

Bemessung von Brettschichtholz nach DIN 1052-1/A1 als Verbundquerschnitt

F. Colling*

1 Einführung

Wie in [1] beschrieben, besitzen alle Lamellen eines Brettschichtholzträgers aufgrund der natürlichen Streuung des Werkstoffes Holz unterschiedliche Elastizitätsmoduln. Bei der Bemessung wird dies jedoch in ausreichender Näherung vernachlässigt, so daß für alle Bretter einer Sortierklasse derselbe Rechenwert zugrundegelegt wird. DIN 1052-1 enthielt bislang nur Brettschichtholz aus visuell sortierten Brettern, wobei für beide Brettschichtholz-Klassen (GK I und GK II) ein Elastizitätsmodul von $E = 11000 \text{ N/mm}^2$ angesetzt wurde. Die Berücksichtigung einer Verbundwirkung erübrigte sich somit.

Durch die Entwicklungen im Bereich der maschinellen Holzsortierung und die Aufnahme von Brettschichtholz aus maschinell sortierten Brettern in DIN 1052-1/A1 [2] ist es nun möglich geworden, Brettschichtholz so aufzubauen, daß die verschiedenen Trägerbereiche planmäßig einen anderen E-Modul aufweisen. Durch die Kombination verschiedener Lamellen-Sortierklassen in einem Querschnitt spricht man von kombiniertem Brettschichtholz. Hierdurch wird ein Verbundträger geschaffen, dessen Tragverhalten sich von dem eines homogenen Brettschichtholzträgers (aus nur einer Lamellen-Sortierklasse) unterscheidet.

Im Unterschied zu einem homogen aufgebauten Träger müssen bei einem Verbundquerschnitt die Spannungsnachweise für jeden Querschnittsbereich geführt werden. Dies stellt einen erhöhten, und nicht immer erforderlichen Rechenaufwand dar.

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens¹⁾ [3] sollte aufgezeigt werden, wie die genauere Bemessung von Brettschichtholz als Verbundträger geführt werden kann, und welche Vereinfachungen getroffen werden können. Die wichtigsten Ergebnisse, die mit der begleitenden Arbeitsgruppe²⁾ abgestimmt wurden, sind nachfolgend beschrieben. Für weitergehende Informationen wird auf [3] verwiesen, der über die Arbeitsgemeinschaft Holz, Postfach 300141, 40401 Düsseldorf bezogen werden kann.

2 Theorie der Verbundquerschnitte

Stellvertretend für einen beliebigen Querschnitt mit n verschiedenen Querschnittsteilen soll hier ein rechteckiger Brettschichtholzträger betrachtet werden, der aus insgesamt 5 verschiedenen Lamellen-Sortierklassen zusammengesetzt ist (Bild 1). Jede dieser Sortierklassen besitzt einen Rechenwert für den E-Modul ($E_1 - E_5$).

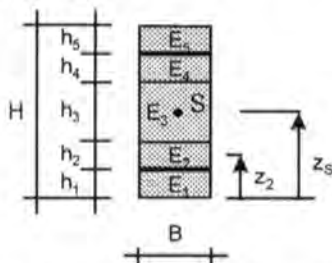


Bild 1 Verbundträger aus 5 verschiedenen Sortierklassen

Nach der linear-elastischen Balkentheorie kann die Lage des Schwerpunktes wie folgt berechnet werden:

$$z_S = \frac{\sum_{i=1}^5 E_i \cdot B h_i \cdot z_i}{\sum_{i=1}^5 E_i \cdot B h_i} \quad (1)$$

mit

E_i = E-Modul des betrachteten Trägerbereiches
 h_i = Höhe des betrachteten Trägerbereiches
 z_i = Abstand des zugehörigen Schwerpunktes von der Bezugslinie

Nimmt man den E-Modul E_1 des Bereiches ① als Bezugswert, so ergibt sich für Gl.(1):

$$z_S = \frac{\sum \eta_i B h_i z_i}{\sum \eta_i B h_i} \quad (2)$$

mit $\eta_i = E_i/E_1$

Folgende Querschnittswerte werden beeinflusst:

Dehnsteifigkeit EA^*

$$EA^* = E_1 \sum \eta_i B h_i = E_1 \cdot B H \cdot \frac{\sum \eta_i B h_i}{B H}$$

bzw. $EA^* = E_1 \cdot A \cdot k_{EA}$ (3)

Biegesteifigkeit EI^*

$$EI^* = E_1 \sum \eta_i B \left[\frac{h_i^3}{12} + h_i (z_S - z_i)^2 \right]$$

$$= E_1 \cdot \frac{B H^3}{12} \frac{\sum \eta_i B \left[\frac{h_i^3}{12} + h_i (z_S - z_i)^2 \right]}{B H^3 / 12}$$

bzw. $EI^* = E_1 \cdot I \cdot k_{EI}$ (4)

Statisches Moment ES^*

Analog zur Dehnsteifigkeit und der Biegesteifigkeit ergibt sich für das maßgebende statische Moment zur Berechnung der max. Schubspannung:

$$ES_{\max} = \sum_{\text{oberhalb Nulllinie}} E_i \cdot B h_i \cdot (z_i - z_S)$$

bzw. $ES^* = E_1 \cdot \frac{B H^2}{8} \cdot k_{ES} = E_1 \cdot S \cdot k_{ES}$ (5)

Bei der Berechnung der auftretenden Spannungen müssen diese veränderten Querschnittswerte berücksichtigt werden.

* Prof. Dr.-Ing. François Colling ist an der Fachhochschule Augsburg für die Lehrgebiete Holzbau und Baustatik verantwortlich
¹⁾ Forschungsvorhaben im Auftrag der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung e.V., München mit finanzieller Unterstützung durch das Deutsche Institut für Bautechnik, Berlin
²⁾ Prof. Blaß, Prof. Brüninghoff, Prof. Ehlbeck, Prof. Heimeshoff

Tabelle 1: Zugrundegelegte Querschnittsaufbauten

	Standardquerschnitte							Sonderquerschnitte				
	homogen	kombiniert										
		symmetrisch			unsymmetrisch				symmetrisch		unsymmetrisch	
BS-Klasse	Typ 1 BS11 - BS18	Typ 2 BS14 BS16 BS18			Typ 3 BS14 BS16 BS18				Typ 4 BS16 BS18		Typ 5 BS16 BS18	
⊙ ¹⁾								MS7	MS10	MS7	MS10	
⊙ ²⁾		S10	MS10	MS13	S10	MS10	MS13	MS10	MS13	MS10	MS13	
⊙ ³⁾	S10 ... MS17	S13	MS13	MS17	S13	MS13	MS17	MS13	MS17	MS13	MS17	

¹⁾ Sortierklasse der Lamellen für den jeweiligen Querschnittsbereich

3 Spannungsnachweise

3.1 Grundlagen

Im Rahmen des o.g. Vorhabens wurden die genaueren Berechnungen unter Berücksichtigung der veränderten Querschnittswerte durchgeführt, wobei mit Hilfe von Parameterstudien der Einfluß der einzelnen Faktoren abgeschätzt wurde. Hierdurch ließen sich in den meisten Fällen vereinfachte Nachweise ableiten, die nach Meinung des Verfassers das derzeitige Sicherheitsniveau nicht herabsetzen.

Den Berechnungen wurden die in **Tabelle 1** angegebenen 5 Querschnittstypen zugrundegelegt, von denen angenommen werden kann, daß sie in der Praxis eingesetzt werden.

Bei diesen Trägern unterscheiden sich die benachbarten Querschnittsbereiche nur um jeweils eine Lamellen-Sortierklasse. Dies ist auch unbedingt zu empfehlen, weil über Querschnittsaufbauten mit größeren Unterschieden in den benachbarten Lamellen-Sortierklassen nicht ausreichend Erfahrungen vorliegen.

In DIN 1052-1/A1 werden keine Angaben zu Brettschichtholz aus MS7-Lamellen gemacht. Um diese Lamellen, die im Zuge der maschinellen Sortierung anfallen, einsetzen zu können, wurden in [3] Annahmen für Rechenwerte getroffen, die auf der sicheren Seite liegen.

Bei den nachfolgend beschriebenen Nachweisen wird der Einfluß der unterschiedlichen Elastizitätsmoduln über **modifizierte Querschnittswerte** berücksichtigt. Hierzu werden jeweils Beiwerte zur Modifizierung der Querschnittswerte angegeben (vgl. Tabelle 3). Die Nachweise können dann mit den in **Tabelle 2** angegebenen Rechenwerten für die Materialkennwerte geführt werden (siehe auch DIN 1052-1/A1 und [1]).

Tabelle 2: Rechenwerte für die Materialkennwerte von Brettschichtholz in N/mm² bzw. MN/m²

Art der Beanspruchung		Brettschichtholz			
		BS 11	BS 14	BS 16	BS 18
		Sortierklasse der Lamellen			
		S 10/ MS 10	S 13	MS 13	MS 17
Biegung	zul σ_B	11	14	16	18
Zug	zul $\sigma_{Z }$	8,5	10,5	11	13
Zug \perp	zul $\sigma_{Z\perp}$	0,2	0,2	0,2	0,2
Druck	zul $\sigma_{D }$	8,5	11	11,5	13
Druck \perp	zul $\sigma_{D\perp}$	2,5 3,0 ¹⁾	2,5 3,0 ¹⁾	2,5 3,0 ¹⁾	2,5 3,0 ¹⁾
Abscheren	zul τ_a	0,9	0,9	1,0	1,0
Schub aus Q	zul τ_Q	1,2	1,2	1,3	1,3 ³⁾
Torsion	zul τ_T	1,6	1,6	1,6	1,6
Biegung	$E_{ }$	11000	11000 ²⁾	12000 ²⁾	13000 ²⁾
Zug/Druck	$E_{ }$	11000	12000	13000	14000
Zug/Druck \perp	E_{\perp}	350	400	400	450
Schubmodul	G	550	600	650	700

¹⁾ Bei Anwendung dieser Werte ist mit höheren Eindrückungen zu rechnen
²⁾ Wenn bei Biegeträgern die Lamellen in der Zug- und Druckzone die o.a. Lamellenklassen verwendet werden (Typ 2 und 4 nach Tabelle 1), darf ein um 1000 MN/m² erhöhter E-Modul in Rechnung gestellt werden.
³⁾ In [1] fälschlicherweise mit 1,5 N/mm² angegeben.

3.2 Zug und Druck (ohne Knicken)

Die Spannung in einem beliebigen Querschnittsteil kann wie folgt berechnet werden:

$$\sigma_i = \frac{F}{EA^*} \cdot E_i \quad (6)$$

Mit Gl.(3):

$$\sigma_i = \frac{F}{A} \cdot \frac{1}{k_{EA}} \cdot \frac{E_i}{E_1} \quad (7)$$

Für jeden Querschnittsteil ist der Nachweis zu erbringen, daß die auftretenden Spannungen die zulässigen Spannungen nicht überschreiten. Für die in Tabelle 1 angegebenen Querschnittstypen ergibt sich dabei der maßgebende Nachweis immer für den 'schwächsten' Bereich, d.h. den Bereich mit der niedrigsten Sortierklasse.

Auf der Grundlage der in [3] durchgeführten Berechnungen kann der Nachweis vereinfachend wie folgt geführt werden:

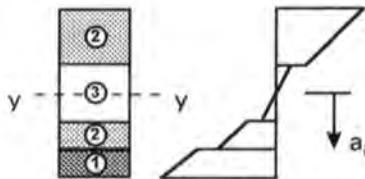
$$\sigma_{Z/D} = \frac{F}{k_A \cdot A} \leq \text{zul}\sigma_{Z/D} \quad (8)$$

mit

k_A = Beiwert zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Elastizitätsmoduln für innere Lamellen nach **Tabelle 3** und
zul $\sigma_{Z/D}$ = zulässige Zug- bzw. Druckspannung nach Tabelle 2

3.3 Biegung

3.3.1 Biegung um die y-Achse ('starke' Achse)



Die an einer beliebigen Stelle auftretenden Biegespannung kann wie folgt berechnet werden:

$$\sigma_{B,i} = \frac{M_y}{EI_y^*} \cdot E_i \cdot a_i \quad (9)$$

Mit Gl.(4):

$$\sigma_{B,i} = \frac{M_y}{I_y} \cdot \frac{E_i}{E_1} \cdot \frac{1}{k_{EI}} \cdot a_i \quad (10)$$

wobei a_i dem größten Abstand des betrachteten Querschnittsteiles von der Spannungs-Nulllinie entspricht.

Auch hier ist für jeden Querschnittsteil zu überprüfen, ob die zugehörige zulässige Biegespannung nicht überschritten wird. Dabei muß nach DIN 1052-1/A1 bei unsymmetrisch aufgebauten Trägern nur der Spannungsnachweis für den Zugbereich geführt werden.

Die Berechnungen ergaben, daß für die in Tabelle 1 angegebenen Querschnittsaufbauten immer der Nachweis für den äußersten Querschnittsteil maßgebend wird (= Biegezugspannungen).

Auf der Grundlage der in [3] durchgeführten Berechnungen kann der Nachweis wie folgt geführt werden:

$$\sigma_B = \frac{M_y}{k_{W_y} \cdot W_y} \leq \text{zul}\sigma_B \quad (11)$$

mit

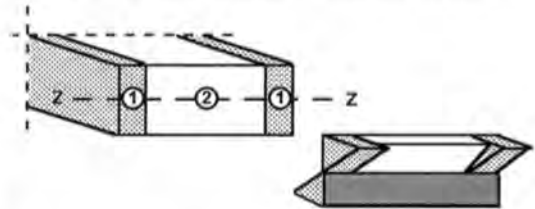
k_{W_y} = Beiwert für äußere Lamellen nach Tabelle 3,
zul σ_B = zulässige Biegespannung nach Tabelle 2

Der Einfluß der unterschiedlichen Elastizitätsmoduln ist dabei gering, so daß in den meisten Fällen - wie in DIN 1052-1/A1 vorgesehen - mit $k_{W_y} = 1$ gerechnet werden kann. Lediglich bei unsymmetrisch aufgebauten Trägern der Klasse BS16 ist der Einfluß größer, so daß hier empfohlen wird, mit $k_{W_y} = 0,95$ zu rechnen.

Bei parallelgurtigen Trägern (Träger mit konstanter Höhe) wird aus nachfolgenden Gründen empfohlen, symmetrisch aufgebaute Querschnitte zu verwenden:

- Bei symmetrisch aufgebauten Querschnitten sind die Durchbiegungen geringer (vgl. Fußnote 2 in Tabelle 2).
- Bei unsymmetrisch aufgebauten Trägern ist darauf zu achten, daß die höherwertigen Lamellen im Zugbereich liegen. Dies ist bereits bei der statischen Berechnung zu vermerken und die Träger sind entsprechend zu kennzeichnen. Auch ist beim Einbau erhöhte Aufmerksamkeit erforderlich.
- Bei Bauteilen, die einer wechselnder Momentenbeanspruchung ausgesetzt sind, sind zusätzlich die auf der schwächeren Seite auftretenden Biegezugspannungen zu überprüfen. Hierbei sind die zulässigen Werte der nächst niedrigeren BS-Klasse zu verwenden (siehe [3]).

3.3.2 Biegung um die z-Achse ('schwache' Achse)



Die an einer beliebigen Stelle auftretenden Biegezugspannungen können wie folgt berechnet werden:

$$\sigma_{B,i} = \frac{M_z}{EI_z^*} \cdot E_i \cdot \frac{B}{2} \quad (12)$$

Die Biegesteifigkeit EI_z^* ergibt sich analog zur Zug-/Druckbeanspruchung zu:

$$EI_z^* = E_1 \cdot I_z \cdot k_{EA} \quad (13)$$

Somit kann Gl.(12) geschrieben werden:

$$\sigma_{B,i} = \frac{M_z}{W_z} \cdot \frac{E_i}{E_1} \cdot \frac{1}{k_{EA}} \quad (14)$$

Der Biegespannungsnachweis ist für jeden Querschnittsbereich zu führen, wobei stets der 'schwächere' innere Bereich maßgebend wird.

Auf der Grundlage der in [3] durchgeführten Berechnungen kann der Nachweis wie folgt geführt werden:

$$\sigma_{B,z} = \frac{M_z}{k_{W_z} \cdot W_z} \leq \text{zul}\sigma_B \quad (15)$$

mit

k_{W_z} = Beiwert für innere Lamellen nach Tabelle 3,
zul σ_B = zulässige Biegespannung nach Tabelle 2

3.3.3 Doppelbiegung

Wird ein Querschnitt durch zweiachsige Biegung (Doppelbiegung) beansprucht, so ergibt sich die Biegespannung in einem beliebigen Punkt des Querschnittes zu:

$$\sigma = \frac{M_y}{I_y} \cdot \frac{1}{k_{EI}} \cdot \frac{E_i}{E_1} \cdot a_i + \frac{M_z}{I_z} \cdot \frac{1}{k_{EA}} \cdot \frac{E_i}{E_1} \cdot \frac{B}{2} \quad (16)$$

Für jeden Querschnittsteil ist zu überprüfen, daß die zugehörige zulässige Spannung nicht überschritten wird.

Die durchgeführten Berechnungen zeigten, daß bei geringem Anteil an Querbiegung stets die äußeren Lamellen maßgebend werden. Erst ab einem Verhältnis $\sigma_{B,z} / \text{zul } \sigma_{B,z} > 0,4$ (d.h. ab einer Spannungsausnutzung infolge Querbiegung von mehr als 40 %) werden die inneren Querschnittsbereiche maßgebend für die Bemessung.

Tabelle 3: Beiwerte zur Modifikation der Querschnittswerte

	Typ 2			Typ 3			Typ 4		Typ 5	
	BS14	BS16	BS18	BS14	BS16	BS18	BS16	BS18	BS16	BS18
Äußere Lamellen:										
k_{W_y}	1,0	1,0	1,0	1,0	0,95	1,0	1,0	1,0	0,95	1,0
k_{W_z}	0,9	0,8	0,9	0,9	0,8	0,9	0,8	0,9	0,8	0,9
k_A	0,9	0,85	0,9	0,9	0,85	0,9	0,85	0,9	0,85	0,9
Innere Lamellen:										
k_{W_y}	1,25	1,15	1,25	1,25	1,15	1,25	1,50	1,50	1,50	1,50
k_{W_z}	0,8	0,7	0,9	0,8	0,7	0,9	0,6	0,7	0,6	0,7
k_A	0,8	0,8	0,85	0,8	0,75	0,85	0,55	0,75	0,5	0,7

3.4 Biegung mit Normalkraft

3.4.1 Biegung um die y-Achse ('starke' Achse)

Bei Biegung mit Normalkraft liegt ein ähnliches Tragverhalten wie bei Doppelbiegung vor: auch hier werden die inneren Querschnittsbereiche erst maßgebend, wenn der Anteil der Spannungen infolge Normalkraft ein bestimmtes Maß überschreitet (etwa 30 %).

Die Berechnungen ergaben, daß das Tragverhalten mit den nachfolgenden Nachweisen ausreichend genau erfaßt wird:

Äußere Lamellen:

$$\frac{Z/D}{k_A \cdot A \cdot \text{zul } \sigma_{Z/D}} + \frac{M_y}{k_{W_y} \cdot W_y \cdot \text{zul } \sigma_B} \leq 1 \quad (19)$$

Innere Lamellen:

$$\frac{Z/D}{k_A \cdot A \cdot \text{zul } \sigma_{Z/D}} + \frac{M_y}{k_{W_y} \cdot W_y \cdot \text{zul } \sigma_B} \leq 1 \quad (20)$$

mit

k_{W_y} und k_{W_z} = Beiwerte nach Tabelle 3,

zul σ_B , zul $\sigma_{Z/D}$ = zul. Biegespannung bzw. zul. Zug-/Druckspannung nach Tabelle 2

Für die praktische Bemessung wird vorgeschlagen, neben dem Nachweis der äußeren Lamellen zusätzlich einen Nachweis für die inneren Lamellen zu führen.

$$\text{Äußere Lamellen: } \frac{M_y}{k_{W_y} \cdot W_y} + \frac{M_z}{k_{W_z} \cdot W_z} \leq \text{zul } \sigma_B \quad (17)$$

$$\text{Innere Lamellen: } \frac{M_y}{k_{W_y} \cdot W_y} + \frac{M_z}{k_{W_z} \cdot W_z} \leq \text{zul } \sigma_B \quad (18)$$

mit

k_{W_y} und k_{W_z} = Beiwerte nach Tabelle 3,

zul σ_B = zulässige Biegespannung nach Tabelle 2

3.4.2 Biegung um die z-Achse ('schwache' Achse)

Bei Biegung um die 'schwache' Achse werden stets die inneren Querschnittsbereiche maßgebend. Somit ist folgender Nachweis zu führen:

$$\frac{Z/D}{k_A \cdot A \cdot \text{zul } \sigma_{Z/D}} + \frac{M_z}{k_{W_z} \cdot W_z \cdot \text{zul } \sigma_B} \leq 1 \quad (21)$$

mit

k_{W_z} und k_A = Beiwerte für innere Lamellen nach Tabelle 3,

zul σ_B , zul $\sigma_{Z/D}$ = zul. Biegespannung bzw. zul. Zug-/Druckspannung nach Tabelle 2

3.4.3 Doppelbiegung mit Normalkraft

Bei Doppelbiegung mit Normalkraft können die nachfolgenden Nachweise geführt werden:

Äußere Lamellen:

$$\frac{\sigma_{Z/D}}{k_A \cdot \text{zul } \sigma_{Z/D}} + \frac{\sigma_{B_y}}{k_{W_y} \cdot \text{zul } \sigma_B} + \frac{\sigma_{B_z}}{k_{W_z} \cdot \text{zul } \sigma_B} \leq 1 \quad (22)$$

Innere Lamellen:

$$\frac{\sigma_{By}}{k_{Wy} \cdot \text{zul}\sigma_B} + \frac{\sigma_{Bz}}{k_{Wz} \cdot \text{zul}\sigma_B} + \frac{\sigma_{Z/D}}{k_A \cdot \text{zul}\sigma_{Z/D}} \leq 1 \quad (23)$$

mit
 k_{Wy} , k_{Wz} und k_A = Beiwerte nach Tabelle 3.

zul σ_B , zul $\sigma_{Z/D}$ = zul. Biegespannung bzw. zul. Zug-/Druckspannung nach Tabelle 2

3.5 Schubspannungen

Die größte im Querschnitt auftretende Schubspannung (im Schwerpunkt) kann wie folgt berechnet werden:

$$\tau_{\max} = \frac{Q \cdot ES_{\max}^*}{EI^* \cdot B} \quad (24)$$

Mit Gl.(4) und (5):

$$\tau_{\max} = \frac{Q \cdot S}{I \cdot B} \cdot \frac{E_1 \cdot k_{ES}}{E_1 \cdot k_{EI}} = 1,5 \frac{Q}{A} \cdot \frac{k_{ES}}{k_{EI}} \quad (25)$$

Die Berechnungen ergaben, daß die Verhältniswerte k_{ES}/k_{EI} stets kleiner als 1 sind, so daß auf der sicheren Seite liegend folgender Nachweis geführt werden kann:

$$\tau_{\max} = 1,5 \frac{Q}{A} \leq \text{zul } \tau_Q \quad (26)$$

Beim Nachweis der Schubspannung werden die Lamellen im inneren Trägerbereich maßgebend. In DIN 1052 wurde davon ausgegangen, daß Biegeträger meist kombiniert aufgebaut werden, so daß die in DIN 1052-1/A1 angegebenen Werte für zul τ_Q den Unterschied einer Lamellenklasse bereits berücksichtigen.

Bei den Querschnittstypen 4 und 5 werden aber im inneren Trägerbereich Lamellen einer schlechteren Sortierklasse eingesetzt, als dies in DIN 1052 vorgesehen ist. Daher ist bei diesen Trägern mit einer zulässigen Schubspannung von zul $\tau_Q = 1,2$ zu rechnen.

3.6 Spannungskombination am angeschnittenen Rand

Nach DIN 1052-1 Gl.(31 und 32) ist der Nachweis der Spannungskombination am angeschnittenen Rand wie folgt zu führen:

Am Biegezugrand:

$$\sigma_B \leq k_Z \cdot \text{zul}\sigma_B \quad (27)$$

mit

$$k_Z = \frac{1}{\text{zul}\sigma_B \sqrt{\left(\frac{1}{\text{zul}\sigma_B}\right)^2 + \left(\frac{\tan \alpha}{1,25 \cdot \text{zul}\sigma_{ZL}}\right)^2 + \left(\frac{(\tan \alpha)^2}{1,33 \cdot \text{zul}\tau_a}\right)^2}}$$

Am Biegedruckrand:

$$\sigma_B \leq k_D \cdot \text{zul}\sigma_B \quad (28)$$

mit

$$k_D = \frac{1}{\text{zul}\sigma_B \sqrt{\left(\frac{1}{\text{zul}\sigma_B}\right)^2 + \left(\frac{\tan \alpha}{\text{zul}\sigma_{D\perp}}\right)^2 + \left(\frac{(\tan \alpha)^2}{2,66 \cdot \text{zul}\tau_a}\right)^2}}$$

Tabelle 4: Beiwerte k_Z und k_D in Abhängigkeit vom Ansnchnittwinkel α

α	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8	10	12	14
k_Z	0,96	0,92	0,89	0,85	0,80	0,76	0,71	0,67	0,59	0,51	0,45	0,35	0,27	0,22
k_D	1,0	1,0	1,0	1,0	0,94	0,93	0,91	0,89	0,85	0,81	0,77	0,69	0,62	0,55

wobei für BS11 die zulässigen Spannungen von BS14 eingesetzt werden dürfen.

Die in [3] durchgeführten Berechnungen zeigten, daß die k_Z und k_D - Werte für die Klassen BS16 und BS18 kleiner sind als bei den Klassen BS11 und BS14. Dies würde bedeuten, daß der Einfluß der Spannungskombination bei den neuen BS-Klassen stärker wäre als bei den alten.

Dies ist jedoch darauf zurückzuführen, daß für die Klassen mit maschinell sortierten Lamellen (BS16, BS18) keine höheren Werte für die zulässigen Querkzug- und Querkdruckspannungen vereinbart wurden als für die Klassen mit visuell sortierten Lamellen (BS11, BS14). Versuche im In- und Ausland zeigen aber, daß die zugehörigen Festigkeitswerte von der Rohdichte bzw. dem Elastizitätsmodul des Holzes abhängig sind, so daß für die BS-Klassen mit maschinell sortierten Lamellen durchaus höhere zulässige Werte angesetzt werden könnten (so wie dies in der europäischen Brettschichtholz-Norm prEN 1194 gemacht wurde). Der Nachweis nach DIN 1052-1 liegt somit auf der sicheren Seite.

Für die praktische Bemessung erscheint es daher gerechtfertigt, für alle BS-Klassen einheitliche Abminderungsbeiwerte k_Z und k_D zu verwenden. Legt man die Abminderung für BS14 zugrunde, so kann der Nachweis wie folgt geführt werden:

$$\sigma_B = \frac{M}{W} \leq k_{Z/D} \cdot \text{zul}\sigma_B \quad (29)$$

mit

k_Z und k_D = Beiwerte nach **Tabelle 4**,
 zul σ_B = zul. Biegespannung nach Tabelle 2.

Bei diesem Nachweis darf bei allen BS-Klassen mit $k_{Wy} = 1$ gerechnet werden.

Tritt bei unsymmetrisch aufgebauten Trägern (Querschnittstypen 3 und 5) eine Spannungskombination am 'schwächeren' Trägerrand auf, so ist bei den Klassen BS16 und BS18 für zul σ_B der Wert der nächst niedrigeren BS-Klasse einzusetzen.

4 Durchbiegungsnachweis

Beim Nachweis der Gebrauchstauglichkeit (Durchbiegung) ist der Einfluß des Trägeraufbaus ebenfalls zu berücksichtigen. Die in DIN 1052-1/A1 festgelegten Werte für den Elastizitätsmodul gelten für unsymmetrisch aufgebaute Querschnittstypen. Für symmetrisch aufgebaute Träger darf der Elastizitätsmodul um 1000 N/mm² erhöht werden. Die durchgeführten Berechnungen bestätigen weitgehend diese getroffenen Regelung, wobei sie auch auf die Querschnittstypen 4 und 5 ausgedehnt werden können.

Die größte Durchbiegung eines Biegeträgers kann damit wie folgt berechnet werden:

$$\max f = k_f \frac{Q \cdot \ell^4}{EI} \quad (30)$$

mit

k_f = Faktor zur Berechnung der Durchbiegung
 = 5/384 bei Einfeldträgern mit Gleichstreckenlast
 E = Elastizitätsmodul nach Tabelle 2

5 Stabilitätsnachweise

5.1 Kippen

Das in DIN 1052-1 angegebene Bemessungsverfahren wurde auf der Grundlage der Spannungstheorie II. Ordnung hergeleitet. Hierbei wird das Ausweichbestreben des Trägers über ein Zusatzmoment M_z^{\parallel} berücksichtigt und folgender Nachweis geführt:

$$\frac{\gamma_1 \cdot \sigma_{B,y}}{\gamma_1 \cdot \text{zul } \sigma_B} + \frac{\sigma_{B,z}^{\parallel}}{\gamma_1 \cdot \text{zul } \sigma_B} \leq 1 \quad (31)$$

wobei γ_1 dem Lasterhöhungsbeiwert entspricht ($\gamma_1 = 2,0$).

Dieser Nachweis auf Doppelbiegung kann umgeformt werden zu:

$$\frac{\sigma_{B,y}}{k_B \cdot \text{zul } \sigma_B} \leq 1 \quad (32)$$

wobei der Kippbeiwert k_B dem Verhältnis der Spannung $\sigma_{B,y}^{\parallel}$ infolge 'Hauptbiegung' zur gesamten Beanspruchung entspricht:

$$k_B = \frac{\sigma_y^{\parallel}}{\sigma_y^{\parallel} + \sigma_z^{\parallel}} = \frac{\sigma_y^{\parallel}}{\sigma_{\text{ges}}^{\parallel}} \quad (33)$$

k_B ist abhängig vom Kippschlankheitsgrad λ_B und ist für $\lambda_B > 1,2$ nahezu identisch mit dem Kippbeiwert $k_{B,i}$ für ideales Kippen. In diesem Fall ist der Einfluß des Querschnittsaufbaus nur von untergeordneter Bedeutung und kann ausreichend genau über die in Abschnitt 4 beschriebene Modifikation des Elastizitätsmoduls erfaßt werden.

Ein Spannungsproblem, bei dem auch die inneren Querschnittsbereiche maßgebend werden können, liegt somit nur bei Kippschlankheiten $\lambda_B < 1,2$ vor. In diesen Fällen ist aber der Kippbeiwert k_B stets größer als 0,65, was bedeutet, daß der Anteil der Querbiegung ($\sigma_z^{\parallel} / \sigma_{\text{ges}}^{\parallel}$) weniger als 35% beträgt, und die inneren Querschnittsbereiche nicht maßgebend werden (vgl. Abschnitt 3.3.3).

Tabelle 5: Beiwerte k_B für den Kippnachweis

	BS11		BS14			BS16					BS18				
Typ	1	1	2	3	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	
k_B	0,0534	0,0576	0,0576	0,0589	0,0592	0,0592	0,0604	0,0592	0,0604	0,0605	0,0605	0,0616	0,0605	0,0616	

5.2 Knicken

Die zu homogenen Trägern durchgeführten Berechnungen bestätigten die in DIN 1052-1/A1 getroffene Regelung, daß für Brettschichtholz der Klassen BS14, BS16 und BS18 einheitliche Knickzahlen verwendet werden können.

Die zu kombiniert aufgebauten Trägern durchgeführten Berechnungen ergaben, daß die ω -Zahlen für alle Querschnittstypen unabhängig von der Richtung des Ausknickens in der gleichen Größenordnung liegen wie die von Brettschichtholz der Klasse BS11.

Dies kann damit erklärt werden, daß die ω -Zahlen im wesentlichen vom Verhältnis der Druckfestigkeit β_D zum Elastizitätsmodul E abhängig sind. Bei den betrachteten kombinierten Querschnittstypen lagen die Verhältniswerte alle in der gleichen Größenordnung wie bei BS11, so daß es gerechtfertigt erscheint, für alle kombiniert aufgebauten Brettschichtholzträger die ω -Zahlen von BS11 zu verwenden.

Somit kann unabhängig von der Richtung des Ausknickens folgender Nachweis geführt werden:

Somit kann auch für kombiniert aufgebaute Brettschichtholzträger der Kippnachweis nach DIN 1052-1 geführt werden, wobei der Einfluß des Trägeraufbaus ausreichend über den Elastizitätsmodul berücksichtigt wird:

$$\frac{M_y}{k_{WY} \cdot W_Y \cdot k_B \cdot 1,1 \cdot \text{zul } \sigma_B} \leq 1 \quad (34)$$

mit

k_{WY} = Beiwert für äußere Lamellen nach Tabelle 3

$$k_B = \begin{cases} 1 & \text{für } \lambda \leq 0,75 \\ 1,56 - 0,75 \cdot \lambda_B & \text{für } 0,75 \leq \lambda_B \leq 1,4 \\ 1 / \lambda_B^2 & \text{für } 1,4 < \lambda_B \end{cases}$$

λ_B = Kippschlankheitsgrad

$$= \sqrt{\frac{s \cdot h \cdot \gamma_1 \cdot \text{zul } \sigma_{B,y}}{\pi b^2 \sqrt{E_{\parallel} G_T}}}$$

$$= k_B \cdot \sqrt{\frac{sh}{b^2}} \quad \text{mit } k_B \text{ nach Tabelle 5}$$

s = Abstand der seitlichen Abstützungen

b, h = Breite und Höhe des Trägers

zul σ_B = zulässige Biegespannung nach Tabelle 2

E_{\parallel} = Elastizitätsmodul nach Tabelle 2

G_T = Torsions-Schubmodul

= Schubmodul G nach Tabelle 2.

Bei Trägern mit wechselnder Momentenbeanspruchung (z.B. Durchlaufträger oder Rahmen) wird empfohlen, symmetrische Querschnittsaufbauten zu verwenden. Kommen dennoch unsymmetrisch aufgebaute Träger zum Einsatz, so werden auch die schwächeren Querschnittsteile einer Zugbeanspruchung ausgesetzt. Wird der Kippnachweis an einer solchen Stelle geführt, so ist für zul $\sigma_{B,y}$ der Wert der nächst niedrigeren BS-Klasse einzusetzen (vgl. auch Abschnitt 3.2.1).

$$\omega \cdot \frac{D}{k_A \cdot A \cdot \text{zul } \sigma_{D\parallel}} \leq 1 \quad (35)$$

k_A = Beiwert für innere Lamellen nach Tabelle 3

zul $\sigma_{D\parallel}$ = zulässige Druckspannung nach Tabelle 2 und

ω = Knickzahl nach Tabelle 6

5.3 Knicken und Kippen

In DIN 1052-1 werden die beiden Stabilitätsfälle Knicken und Kippen vereinfacht linear überlagert. Überträgt man diese Vereinfachung auch auf kombinierte Brettschichtholzträger, so wird empfohlen, für die Beiwerte zur Modifikation der Querschnittswerte die jeweils ungünstigsten Werte einzusetzen:

$$\omega \cdot \frac{D}{k_A \cdot A \cdot \text{zul } \sigma_{D\parallel}} + \frac{M_y}{k_{WY} \cdot W_Y \cdot k_B \cdot 1,1 \cdot \text{zul } \sigma_B} \leq 1 \quad (36)$$

k_A = Beiwert für innere Lamellen nach Tabelle 3,

k_{WY} = Beiwert für äußere Lamellen nach Tabelle 3,

zul σ_D und zul σ_B = zul. Spannungen nach Tabelle 2

Tabelle 6 Knickzahlen ω

λ	BS11 und BS14, BS16, BS18 Typ 2 - 5	BS14, BS16, BS18 Typ 1
0	1,00	1,00
10	1,00	1,00
20	1,00	1,00
30	1,00	1,00
40	1,03	1,04
50	1,11	1,14
60	1,25	1,32
70	1,45	1,59
80	1,75	2,08
90	2,22	2,63
100	2,74	3,25
110	3,32	3,93
120	3,95	4,68
130	4,63	5,49
140	5,37	6,50
150	6,17	7,89

6 Keilgezinkte Rahmenecken

Bei der Überarbeitung der DIN 68140 (Keilzinkenverbindungen) wurde beschlossen, das Thema keilgezinkte Rahmenecken in einer eigenständigen Norm zu behandeln. Daher wurden die zugehörigen Regelungen nicht mehr in DIN 68140 aufgenommen. Somit entstand ein gewisses 'Loch' in der Bemessung von Brettschichtholzträgern, da diese Norm noch nicht vorliegt. Es wurde jedoch vereinbart, daß die 'alte' Regelung auch weiterhin gültig bleiben soll.

Diese Regelung gilt jedoch nur für die alten Brettschichtholzklassen BS11 und BS14. Daher wurde dieses Thema im Rahmen des Forschungsvorhabens zusätzlich behandelt.

Der bisherige Nachweis (vgl. auch [4]) lautet

$$\omega \cdot \frac{N}{A_n} + \frac{\text{zul} \sigma_{D\parallel}}{\text{zul} \sigma_B} \cdot \frac{M}{W_n} \leq \text{zul} \sigma_{D,\gamma} \quad (37)$$

mit

zul $\sigma_{D,\gamma}$ = zulässige Druckspannung unter dem Winkel γ .

Das Ansetzen von zul $\sigma_{D,\gamma}$ als Grenzwert für die Bemessung ist darauf zurückzuführen, daß bei den Versuchen das Versagen auf das Erreichen der Druckfestigkeit im Bereich der Keilzinkenverbindung zurückzuführen war. Zur Berücksichtigung des Einflusses von Ästen im Keilzinkenbereich ist dabei für zul $\sigma_{D,\gamma}$ der Wert für Nadelholz der Güteklasse II (S 10) einzusetzen, auch bei Brettschichtholz der Güteklasse I (BS14)! Dies entspricht für BS14 einer Abminderung von etwa 23% bzw. einer zulässigen Spannungsausnutzung von etwa 77%.

Nun weisen maschinell sortierte Bretter im Vergleich zu visuell sortierten Brettern eine höhere Rohdichte und einen höheren Elastizitätsmodul auf. Diese beiden Materialeigenschaften beeinflussen auch die Druckfestigkeit des Holzes maßgeblich, so daß davon ausgegangen werden kann, daß keilgezinkte Rahmenecken aus BS16 und BS18 eine höhere Tragfähigkeit besitzen als vergleichbare Rahmenecken aus BS14.

Unter Berücksichtigung des Querschnittsaufbaus kann der Nachweis nach Gl.(39) wie folgt umgeformt werden:

$$\frac{\omega \cdot \frac{N}{k_A \cdot A_n}}{\text{zul} \sigma_{D\parallel}} + \frac{\frac{M_y}{k_{W_y} \cdot W_{y,n}}}{\text{zul} \sigma_B} \leq \frac{\text{zul} \sigma_{D,\gamma}}{\text{zul} \sigma_{D\parallel}} \quad (38)$$

zul $\sigma_{D\parallel}$ und zul σ_B entsprechen hierbei den zulässigen Spannungen unter Berücksichtigung der zulässigen Spannungsausnutzung.

Das Verhältnis zul $\sigma_{D,\gamma}$ / zul $\sigma_{D\parallel}$ kann unabhängig von der BS-Klasse mit folgender Näherung berechnet werden:

$$\begin{aligned} \frac{\text{zul} \sigma_{D,\gamma}}{\text{zul} \sigma_{D\parallel}} &= \frac{\text{zul} \sigma_{D,\gamma}}{\text{zul} \sigma_{D\parallel}} \\ &= \frac{\text{zul} \sigma_{D\parallel} - (\text{zul} \sigma_{D\parallel} - \text{zul} \sigma_{D\perp}) \cdot \sin \gamma}{\text{zul} \sigma_{D\parallel}} \quad (39) \\ &\approx 1 - 0,75 \cdot \sin \gamma \end{aligned}$$

Der mit dieser Näherung gemachte 'Fehler' beträgt weniger als 3% für $\gamma < 30^\circ$.

Setzt man für die Klassen BS14 - BS18 eine zulässige Spannungsausnutzung von 75% an, so können folgende Nachweise geführt werden, wobei ein symmetrischer Trägersaufbau vorausgesetzt wird:

BS11:

$$\frac{\omega \cdot \frac{N}{k_A \cdot A_n}}{\text{zul} \sigma_{D\parallel}} + \frac{\frac{M_y}{k_{W_y} \cdot W_{y,n}}}{\text{zul} \sigma_B} \leq 1 - 0,75 \cdot \sin \gamma \quad (40)$$

BS14 - BS18:

$$\frac{\omega \cdot \frac{N}{k_A \cdot A_n}}{\text{zul} \sigma_{D\parallel}} + \frac{\frac{M_y}{k_{W_y} \cdot W_{y,n}}}{\text{zul} \sigma_B} \leq 0,75 \cdot (1 - 0,75 \cdot \sin \gamma) \quad (41)$$

mit:

- k_A und k_{W_y} = Beiwerte für äußere Lamellen nach Tabelle 3
- A_n = $0,8 \cdot A$ (A rechtwinklig zur Trägerachse gemessen)
- W_n = $0,8 \cdot W$ (W rechtwinklig zur Trägerachse)
- ω = Knickzahl
- N, M_y = Schnittgrößen an den Stellen ① bzw. ② (vgl. Bild 2)
- zul $\sigma_{D\parallel}$ = zulässige Druckspannung nach Tabelle 2
- zul σ_B = zulässige Biegespannung nach Tabelle 2

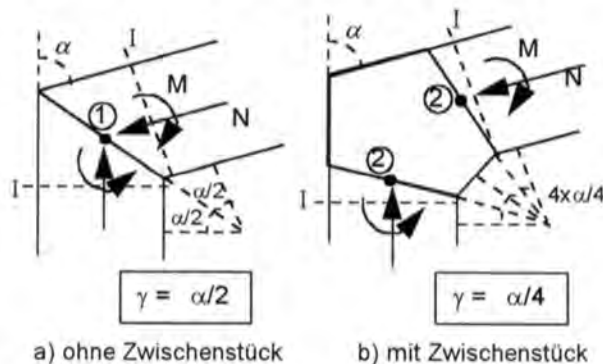


Bild 2: Systemskizze einer keilgezinkten Rahmenecke

Liegen bei unsymmetrischen Querschnittsaufbauten (Typ 3 und Typ 5) die schwächeren Lamellen an der Innenseite des Knickes, so ist die zulässige Spannungsausnutzung um weitere 25% abzumindern!

Bei positiven Eckmomenten (infolge von Wind) treten in der Ecke Querzugspannungen auf. In diesem Fall darf - bis neuere Erkenntnisse vorliegen - nur eine zulässige Spannungsausnutzung von 20% angesetzt werden (vgl. [4]). Folgender Nachweis ist zu führen:

$$\frac{\omega \cdot \frac{N}{k_A \cdot A_n}}{\text{zul } \sigma_{D||}} + \frac{\frac{M_y}{k_{WY} \cdot W_{y,n}}}{\text{zul } \sigma_B} \leq 0,2 \cdot (1 - 0,75 \cdot \sin \gamma) \quad (42)$$

7 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Veröffentlichung werden Vorschläge für die vereinfachte Bemessung von Brettschichtholz nach DIN 1052-1/A1 als Verbundträger gemacht. Hierbei werden fünf verschiedene Querschnittsaufbauten zugrundegelegt. Neben den Spannungsnachweisen für Zug, Druck und Biegung werden auch die Stabilitätsfälle Knicken und Kippen behandelt. Darüber hinaus wird eine Näherung für den Nachweis der Spannungskombination am angeschnittenen Rand angegeben, sowie ein Vorschlag für die Bemessung von keilgezinkten Rahmenecken gemacht.

8 Literatur

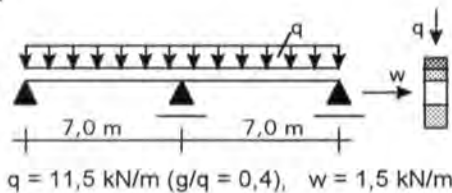
- [1] Colling, F.; Radovic, B. 1996: Brettschichtholz nach DIN 1052-1/A1 aus maschinell sortierten Brettern. Holzbau-Statik-Aktuell, Ausgabe Mai 1996
- [2] DIN 1052-1/A1: Holzbauwerke Teil 1: Berechnung und Ausführung, Änderung 1, Ausgabe 10/96
- [3] Colling, F. 1997: Tragverhalten von Brettschichtholz aus Brett lamellen mit unterschiedlichen Holzqualitäten im Hinblick auf die Bemessung. Forschungsbericht der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung e.V., München
- [4] Heimeshoff, B. 1976: Berechnung von Rahmenecken mit Keilzinkenverbindungen. Holzbau-Statik-Aktuell, Folge 1 und 2

9 Beispiele

Bei den nachfolgenden Beispielen wurden bewußt unsymmetrisch aufgebaute Brettschichtholzträger gewählt, um die Besonderheiten dieser Trägertypen aufzuzeigen.

Wie bereits mehrfach erwähnt, ist bei Trägern mit wechselnder Momentenbeanspruchung der Einsatz von symmetrisch aufgebautem Brettschichtholz zu empfehlen.

Beispiel 1



Gewählt: **BS18-5** (Typ 5), $b/h = 16/40 \text{ cm}$

$A = 640 \text{ cm}^2$, $W_y = 4267 \text{ cm}^3$, $W_z = 1707 \text{ cm}^3$, $I_y = 85333 \text{ cm}^4$

Lage der hochwertigen Lamellen: oben.

Mindesthöhe des Bereiches mit hochwertigen Lamellen:
 $40/6 = 6,7 \text{ cm}$ (z.B. 2 Lamellen à 33 mm)

$M_{B,y} = -0,125 q \ell^2 = 70,4 \text{ kNm}$, $M_{B,z} = 9,2 \text{ kNm}$

$\max M_{F,y} = 0,085 q \ell^2 = 47,9 \text{ kNm}$,

$\max M_{F,z} = 0,07 w \ell^2 = 5,15 \text{ kNm}$

$\max Q = 0,625 q \ell = 50,3 \text{ kN}$

Biegespannungsnachweise nachfolgend nur für LF HZ geführt

Nachweis der Doppelbiegung über Mittelstütze
 (vgl. Abschn. 3.3.3):

$$\text{zul } \sigma_B = 1,1 \cdot 1,25 \cdot 18 = 24,8 \text{ N/mm}^2$$

Faktor 1,1 wegen Durchlaufträger, Faktor 1,25 wegen LF HZ

Äußere Lamellen:

$k_{WY} = 1,0$ $k_{WZ} = 0,9$ (aus Tabelle 3)

$$\frac{70,4 \cdot 10^6}{1,0 \cdot 4267 \cdot 10^3} + \frac{9,2 \cdot 10^6}{0,9 \cdot 1707 \cdot 10^3} = 16,5 + 6,0 = 22,5 < 24,8$$

Innere Lamellen:

$k_{WY} = 1,50$ $k_{WZ} = 0,7$ (aus Tabelle 3)

$$\frac{70,4 \cdot 10^6}{1,50 \cdot 4267 \cdot 10^3} + \frac{9,2 \cdot 10^6}{0,7 \cdot 1707 \cdot 10^3} = 11,0 + 7,7 = 18,7 < 24,8$$

Nicht maßgebend, da Anteil Querbiegung $< 40\%$:

$$\frac{6,0}{22,5} = 0,27 < 0,4$$

Wegen unsymmetrischem Querschnittsaufbau **zusätzlich**

Nachweis im Feld erforderlich mit $\text{zul } \sigma_B$ von BS16
 (vgl. Abschnitt 3.3.1):

$$\text{zul } \sigma_B = 1,25 \cdot 16 = 20,0 \text{ N/mm}^2$$

Äußere Lamellen:

$k_{WY} = 1,0$ $k_{WZ} = 0,9$ (aus Tabelle 3)

$$\frac{47,9 \cdot 10^6}{1,0 \cdot 4267 \cdot 10^3} + \frac{5,15 \cdot 10^6}{0,9 \cdot 1707 \cdot 10^3} = 11,2 + 3,4 = 14,6 < 20,0$$

Innere Lamellen:

$k_{WY} = 1,50$ $k_{WZ} = 0,7$ (aus Tabelle 3)

$$\frac{47,9 \cdot 10^6}{1,50 \cdot 4267 \cdot 10^3} + \frac{5,15 \cdot 10^6}{0,7 \cdot 1707 \cdot 10^3} = 7,5 + 4,3 = 11,8 < 20,0$$

Durchbiegungsnachweis (hier nur für LF H), (vgl. Abschn. 4):

$E = 13\,000 \text{ N/mm}^2$ (aus Tabelle 2)

$$f = 0,0054 \cdot \frac{g \ell^4}{EI} + 0,0092 \cdot \frac{p \ell^4}{EI} = 0,00768 \cdot \frac{q \ell^4}{EI}$$

$$= 0,00768 \cdot \frac{115 \cdot 7000^4}{13000 \cdot 85333 \cdot 10^4}$$

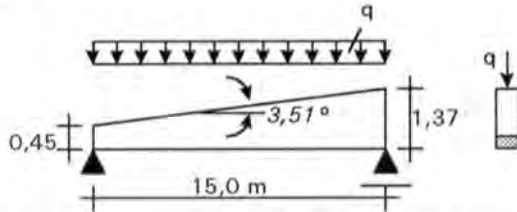
$$= 19,1 \text{ mm} < \ell/300 = 23,3 \text{ mm}$$

Schubspannungsnachweis (hier nur für LF H),
 (vgl. Abschn. 3.5):

$\text{zul } \tau_Q = 1,2 \text{ N/mm}^2$ (für Querschnittstyp 5 !)

$$\tau = 1,5 \cdot \frac{Q}{A} = 1,5 \cdot \frac{50,3 \cdot 10^3}{640 \cdot 10^2} = 1,18 < 1,2 \text{ N/mm}^2$$

Beispiel 2



$q = 7,6 \text{ kN/m}$ (LF H), der Träger ist in der Mitte gegen seitliches Ausweichen gehalten.

Gewählt: **BS14-3** (Typ 3), $b = 16 \text{ cm}$

Lage der hochwertigen Lamellen: unten.

$\max M = 214 \text{ kNm}$, $\max Q = 57,0 \text{ kN}$

$\max \sigma_B = 13,0 \text{ N/mm}^2$ bei $x = 3,71 \text{ m}$,

$h_x = 0,68 \text{ m}$

Mindesthöhe des Bereiches mit hochwertigen Lamellen:
 $68/6 = 11 \text{ cm}$ (z.B. 3 Lamellen à 40 mm)

Nachweis der Spannungskombination (vgl. Abschn. 3.6):

zul $\sigma_B = 14,0 \text{ N/mm}^2$, $k_{WY} = 1,0$ (vgl. Abschn. 3.6)

$\alpha = 3,51^\circ \rightarrow k_D = 0,94$ (aus Tabelle 4)

$13,0 < 0,94 \cdot 14,0 = 13,2 \text{ N/mm}^2$

Schubspannungsnachweis (vgl. Abschn. 3.5):

zul $\tau_Q = 1,2 \text{ N/mm}^2$

$1,5 \cdot \frac{57,0 \cdot 10^3}{160 \cdot 450} = 1,19 \text{ N/mm}^2 < 1,2 \text{ N/mm}^2$

Kippnachweis (vgl. Abschn. 5.1):

Wegen veränderlicher Höhe näherungsweise an der Stelle von $\max \sigma_B$ geführt.

$k_{WY} = 1,0$ (aus Tabelle 3)

$k_B = 0,0589$ (aus Tabelle 5)

$\lambda_B = 0,0589 \cdot \sqrt{\frac{7,5 \cdot 0,68}{0,16^2}} = 0,831$

$\rightarrow k_B = 1,56 - 0,75 \cdot 0,831 = 0,94$

$\frac{13,0}{1,0 \cdot 0,94 \cdot 11 \cdot 14,0} = 0,90 < 1$

Durchbiegungsnachweis (vgl. Abschn. 4):

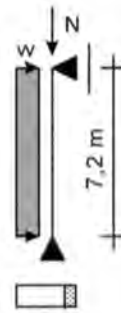
$E = 11000 \text{ N/mm}^2$ (aus Tabelle 2)

zul $f = l/200$ wegen Überhöhung

$k_M \approx 0,15$ (z.B. aus E DIN 1052, Bild 8/27)

$f = k_M \cdot \frac{5}{384} \cdot \frac{q \cdot l^4}{EI_a} = 0,15 \cdot \frac{5}{384} \cdot \frac{7,6 \cdot 15000^4}{11000 \cdot 160 \cdot 450^3 / 12}$
 $= 56,3 \text{ mm} < l/200 = 75 \text{ mm}$

Beispiel 3



$N = 150 \text{ kN}$,

$w = 3,5 \text{ kN/m}$, $\max M_y = 22,7 \text{ kNm}$ (LF HZ)

Die Stütze ist in halber Höhe gegen Ausweichen \perp zur schwachen Achse gehalten.

Gewählt: **BS16-3** (Typ 3), $b/h = 14/36 \text{ cm}$

Lage der hochwertigen Lamellen: innen.

Mindesthöhe des Bereiches mit hochwertigen Lamellen:

$36/6 = 6 \text{ cm}$ (z.B. 2 Lamellen à 33 mm)

$A = 504 \text{ cm}^2$, $W_y = 3024 \text{ cm}^3$

zul $\sigma_D = 1,25 \cdot 11,5 = 14,4 \text{ N/mm}^2$

zul $\sigma_B = 1,25 \cdot 16,0 = 20,0 \text{ N/mm}^2$

$\max \lambda = \lambda_z = \frac{360}{0,289 \cdot 14} = 89$

Wegen kombiniertem Querschnittsaufbau:

ω -Zahlen wie BS11: $\omega = 2,17$ (aus Tabelle 6)

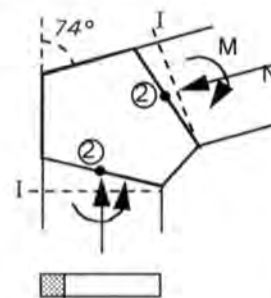
Kippen nicht maßgebend ($\lambda_B = 0,49 \leq 0,75$), daher nur Nachweis für Knicken und Biegung (vgl. Abschn. 5.2 und 5.3):

$k_{WY} = 0,95$ (aus Tabelle 3 für äußere Lamellen)

$k_A = 0,75$ (aus Tabelle 3 für innere Lamellen)

$\frac{2,17 \cdot \frac{150 \cdot 10^3}{0,75 \cdot 504 \cdot 10^2} + \frac{22,7 \cdot 10^6}{0,95 \cdot 3024 \cdot 10^3}}{14,4} = 0,60 + 0,40 = 0,99 < 1$

Beispiel 4



$N = -55 \text{ kN}$, $M = -105 \text{ kNm}$ (LF H)

Gewählt: **BS18-3**

Lage der hochwertigen Lamellen: außen.

Schnitt I-I: $b/h = 18/80 \text{ cm}$

Mindesthöhe des Bereiches mit hochwertigen Lamellen:
 $80/6 = 13,5 \text{ cm}$

$A_n = 0,8 \cdot 18 \cdot 80 = 1152 \text{ cm}^2$,
 $W_n = 0,8 \cdot 18 \cdot 80^2 / 6 = 15360 \text{ cm}^3$

zul $\sigma_D = 13,0 \text{ N/mm}^2$, zul $\sigma_B = 18,0 \text{ N/mm}^2$

Aus vorheriger Berechnung: $\lambda = 60 \rightarrow \omega = 1,25$ (wie BS11)

Wegen unsymmetrischem Aufbau und Lage der schwächeren Lamellen an der Innenseite des Knickes: Nachweis mit zweimaliger Abminderung um 25% (vgl. Abschnitt 6):

Zulässiger Grenzwert: $0,75 \cdot 0,75 \cdot [1 - 0,75 \cdot \sin(74^\circ/4)] = 0,43$

$k_A = 0,9$ (aus Tabelle 3 für äußere Lamellen)

$k_{WY} = 1,0$ (aus Tabelle 3 für äußere Lamellen)

$\frac{1,25 \cdot \frac{55 \cdot 10^3}{0,9 \cdot 1152 \cdot 10^2} + \frac{105 \cdot 10^6}{10 \cdot 15360 \cdot 10^3}}{13,0} = 0,05 + 0,38 = 0,43$