + 1,435^2 \right] = 1,643$$

$$k_{c,y} = k_{c,z} = \min \left\{ \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{\text{rel},y}^2}}; 1 \right\} = \left\{ \frac{1}{1,643 + \sqrt{1,643^2 - 1,435^2}}; 1 \right\} = 0,409$$

Nachweis der Knickstabilität

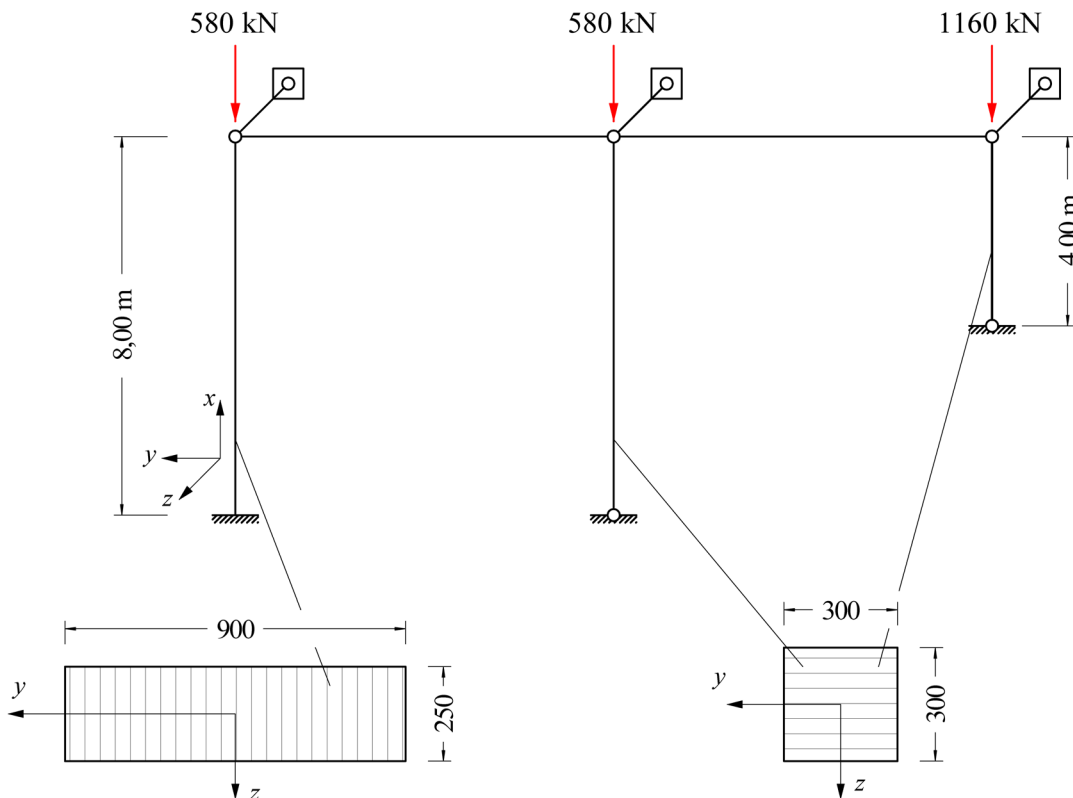
$$f_{c,0,d} = 0,875 \cdot 14,2 = 12,43 \text{ N/mm}^2$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} = \frac{\frac{F_d}{A}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} = \frac{\frac{100.000}{140 \cdot 140}}{0,409 \cdot 12,43} = \frac{5,10}{5,07} = 1,004 \approx 1 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

Ende Beispiel 7-1

Beispiel 7-2 Stabilitätsnachweis einer Stützenreihe GL28h

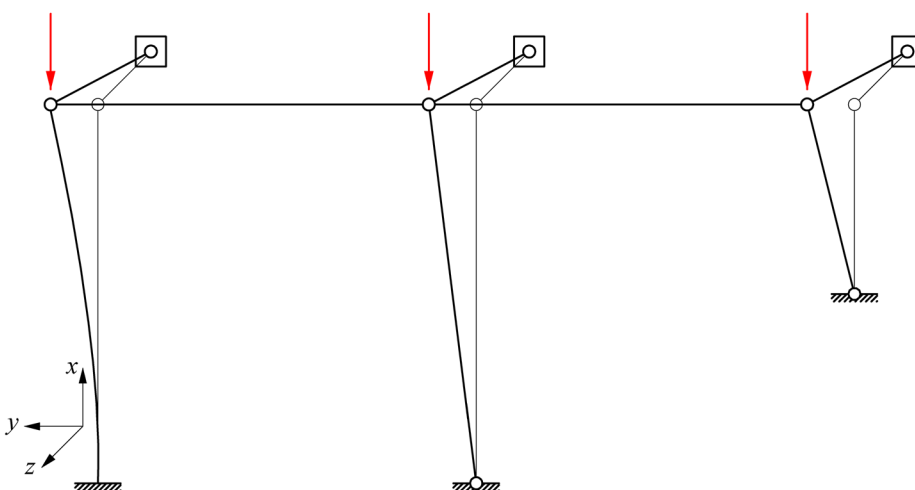
Die Knickstabilität einer Stützenreihe aus BSH GL28h wird untersucht. Die Nutzungsklasse ist NKL 1 und die Klasse der Lasteinwirkungsdauer ist KLED mittel.



Linke Stütze – Schlankheitsgrad bei Einzelstabknicken um y (Ausweichen in z -Richtung)

$$\left. \begin{aligned} i_y &= \sqrt{\frac{1}{12}} \cdot h = 0,289 \cdot 250 = 72,2 \text{ mm} \\ l_{\text{ef},y} &= \beta \cdot s = 0,71 \cdot 8.000 = 5.680 \text{ mm} \end{aligned} \right\} \rightarrow \lambda_y = \frac{l_{\text{ef},y}}{i_y} = \frac{5.680}{72,2} = 78,7$$

Linke Stütze – Schlankheitsgrad bei Systemknicken um z (Ausweichen in y-Richtung)



$$\alpha = \frac{h}{N} \cdot \sum_{i=1}^2 \frac{N_i}{h_i} = \frac{8,0}{580} \cdot \left(\frac{580}{8,0} + \frac{1.160}{4,0} \right) = 1 + 4 = 5$$

$$\beta = \sqrt{\left(4 + \frac{\pi^2 \cdot (E_{0,\text{mean}}/\gamma_M) \cdot I}{h \cdot K_\varphi}\right) \cdot (1 + \alpha)} = \sqrt{\left(4 + \underbrace{\frac{\pi^2 \cdot (E_{0,\text{mean}}/\gamma_M) \cdot I}{h \cdot K_\varphi}}_{\substack{=0 \\ \varphi=\infty}}\right) \cdot (1 + 5)} = \sqrt{24} = 4,90$$

$$\left. \begin{aligned} i_z &= \sqrt{\frac{1}{12}} \cdot b = 0,289 \cdot 900 = 259,8 \text{ mm} \\ l_{\text{ef},z} &= \beta \cdot s = 4,90 \cdot 8.000 = 39.200 \text{ mm} \end{aligned} \right\} \rightarrow \lambda_z = \frac{l_{\text{ef},z}}{i_z} = \frac{39.200}{259,8} = 150,9 > \lambda_y \rightarrow \lambda_z \text{ maßgeblich}$$

$$k_{c,z} = 0,160$$

Nachweis der Knickstabilität der linken Stütze (Einzelstabknicken)

$$f_{c,0,d} = 1,0 \cdot 17,2 = 16,3 \text{ N/mm}^2$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} = \frac{\frac{F_d}{A}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} = \frac{\frac{580.000}{900 \cdot 250}}{0,160 \cdot 17,2} = 0,94 < 1 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

Nachweis der Knickstabilität der mittleren Stütze (Einzelstabknicken), k_c aus Tab. 7-2 (S.42)

$$i_y = i_z = \sqrt{\frac{1}{12}} \cdot b = 0,289 \cdot 300 = 86,6 \text{ mm}$$

$$\lambda = \frac{l_{\text{ef}}}{i} = \frac{8.000}{86,6} = 92,4 \rightarrow k_c = 0,399$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c \cdot f_{c,0,d}} = \frac{\frac{580.000}{300 \cdot 300}}{0,399 \cdot 17,2} = 0,94 < 1 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

Nachweis der Knickstabilität der rechten Stütze (Einzelstabknicken, gleicher Querschnitt), k_c aus Tab. 7-2 (S.42)

$$\lambda = \frac{l_{\text{ef}}}{i} = \frac{4.000}{86,6} = 46,2 \rightarrow k_c = 0,904$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c \cdot f_{c,0,d}} = \frac{\frac{1.160.000}{300 \cdot 300}}{0,904 \cdot 17,2} = 0,83 < 1 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

Ende Beispiel 7-2

8 Stabilitätsnachweis von Biegestäben ohne Normalkraft (Biegedrillknicken/Kippen nach Ersatzstabverfahren)

8.1 Biegestäbe mit Rechteckquerschnitt ohne Normalkraft

Für einachsige Biegung aus M_y um die starke Achse y muss die folgende Bedingung erfüllt sein:

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}} \leq 1 \quad (8.1)$$

Bei zweiachsiger Biegung muss der Tragfähigkeitsnachweis für den Querschnitt nach Gl. (5.1) erfüllt sein. Bei Querschnittabmessungen $(h/b) \leq 4$ darf der Stabilitätsnachweis wie folgt geführt werden:

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}} + \left(\frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \right)^2 \leq 1 \quad \text{und} \quad \left(\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (8.2)$$

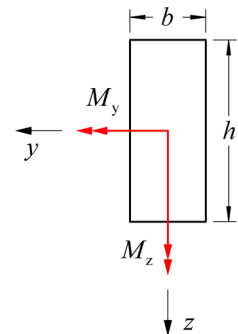
$\sigma_{m,y,d}$ Bemessungswert der Biegerandspannung für das Moment um die starke Achse y

$\sigma_{m,z,d}$ Bemessungswert der Biegerandspannung für das Moment um die schwache Achse z

Bei Stäben mit linear veränderlicher Querschnittshöhe dürfen die Querschnittswerte im Abstand der 0,65-fachen Stablänge, gemessen vom Stabende mit dem kleineren Stabquerschnitt, und der Größtwert des Biegemoments im Stab dem Nachweis zugrunde gelegt werden.

k_{crit} Kippbeiwert, siehe Tab. 8-2 (S.51) oder Berechnung mit Gleichung (8.3)

$f_{m,y,d}; f_{m,z,d}$ Bemessungswerte der Biegefestigkeit für Biegung um y- bzw. z-Achse



Berechnung des Kippbeiwertes:

$$k_{crit} = \begin{cases} 1 & \text{für } \lambda_{rel,m} \leq 0,75 \\ 1,56 - 0,75 \cdot \lambda_{rel,m} & \text{für } 0,75 < \lambda_{rel,m} \leq 1,4 \\ 1/\lambda_{rel,m}^2 & \text{für } \lambda_{rel,m} > 1,4 \end{cases} \quad (8.3)$$

Der bezogene Kippschlankheitsgrad $\lambda_{rel,m}$ wird aus der kritischen Biegespannung nach der Stabilitätstheorie mit den 5 %-Quantilwerten der Steifigkeiten berechnet:

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\frac{\pi \cdot \sqrt{E_{0,05} \cdot I_z \cdot G_{05} \cdot I_{tor}}}{l_{ef} \cdot W_y}}} \quad (8.4)$$

Durch Einsetzen von I_z , W_y und I_{tor} ($\alpha = 0,333$) sowie Umformung von Gl. (8.4) erhält man:

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\pi \cdot \sqrt{(1,0 \text{ bzw. } 1,4)^1 \cdot E_{0,05} \cdot G_{05}}}} \cdot \sqrt{\frac{l_{ef} \cdot h}{b^2}} = \kappa_m \cdot \underbrace{\sqrt{\frac{l_{ef} \cdot h}{b^2}}}_{\text{Querschnittswerte}} \quad (8.5)$$

$\lambda_{rel,m}$ Bezogener Kippschlankheitsgrad

1) Bei Brettschichtholz darf mit dem Faktor 1,4 multipliziert werden

κ_m Materialkonstante, siehe Tab. 8-1 (S.51)

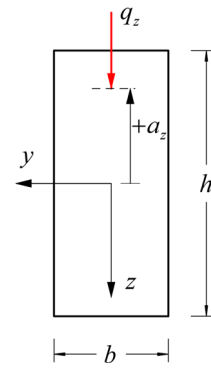
l_{ef} Ersatzstablänge für Kippen, siehe Tab. 8-3 (S.52)

Wird die Druckzone des Biegestabes durch Einzelabstützungen (z.B. Verbände) im Abstand a gegen seitliches Ausweichen gehalten, dann ist $l_{ef} = a$

Berechnung von l_{ef} für Rechteckquerschnitte:

$$l_{\text{ef}} = \frac{l}{a_1 \cdot \left[1 - a_2 \cdot \frac{a_z}{l} \cdot \sqrt{\frac{E_{0,05}}{4 \cdot G_{05}}} \right]} \cdot \frac{1}{\alpha \cdot \beta} \quad (8.6)$$

Abb. 8-1 (rechts):
Lage der Achsen



a_1, a_2

siehe Tabelle der Ersatzstablängen für Kippen Tab. 8-3 (S.52)

a_z

Abstand des Lastangriffspunktes in z-Richtung (Vorzeichen beachten, Abb. 8-1)

$$\sqrt{\frac{E_{0,05}}{4 \cdot G_{05}}}$$

= 2,0 ist hinreichend genau für NH C24-C40 und BSH GL24h/c-GL32h/c

$\alpha; \beta$

bei der Untersuchung der Stabilität eines gabelgelagerten Einfeldträgers dürfen die Einflüsse einer Nachgiebigkeit der Torsionseinspannung am Auflager, einer elastischen Bettung gegen Verschieben und einer elastischen Bettung gegen Verdrehen durch Beiwerte α und β berücksichtigt werden. Im Rahmen dieser Lehrveranstaltung werden nur Einfeldträger mit starrer Lagerung untersucht, daher: $\alpha = \beta = 1,0$

8.2 Regeln für den Nachweis der Kippstabilität

Biegestäbe müssen an den Auflagern gegen Verdrehen um die Längsachse gesichert sein.

Bei Biegestäben mit Rechteckquerschnitt ist der Nachweis der Kippstabilität erfüllt, wenn $k_{\text{crit}} = 1$, also $\lambda_{\text{rel,m}} \leq 0,75$ ist. Durch Einsetzen von $\lambda_{\text{rel,m}} \leq 0,75$ in Gl. (8.5) und anschließendes Umformen erhält man die nachfolgende Gleichung. Die zugehörigen Werte sind in Tab. 8-1 gegeben.

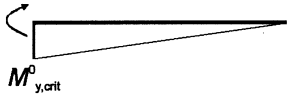
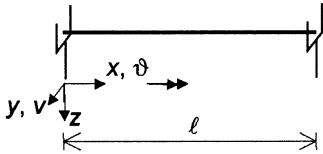
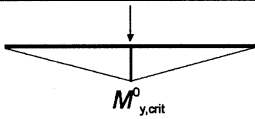
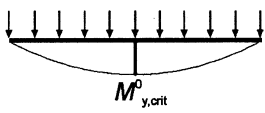
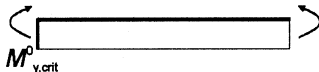
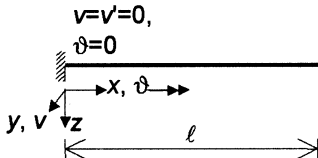
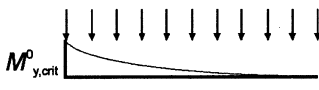
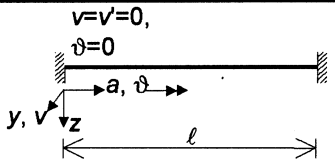
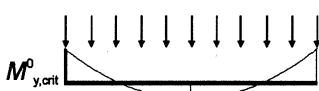
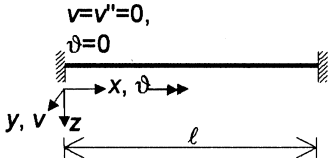
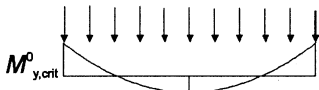
$$k_{\text{crit}} = 1, \text{ wenn } \lambda_{\text{rel,m}} = \kappa_m \cdot \sqrt{\frac{l_{\text{ef}} \cdot h}{b^2}} \leq 0,75 \rightarrow k_{\text{crit}} = 1, \text{ wenn } \frac{l_{\text{ef}} \cdot h}{b^2} \leq (0,75/\kappa_m)^2 \quad (8.7)$$

	C24	C30	GL24c	GL24h	GL28c	GL28h	GL32c	GL32h
κ_m	0,0643	0,0691	0,0583	0,0533	0,0564	0,0562	0,0592	0,0584
$k_{\text{crit}} = 1, \text{ wenn } \frac{l_{\text{ef}} \cdot h}{b^2} \leq$	136	118	166	198	177	178	161	165

Tab. 8-1 Materialkonstante κ_m und Grenzwerte für den Kippbeiwert $k_{\text{crit}} = 1$

$\lambda_{\text{rel,m}}$	$\lambda_{\text{rel,m}} \leq 0,75$						0,76	0,77	0,78	0,79
k_{crit}	$k_{\text{crit}} = 1$						0,990	0,983	0,975	0,968
$\lambda_{\text{rel,m}}$	0,80	0,81	0,82	0,83	0,84	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89
k_{crit}	0,960	0,953	0,945	0,938	0,930	0,923	0,915	0,908	0,900	0,893
$\lambda_{\text{rel,m}}$	0,90	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99
k_{crit}	0,885	0,878	0,870	0,863	0,855	0,848	0,840	0,833	0,825	0,818
$\lambda_{\text{rel,m}}$	1,00	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06	1,07	1,08	1,09
k_{crit}	0,810	0,803	0,795	0,788	0,780	0,773	0,765	0,758	0,750	0,743
$\lambda_{\text{rel,m}}$	1,10	1,11	1,12	1,13	1,14	1,15	1,16	1,17	1,18	1,19
k_{crit}	0,735	0,728	0,720	0,713	0,705	0,698	0,690	0,683	0,675	0,668
$\lambda_{\text{rel,m}}$	1,20	1,21	1,22	1,23	1,24	1,25	1,26	1,27	1,28	1,29
k_{crit}	0,660	0,653	0,645	0,638	0,630	0,623	0,615	0,608	0,600	0,593
$\lambda_{\text{rel,m}}$	1,30	1,31	1,32	1,33	1,34	1,35	1,36	1,37	1,38	1,39
k_{crit}	0,585	0,578	0,570	0,563	0,555	0,548	0,540	0,533	0,525	0,518
$\lambda_{\text{rel,m}}$	1,40	$\lambda_{\text{rel,m}} > 1,40$								
k_{crit}	0,510	$k_{\text{crit}} = 1/\lambda_{\text{rel,m}}^2$								
Zwischenwerte dürfen linear interpoliert werden										

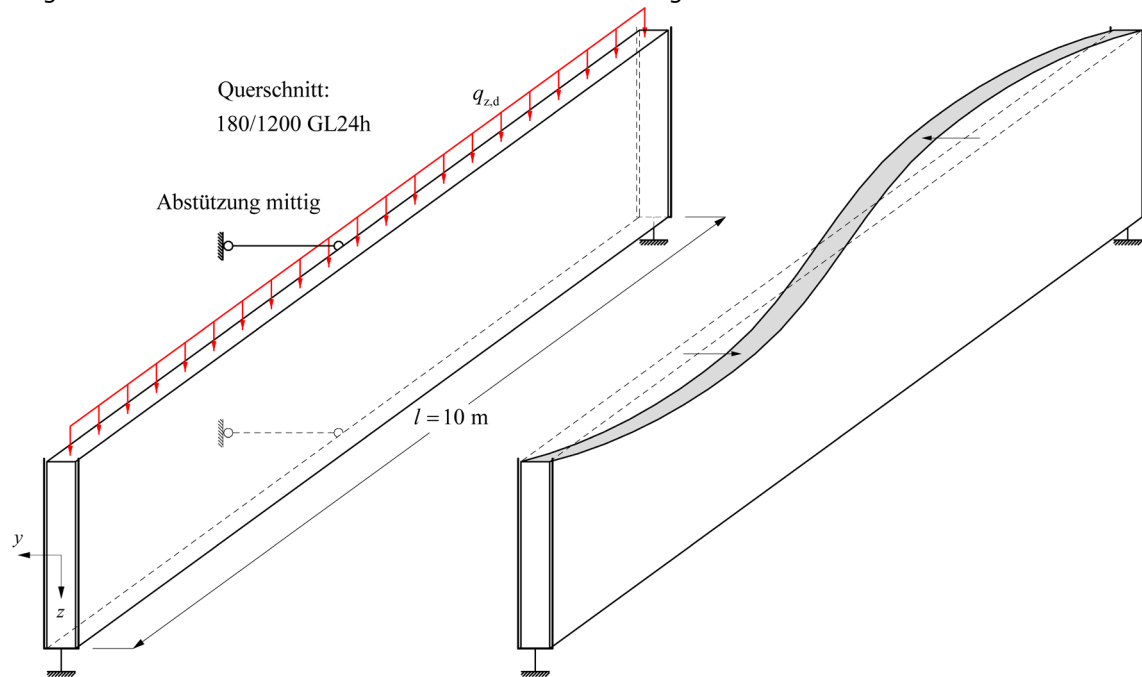
Tab. 8-2 Kippbeiwerte k_{crit}

	System	Momentenverlauf	a_1	a_2
1.1	$v=v'=0$, $\vartheta=0$		1,77	0
1.2			1,35	1,74
1.3	gabelgelagerter Einfeldträger Draufsicht:		1,13	1,44
1.4			1	0
2.1	$v=v'=0$, $\vartheta=0$		1,27	1,03
2.2	Kragarm		2,05	1,50
3.1	$v=v'=0$, $\vartheta=0$		6,81	0,40
3.2	beidseitig eingespannter Träger Draufsicht:		5,12	0,40
4.1	$v=v'=0$, $\vartheta=0$		1,70	1,60
4.2	Mittelfeld, Durchlaufträger Draufsicht:		1,30	1,60

Tab. 8-3 Ersatzstablängen l_{ef} beim Kippnachweis

Beispiel 8-1 Stabilitätsnachweis eines GL24h-Trägers unter einachsiger Biegung

Ein Träger aus GL24h ist durch Gleichstreckenlasten $q_{z,d} = 50 \text{ kN/m}$ in z-Richtung belastet. Die Nutzungsklasse ist NKL 1 und die Klasse der Lasteinwirkungsdauer ist KLED mittel.



Berechnung der Biegespannungen

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{y,d}}{W_y} = \frac{q_{z,d} \cdot l_z^2}{\frac{8}{6} \cdot \frac{b \cdot h^2}{6}} = \frac{50 \cdot 10.000^2}{\frac{8}{180 \cdot 1.200^2}} = \frac{6,25 \cdot 10^8}{4,32 \cdot 10^7} = 14,47 \text{ N/mm}^2$$

Berechnung des Kippbeiwertes, Ausweichen in y-Richtung

Diese Kombination von Belastung und Lagerung ist nicht in Tab. 8-3 (S.52) enthalten, daher wird mit $l_{ef} = 5,0 \text{ m}$ gerechnet.

Nachweis der Kippstabilität erforderlich? (siehe Tab. 8-1, S.51)

$$\frac{l_{ef} \cdot h}{b^2} = \frac{5.000 \cdot 1.200}{180^2} = 185,2 < 198 \rightarrow \text{Nachweis der Kippstabilität erfüllt}$$

keine Erhöhung der Biegefestigkeit für die Biegung um die y-Achse, da die Querschnittshöhe $> 600 \text{ mm}$ ist, siehe S. 18:

$$f_{m,y,d} = \underbrace{1,0}_{k_{h,y}} \cdot 1,0 \cdot 14,8 = 14,8 \text{ N/mm}^2$$

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}} = \frac{14,47}{1,0 \cdot 14,8} = 0,98 < 1$$

Ende Beispiel 8-1

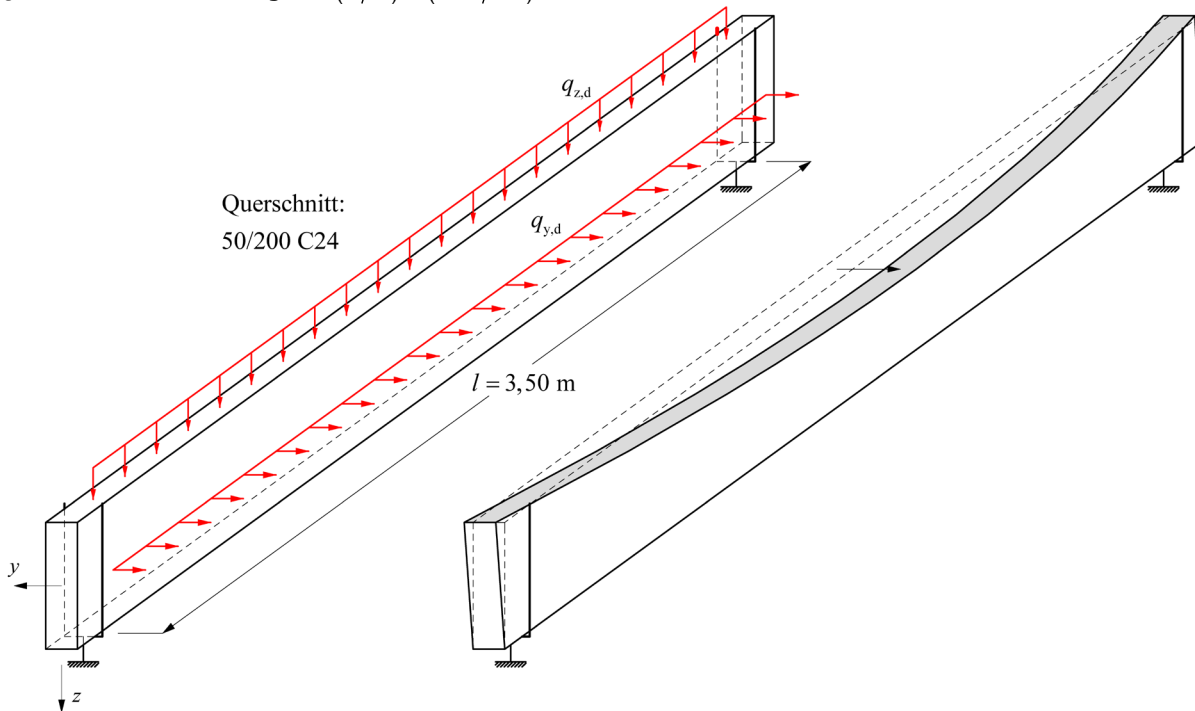
Beispiel 8-2 Vollholzbalken C24 unter zweiachsiger Biegung

Ein Deckenbalken aus Nadelvollholz C24 ist durch zwei Gleichstreckenlasten belastet:

$$q_{y,d} = 0,3 \text{ kN/m} \quad \text{und} \quad q_{z,d} = 2 \text{ kN/m}$$

Die Nutzungsklasse ist NKL 1 und die Klasse der Lasteinwirkungsdauer ist KLED mittel.

Querschnittsabmessungen: $(h/b) = (200/50) \leq 4$



Berechnung der Biegespannung

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{y,d}}{W_y} = \frac{2,0 \cdot 3.500^2}{\frac{8}{50 \cdot 200^2} \cdot 6} = 9,19 \text{ N/mm}^2 \quad \sigma_{m,z,d} = \frac{M_{z,d}}{W_z} = \frac{0,3 \cdot 3.500^2}{\frac{8}{200 \cdot 50^2} \cdot 6} = 5,51 \text{ N/mm}^2$$

$$l_{ef} = \frac{l}{a_1 \cdot \left[1 - a_2 \cdot \frac{a_z}{l} \cdot \sqrt{\frac{E_{0,05}}{4 \cdot G_{05}}} \right]} = \frac{3.500}{1,13 \cdot \left[1 - 1,44 \cdot \frac{100}{3.500} \cdot 2 \right]} = \frac{3.500}{1,037} = 3.375 \text{ mm}$$

Nachweis der Kippstabilität erforderlich? (siehe Tab. 8-1, S.51)

$$\frac{l_{ef} \cdot h}{b^2} = \frac{3.375 \cdot 200}{50^2} = 270,0 > 136 \rightarrow \text{Nachweis der Kippstabilität erforderlich}$$

$$\lambda_{rel,m} = \kappa_m \cdot \sqrt{\frac{l_{ef} \cdot h}{b^2}} = 0,0643 \cdot \sqrt{270,0} = 1,057 \rightarrow k_{crit} = 0,767$$

$$h = 200 \text{ mm} \rightarrow f_{m,y,d} = k_{h,y} \cdot f_{m,d} = 1,0 \cdot 14,8 = 14,8 \text{ N/mm}^2$$

$$b = 50 \text{ mm} \rightarrow f_{m,z,d} = k_{h,z} \cdot f_{m,d} = 1,246 \cdot 14,8 = 18,4 \text{ N/mm}^2$$

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}} + \left(\frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \right)^2 = \frac{9,19}{0,767 \cdot 14,8} + \left(\frac{5,51}{18,4} \right)^2 = 0,810 + 0,300^2 = 0,90 < 1$$

$$\left(\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,810^2 + 0,300 = 0,96 < 1$$

Ende Beispiel 8-2

9 Stabilitätsnachweis von Biegestäben mit Normalkraft nach Ersatzstabverfahren

9.1 Stäbe mit Rechteckquerschnitt durch Biegung und Druckkraft belastet

Für Stäbe, die gleichzeitig unter Biege- und Druckbeanspruchung stehen, muss der Nachweis der Kippstabilität und der Knickstabilität gleichzeitig geführt werden.

Bei Kombination von einachsiger Biegung mit einer Druckkraft muss der Tragfähigkeitsnachweis für den Querschnitt nach Gl. (5.6) erfüllt sein. Für eine Kombination von M_y um die starke Achse y mit einer Druckkraft muss die Stabilität nach folgender Bedingung nachgewiesen werden:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} + \left(\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}} \right)^2 \leq 1 \quad (9.1)$$

Bei Kombination von zweiachsiger Biegung mit einer Druckkraft muss der Tragfähigkeitsnachweis für den Querschnitt nach Gl. (5.5) erfüllt sein. Bei Querschnittsverhältnissen $(h/b) \leq 4$ darf der Stabilitätsnachweis wie folgt geführt werden:

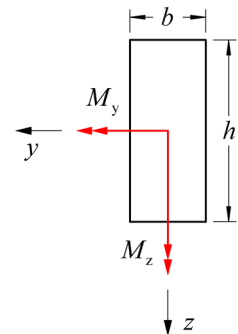
$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}} + \left(\frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \right)^2 \leq 1 \quad \text{und} \quad \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} + \left(\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (9.2)$$

$k_{c,y}; k_{c,z}$ Knickbeiwert für Knicken um die y-Achse (starke Achse) bzw. z-Achse (schwache Achse), siehe Gl. (7.4)

k_{crit} Kippbeiwert, Tab. 8-2 (S.51) oder Berechnung mit Gleichung (8.3)

h Querschnittshöhe = Abmessung in z-Richtung

b Querschnittsbreite = Abmessung in y-Richtung



9.2 Stäbe mit Rechteckquerschnitt durch Biegung und Zugkraft beansprucht

Bei Kombination von einachsiger Biegung mit einer Zugkraft muss der Tragfähigkeitsnachweis für den Querschnitt nach Gl. (5.4) erfüllt sein. Für eine Kombination von einachsiger Biegung aus M_y um die starke Achse y mit einer Zugkraft darf der Nachweis der Kippstabilität mit $\sigma_{t,0,d} = 0$ wie folgt geführt werden:

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}} \leq 1 \quad (9.3)$$

Bei Kombination von zweiachsiger Biegung mit einer Zugkraft muss der Tragfähigkeitsnachweis für den Querschnitt nach Gl. (5.3) erfüllt sein. Bei Querschnittsverhältnissen $(h/b) \leq 4$ darf der Stabilitätsnachweis wie folgt geführt werden:

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}} + \left(\frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \right)^2 \leq 1 \quad \text{und} \quad \left(\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (9.4)$$

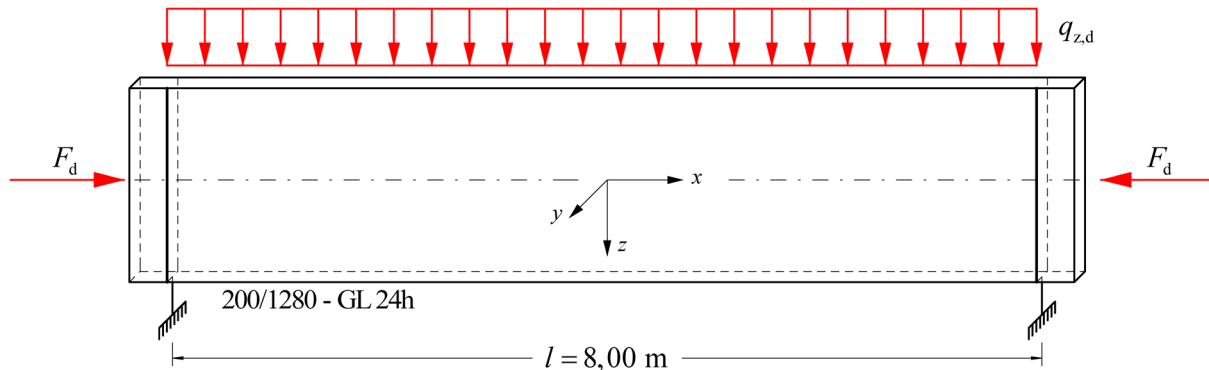
Beispiel 9-1 Biegung und Druck in einem Einfeldträger GL24h

Der nachstehend dargestellte BSH-Träger aus GL24h mit einem Rechteckquerschnitt liegt auf zwei Gabellagern auf. An diesen Gabellagern ist nur die Verdrehung um die Balkenlängsachse (x-Achse) verhindert, ansonsten ist der Querschnitt frei drehbar gelagert. Es wirken gleichzeitig Biegung und Druck aus folgenden Belastungen:

$$q_{z,d} = 50 \text{ kN/m} \quad \text{am oberen Trägerrand angreifend}$$

$$F_d = 400 \text{ kN} \quad \text{zentrische Druckkraft}$$

Nutzungsbedingungen: KLED kurz und NKL 1.



$$(h > 600 \text{ mm}) \rightarrow f_{m,y,d} = 1,0 \cdot 1,125 \cdot 14,8 = 16,7 \text{ N/mm}^2 \quad f_{c,0,d} = 1,125 \cdot 14,8 = 16,7 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{F_d}{A_n} = \frac{400.000}{200 \cdot 1.280} = 1,56 \text{ N/mm}^2 \quad \sigma_{m,y,d} = \frac{M_{y,d}}{W_y} = \frac{\frac{q_{z,d} \cdot l^2}{8}}{\frac{b \cdot h^2}{6}} = \frac{50 \cdot 8.000^2}{200 \cdot 1.280^2} = 7,32 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Gl. (5.6): } \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} = \left(\frac{1,56}{16,7} \right)^2 + \frac{7,32}{16,7} = 0,093^2 + 0,438 = 0,45 \leq 1$$

Bestimmung des Knickbeiwertes $k_{c,z}$

$$l_{ef,z} = \beta \cdot s_z = 1,0 \cdot 8.000 = 8.000 \text{ mm}; i_z = 0,289 \cdot 200 = 57,7; \lambda_z = \frac{l_{ef,z}}{i_z} = \frac{8.000}{57,7} = 138,6 \rightarrow k_{c,z} = 0,196$$

Bestimmung des Kippbeiwertes k_{crit}

$$l_{ef} = \frac{l}{a_1 \cdot \left[1 - a_2 \cdot \frac{a_z}{l} \cdot 2 \right]} = \frac{8.000}{1,13 \cdot \left[1 - 1,44 \cdot \frac{+640}{8.000} \cdot 2 \right]} = \frac{8.000}{0,870} = 9.199 \text{ mm}$$

Nachweis der Kippstabilität erforderlich? (siehe Tab. 8-1, S.51)

$$\frac{l_{ef} \cdot h}{b^2} = \frac{9.199 \cdot 1.280}{200^2} = 294,37 > 198 \rightarrow \text{Nachweis Kippstabilität erforderlich}$$

$$\lambda_{rel,m} = \kappa_m \cdot \sqrt{\frac{l_{ef} \cdot h}{b^2}} = 0,0533 \cdot \sqrt{294,37} = 0,914 \rightarrow k_{crit} = 0,875$$

Stabilitätsnachweis

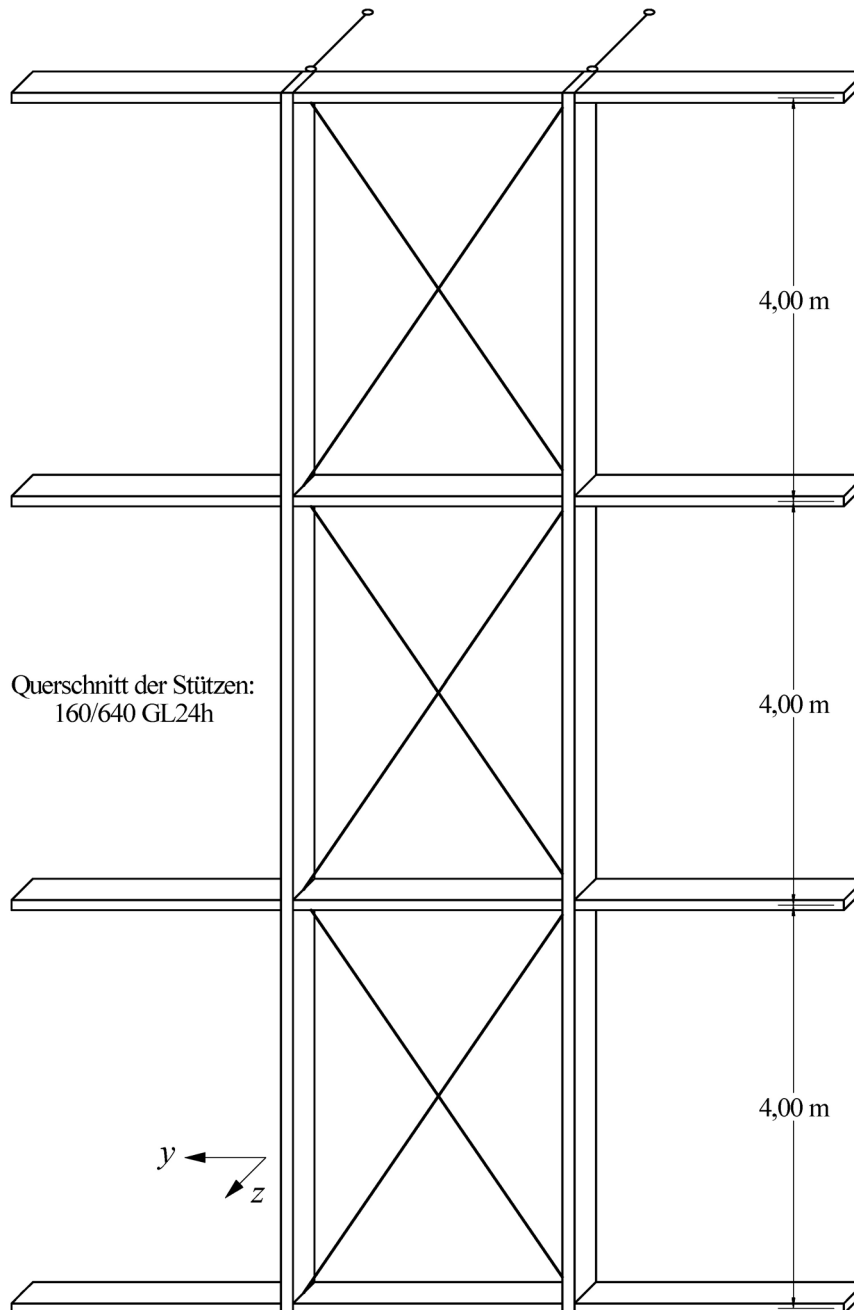
$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} + \left(\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}} \right)^2 = \frac{1,56}{0,196 \cdot 16,7} + \left(\frac{7,32}{0,875 \cdot 16,7} \right)^2 = 0,477 + 0,501^2 = 0,73 < 1$$

Ende Beispiel 9-1

Beispiel 9-2 Biegung und Druck in den GL24h-Pfosten einer Außenwand

Untersucht wird eine Stütze einer Außenwand in Pfosten-Riegel-Konstruktion aus GL24h, die durch Druck aus Eigengewicht und Schnee und durch einachsige Biegung aus Wind senkrecht zur Wandebene belastet wird. Die Nutzungsklasse ist NKL 1 und die maßgebliche Klasse der Lasteinwirkungsdauer ist KLED kurz.

$$F_d = 210 \text{ kN (Stützendruckkraft)} \quad M_{y,d} = 100 \text{ kNm} \quad M_{z,d} = 0$$



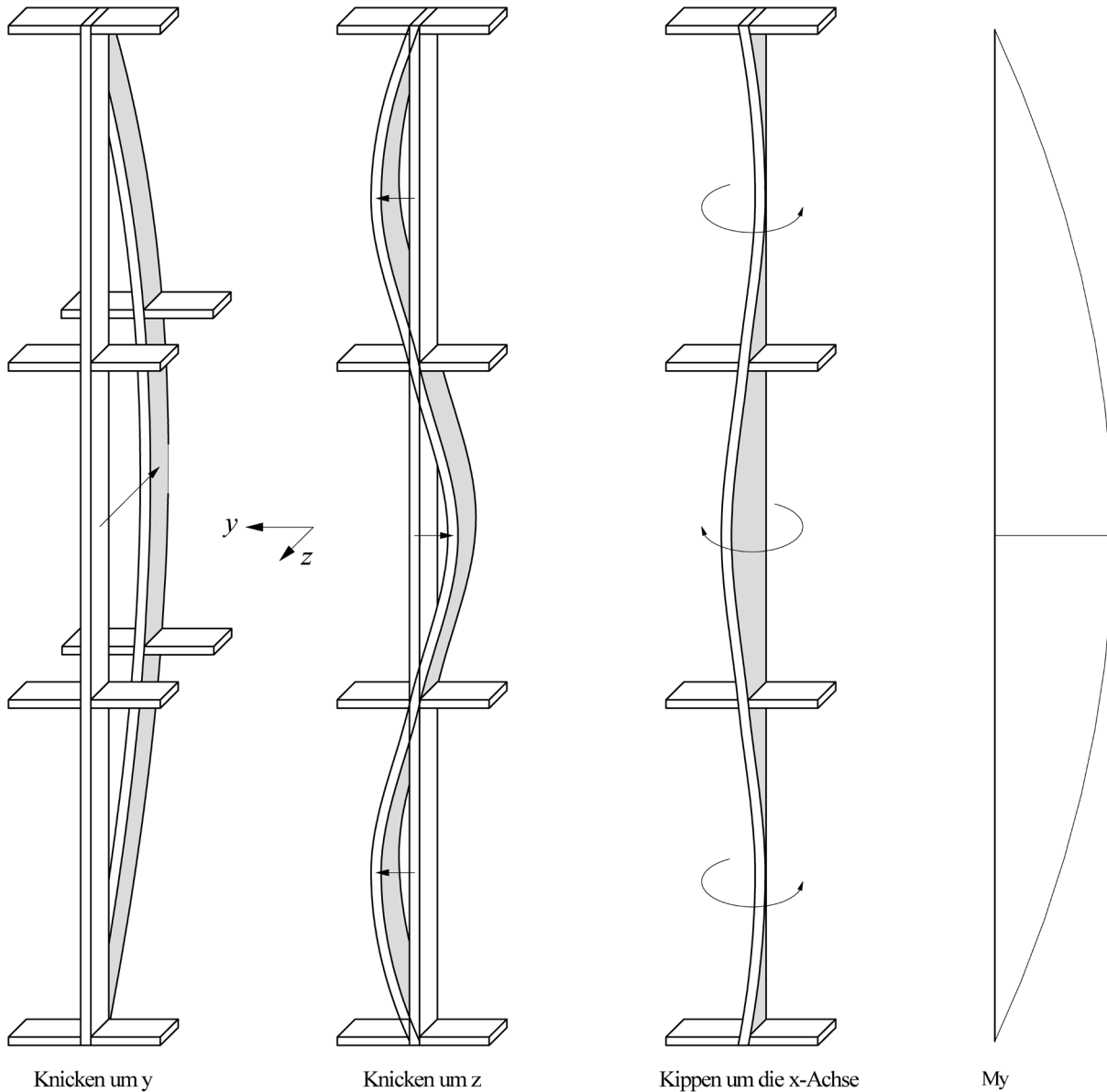
Berechnung der Druck- und Biegespannungen

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{F_d}{A} = \frac{210.000}{160 \cdot 640} = 2,05 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{y,d}}{W_y} = \frac{M_{y,d}}{\frac{b \cdot h^2}{6}} = \frac{100 \cdot 10^6}{\frac{160 \cdot 640^2}{6}} = \frac{100 \cdot 10^6}{10,92 \cdot 10^6} = 9,16 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{m,z,d} = \frac{M_{z,d}}{W_z} = 0$$

Mögliche Verformungszustände im Stabilitätsfall:



Berechnung der Knickbeiwerte für Knicken um y- und z-Achse

$$\lambda_y = \frac{l_{\text{ef},y}}{i_y} = \frac{12.000}{0,289 \cdot 640} = 64,9 \rightarrow k_{c,y} = 0,740$$

$$\lambda_z = \frac{l_{\text{ef},z}}{i_z} = \frac{4.000}{0,289 \cdot 160} = 86,5 \rightarrow k_{c,z} = 0,476$$

Berechnung des Kippbeiwertes, Ausweichen in y-Richtung

Die Lagerung der Stützen bezüglich des Kipp-Ausweichens in y-Richtung entspricht einem Einfeldbalken. Der mittlere Stützenabschnitt weist einen parabelförmigen Momentenverlauf auf, der einem konstanten Verlauf nahe kommt. Daher wird mit $l_{\text{ef},y} = 4,0 \text{ m}$ gerechnet.

$$\frac{l_{\text{ef},y} \cdot h}{b^2} = \frac{4.000 \cdot 640}{160^2} = 100,0 < 178 \rightarrow k_{\text{crit}} = 1,0 \rightarrow \text{Nachweis der Kippstabilität nicht erforderlich}$$

Stabilitätsnachweis

$$f_{c,0,d} = 1,125 \cdot 14,8 = 16,7 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{m,y,d} = \underbrace{1,0}_{k_{b,y}} \cdot 1,125 \cdot 14,8 = 16,7 \text{ N/mm}^2$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}} + \left(\frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \right)^2 = \frac{2,05}{0,740 \cdot 16,7} + \frac{9,16}{1,0 \cdot 16,7} = 0,166 + 0,549 = 0,71 < 1$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} + \left(\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = \frac{2,05}{0,476 \cdot 16,7} + \left(\frac{9,16}{1,0 \cdot 16,7} \right)^2 = 0,258 + 0,549^2 = 0,56 < 1$$

Ende Beispiel 9-2

Literaturverzeichnis

Zitierte Normen

- [DIN 1] DIN EN 1995-1-1:2010-12
Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten
Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau
Deutsche Fassung EN 1995-1-1:2004 + AC:2006 + A1:2008
- [DIN 2] DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08 Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter
Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten
Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau
- [DIN 3] DIN EN 1995-1-1/A2:2014-07
Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten
Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau
Deutsche Fassung EN 1995-1-1:2004/A2:2014
- [DIN 4] DIN EN 338:2016-07 Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen
- [DIN 5] DIN EN 14080:2013-09 Holzbauwerke – Brettschichtholz und Balkenschichtholz - Anforderungen
- [DIN 6] DIN EN 14592:2008 Holzbauwerke - Stiftförmige Verbindungsmittel - Anforderungen

Weiterführende Literatur

- [1] Blaß, Hans J.; Ehlbeck, Jürgen; Kreuzinger, Heinrich; Steck, Günter: *Erläuterungen zu DIN 1052:2004-08. Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken*. Bruderverlag Albert Bruder GmbH & Co. KG, Karlsruhe 2005
- [2] Blaß, Hans J.; Görlacher, Rainer; Steck, Günter (Hrsg) :STEP 1 – Holzbauwerke nach Eurocode 5 – Bemessung und Baustoffe. Fachverlag Holz, Düsseldorf 1995
- [3] Blaß, Hans J.; Görlacher, Rainer; Steck, Günter (Hrsg) :STEP 2 – Holzbauwerke nach Eurocode 5 – Bauteile Konstruktionen Details. Fachverlag Holz, Düsseldorf 1995
- [4] Blaß, Hans J.; Görlacher, Rainer; Steck, Günter (Hrsg) :STEP 3 – Holzbauwerke nach Eurocode 5 – Grundlagen Entwicklungen Ergänzungen. Fachverlag Holz, Düsseldorf 1995

Stichwortverzeichnis

anisotrop	7	Klassen der Lasteinwirkungsdauer (KLED) .	12
Ausdehnungskoeffizienten	10	Knickbeiwert	41
Bemessungswerte der Festigkeiten	16	Berechnung	41
Biegestäbe	49	Tabelle BSH	42
Biegestäbe mit Normalkraft	55	Knickstabilität	41
Drehwuchs	8	Kriechen	15
Druckstäbe	41	Langzeitverhalten	12
Ersatzstablänge	41	longitudinale Verformungen	11
Fasersättigungspunkt	9	Modifikationsbeiwert k_{mod}	12
Festigkeitswerte		Nutzungsklassen	12, 15
homogenes BSH	18	Orthotropie	20
schräg zur Faser	20	Quellen	7, 10
Vollholz aus Nadelholz	17	Querdruckbeiwert $k_{c,90}$	28
feuchtebedingte Verformungen		Querkraft	
radial	10	reduziert bei Auflagern	37
tangential	10	Querschnittsnachweise	
Gleichgewichtsfeuchte	9	Schub	37
Holzfeuchtegehalt	9	Querschnittsschwächungen	21
Holzstruktur	7	bei Druck	27
Jahrringe	7	Biegebelastung	31
Kernholz	8	Rohdichte	8
Kippbeiwert	55	Schub	
Berechnung k_{crit}	49	Querkraft und Torsion	38
Tabelle	51	Torsion	38
Kippbeiwert k_{crit}	49	Schwinden	7, 9, 10
Kippnachweis		Splintholz	8
Ersatzstablängen	51	Teilsicherheitsbeiwert γ_M	16
Kippschlankheitsgrad	49	Zugverbindungen	
Kippstabilität	49, 55	besondere Regeln	22
Klasse der Lasteinwirkungsdauer	15		