

Zum Trag- und Verformungsverhalten von LIGNOTREND-Decken- und Wandsystemen aus Nadel-schnittholz

H.J. Blaß und R. Görlacher¹

1 Allgemeines

Die Firma LIGNOTREND AG besitzt für LIGNOTREND-Deckensysteme und Wandsysteme allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen des Deutschen Instituts für Bau-technik in Berlin (Zulassungen Nr. Z-9.1-409 und Z-9.1-283). Die Bestimmungen für Entwurf und Bemessung in beiden Zulassungen wurden auf der Grundlage von Versuchen und theoretischen Betrachtungen festgelegt. In den Zulassungen sind Rechenwerte für zulässige Biegemomente (zul M), zulässige Querkräfte (zul Q) und Rechenwerte der Steifigkeiten angegeben, die theoretische Herleitung dieser Werte ist aus den Zulassungen nicht erkennbar. Die zulässigen Belastungen und die Steifigkeitskennwerte können daher nur dann angewendet werden, wenn die Vorgaben der Zulassungen hinsichtlich des Aufbaus der Elemente exakt eingehalten werden.

Veränderte Aufbauten der Elemente, die sich durch Weiterentwicklungen oder spezielle Anforderungen eines Bauvorhabens ergeben, können somit nicht ohne weiteres verwendet werden.

Ziel dieser Veröffentlichung ist es, die Ergebnisse der durchgeführten Versuche und die Herleitung der Rechenwerte für das Trag- und Verformungsverhalten aufzuzeigen. Dadurch können auch Elemente mit unwesentlichen Abweichungen von den in den bestehenden Zulassungen angegebenen Maßen oder Elementaufbauten rechnerisch nachgewiesen werden.

2 Elemente mit faserparallel verklebten Hölzern

Bei LIGNOTREND-Deckenelementen nach Zulassung Z-9.1-409 bestehen die tragenden Holzteile aus faserparallel miteinander verklebten Brettlagen. Jedes 600 mm breite Element enthält vier Stege aus Brettschichtholz, die im lichten Abstand von etwa 75 mm angeordnet sind.

Auf der Unterseite sind zwei über die gesamte Elementbreite laufende Brettlagen mit jeweils 20 mm Dicke angeordnet (Gurtplatte). Diese Brettlagen bestehen jeweils aus mehreren, nebeneinander liegenden Brettern, wobei zwischen diesen Brettern Fugen auftreten dürfen. In diese Bretter werden Entlastungsnuten mit einer Breite von etwa 4 mm und einer Tiefe von 14 mm eingefräst.

¹ Univ.-Prof. Dr.-Ing. H.J. Blaß ist Inhaber des Lehrstuhls für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen, Universität Karlsruhe
Dr.-Ing. R. Görlacher ist Akademischer Oberrat am gleichen Lehrstuhl

Über den Stegen sind Querhölzer mit den Querschnittsmaßen 30 x 60 mm aufgeklebt. Der gegenseitige Abstand der Schwerpunkte der Querhölzer in Längsrichtung der LIGNOTREND-Deckentafeln beträgt 125 mm.

Über den Stegen können anstelle der Querhölzer auch zwei weitere Brettlagen angeordnet werden. In diesem Fall entsteht ein nahezu symmetrischer Querschnitt.

Die Breite eines Elementes beträgt 600 mm, die Gesamthöhe liegt zwischen 110 mm und 310 mm. Der grundsätzliche Aufbau der einzelnen Elemente und die Mindestmaße sind in Bild 1 und 2 dargestellt.

LIGNOTREND Deckentafeln sind in Längsrichtung im Abstand von 3 m durch Universalkeilzinkenverbindungen miteinander verbunden.

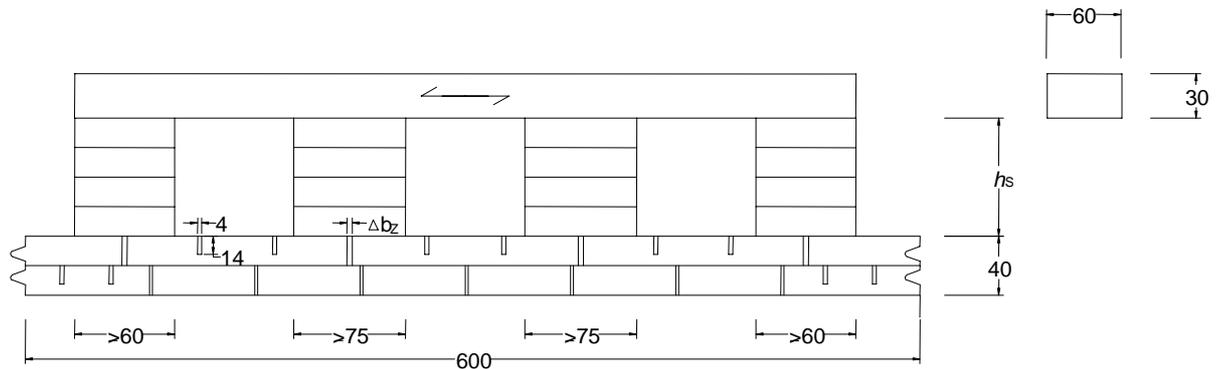


Bild 1: Aufbau einer LIGNOTREND-Deckentafel mit einseitiger Gurtplatte

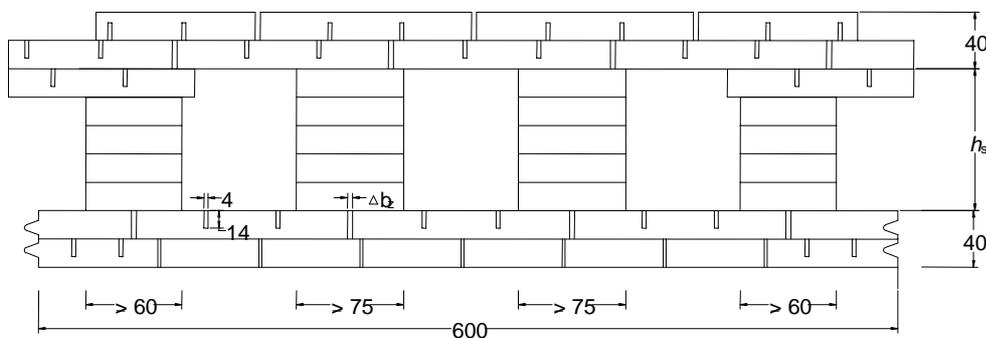


Bild 2: Aufbau einer LIGNOTREND-Deckentafel mit beidseitigen Gurtplatten

Werden LIGNOTREND-Deckentafeln mit einseitiger Gurtplatte rechtwinklig zur Plattenebene beansprucht, wirken sie wie eine π -Platte mit oben liegenden Stegen. Bei einer Beanspruchung durch positive Momente (z. B. Feldmomente) wird die Gurtplatte auf Biegezug, die oberen Stegränder auf Biegedruck beansprucht. Wegen des in der Höhe unsymmetrischen Querschnittsaufbaus ist die Biegespannung an den Stegrändern größer als am Außenrand der Gurtplatte.

Bei Versuchen zur Bestimmung des Trag- und Verformungsverhaltens von LIGNOTREND-Deckentafeln mit einseitiger Gurtplatte trat als Versagensursache stets ein

Biegezugbruch – teilweise in der Universalkeilzinkenverbindung, teilweise außerhalb - auf. Ein Auftreten von Druckfalten auf der Biegedruckseite konnte auch bei den Versuchen mit zugbeanspruchter Gurtplatte nicht beobachtet werden, obwohl bei dieser Beanspruchungsart am Druckrand deutlich höhere Biegespannungen als am Biegezugrand auftreten.

LIGNOTREND-Deckentafeln können als parallele Tragsysteme angesehen werden, in denen die positive Korrelation zwischen der Festigkeit und der Steifigkeit des Holzes die Tragfähigkeit im Vergleich zu Einzelbauteilen erhöht. Diese positive Wirkung der Lastverteilung ist sowohl innerhalb der Stege vorhanden, die wie Brettschicht-holzbauteile aufgebaut sind, als auch innerhalb eines Elementes zwischen den vier Stegen.

Wegen der traglast erhöhenden Wirkung der Lastverteilung und Lastumlagerung zwischen den einzelnen Komponenten der LIGNOTREND-Deckentafeln wurde eine zulässige Biegerandspannung auf der Zugseite von 10,0 N/mm² festgelegt, obwohl als Ausgangsmaterial Bretter der Sortierklasse S7/MS7 verwendet werden. Diese zulässige Biegerandspannung gilt auch im Bereich der Universalkeilzinkenverbindungen. Der Hintergrund für diese Festlegung liegt in der zweifachen Vergütung und Homogenisierung des Ausgangsmaterials: zunächst werden aus den Einzelbrettern Stege aus Brettschichtholz hergestellt und danach werden vier Stege mit der Gurtplatte zu einem Element zusammengefügt. Die rechnerischen Größtwerte der Biegespannungen treten daher ähnlich wie bei einem liegenden Brettschicht-holzträger immer gleichzeitig in mehreren Einzelbrettern auf. Ein einzelner Ast oder eine einzelne Keilzinkenverbindung innerhalb eines Brettes kann daher den Gesamtquerschnitt nicht in dem Ausmaß schwächen, wie dies bei Vollholzbauteilen oder stehenden Brettschichtholzbauteilen der Fall ist.

Die zulässige Biegespannung der druckbeanspruchten Stegränder ergibt sich durch die Lage der Spannungsnulllebene bei einer zulässigen Biegezugspannung von 10 N/mm² zu 15 N/mm². Diese vergleichsweise hohen Werte können ebenfalls durch die traglaststeigernden Auswirkungen der Lastumlagerung erklärt werden, die bei Druckbeanspruchung noch wesentlich ausgeprägter sind, da beim Erreichen der Druckfestigkeit des Holzes plastische Verformungen auftreten, und eine Lastumlagerung zu den Bereichen mit höherer Druckfestigkeit stattfindet. Allerdings können diese hohen Biegedruckspannungen nur bei vergleichsweise trockenem Holz empfohlen werden. Die Holzfeuchte beträgt bei der Herstellung der LIGNOTREND-Deckentafeln etwa 10 %. Da die Elemente nur im Innern von allseitig geschlossenen Gebäuden eingesetzt werden, ist eine wesentliche Erhöhung der Holzfeuchte über diesen Wert hinaus ausgeschlossen.

Bei den Versuchen zur Bestimmung der Biegefestigkeit der LIGNOTREND-Deckentafeln war bei allen Elementen im Bereich des größten Momentes eine Universalkeilzinkenverbindung angeordnet. In vielen Fällen trat der Bruch trotzdem ganz oder zumindest teilweise außerhalb der Universalkeilzinkenverbindung auf. Da die Herstellung (Fräsen, Leimauftrag und Pressen) der Universalkeilzinkenverbindungen industriell im Werk erfolgt, die zu verbindenden Bauteile eine Länge von nur 3 m aufweisen und die Querschnittshöhen höchstens 310 mm betragen, braucht die durch die Universalkeilzinkenverbindung verursachte Schwächung des Querschnitts bei der Bemessung nicht berücksichtigt zu werden. Voraussetzung hierfür

ist, daß die Qualität der Universalkeilzinkenverbindung durch eine laufende werkseigene Produktionskontrolle und eine regelmäßige Fremdüberwachung gewährleistet wird.

Als zulässige Schubspannung wird in Anlehnung an die Werte für Brettschichtholz $1,2 \text{ N/mm}^2$ angenommen. Dieser Wert kann auch für LIGNOTREND-Deckentafeln angewendet werden, da die Stege der Deckentafeln wie Brettschichtholz aus einzelnen Brettern verklebt sind und somit keine Schwindrisse, die zu einer Reduzierung der schubbeanspruchten Querschnittsfläche führen können, zu erwarten sind. Eine Reduzierung der zulässigen Schubspannung wegen der Verwendung von S7/MS7 ist ebenfalls nicht erforderlich, da die Schubfestigkeit weitgehend unabhängig von der Holzqualität ist.

Die der Berechnung zugrunde liegenden Querschnittsmaße der Deckentafeln mit einseitiger Gurtplatte ergeben sich unter folgenden Annahmen (Bild 3):

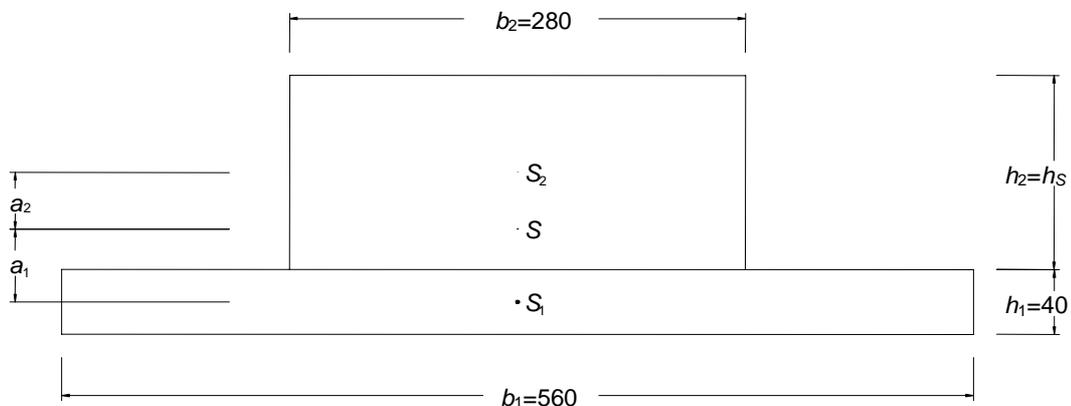


Bild 3: Idealisierter Querschnitt einer LIGNOTREND-Deckentafel mit einseitiger Gurtplatte

- Die rechnerische Breite b_1 der Gurtplatte wurde unter Berücksichtigung der möglichen Fugenbreiten zwischen den Brettlagen und der Entlastungsnuten zu 560 mm angenommen.
- Als rechnerische Stegbreite b_2 wurde die Summe der Einzelstege (Mittelwert) angenommen: $b_2 = 280 \text{ mm}$
- Als Rechenwert für den Elastizitätsmodul wurde 11000 N/mm^2 angenommen.

Das Flächenmoment 2. Grades I eines Deckenelementes berechnet sich zu:

$$I = I_1 + I_2 + a_1^2 A_1 + a_2^2 A_2 \quad (1)$$

wobei die Abstände a_1 und a_2 der Schwerachsen von der Spannungsnullenebene

$$a_2 = 0,5 \cdot \frac{A_1 \cdot (h_1 + h_2)}{A_1 + A_2} \quad (2)$$

$$a_1 = 0,5 \cdot (h_1 + h_2) - a_2 \quad (3)$$

betragen. $I_{1,2}$ bzw. $A_{1,2}$ sind die Querschnittswerte der Gurtplatte bzw. der Stege.

Die Biegerandspannungen infolge eines äußeren Momentes M berechnen sich zu:

$$\sigma_{r,i} = \pm \frac{M}{I} \cdot \left(a_i + \frac{h_i}{2} \right) \quad (4)$$

Die Schubspannungen τ_{\max} in der neutralen Faser infolge einer Querkraft Q berechnen sich nach

$$\tau_{\max} = \frac{Q}{I \cdot b_2} (b_1 \cdot h_1 \cdot a_1 + b_2 \cdot 0,5 \cdot (0,5 \cdot h_2 - a_2)^2) \quad (5)$$

Mit den Gleichungen 1 bis 5 wurden die zulässigen Momente und Querkräfte unter der Annahme eines wirksamen Gurtplattenquerschnittes von 560 x 40 mm², eines wirksamen Stegquerschnittes von 280 x h_s mm² und eines Elastizitätsmoduls von 11000 N/mm² berechnet. Exemplarisch sind in Tabelle 1 und 2 für zwei Querschnittstypen die in der Zulassung angegebenen Werte zusammengestellt.

Tabelle 1: Zusammenstellung von Bemessungswerten

Typ	h_s mm	a_1 mm	a_2 mm	efl mm ⁴	zul M kNm	σ_{r1} N/mm ²	σ_{r2} N/mm ²	$efEI$ Nmm ²
110	40,0	13,33	26,67	1,64E+07	5,0¹ 3,6²	10,1 -7,3	-14,2 10,2	1,8·10¹¹
...
250	180,0	76,15	33,85	3,27E+08	34¹ 27²	10,0 -7,9	-14,1 10,2	3,6·10¹²

¹Gurtplatte in der Zugzone, ²Gurtplatte in der Druckzone

Tabelle 2: Zusammenstellung der zulässigen Querkräfte

Typ	h_s mm	a_1 mm	a_2 mm	efl mm ⁴	zul Q kN	τ_{\max} N/mm ²
110	40,0	13,33	26,67	1,64·10 ⁷	18	1,17
...
250	180,0	76,15	33,85	3,27·10 ⁸	51	1,20

Eine Gegenüberstellung der Größtwerte der Biegemomente aus den Biegeversuchen und den zulässigen Werten der Biegemomente ist in Bild 4 dargestellt. Dabei sind die Quotienten aus den Momenten beim Versagen und den zulässigen Momenten für jeden Einzelversuch aufgetragen. Gleichzeitig sind die Quotienten aus den vorgeschlagenen Rechenwerten der Biegesteifigkeit und den in den Versuchen ermittelten Biegesteifigkeiten eingetragen.

Der mittlere Quotient $\max M/\text{zul } M$ aus 20 Einzelversuchen beträgt 3,7 bei einem Kleinstwert von 2,7. Der mittlere Quotient aus den durch Versuche ermittelten und den berechneten Werten der Biegesteifigkeit betrug 1,03. Die zulässigen Belastungen weisen damit einen ausreichenden Sicherheitsabstand zu den durch die Versuche ermittelten Bruchwerten auf und gewährleisten zusammen mit den Steifig-

keitswerten eine ausreichende Zuverlässigkeit der LIGNOTREND-Deckentafeln bei einer Beanspruchung rechtwinklig zur Plattenebene.

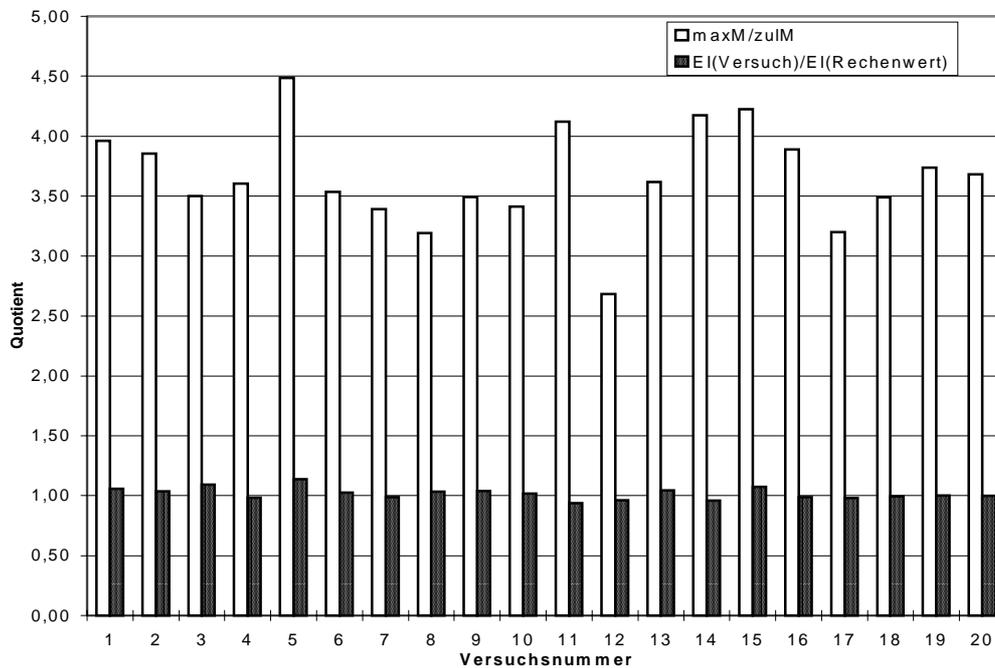


Bild 4: Quotienten $\max M/zul M$ und $EI(\text{Versuch})/EI(\text{Rechenwert})$.
 Versuch 1 bis 5: Typ 110
 Versuch 6 bis 10: Typ 190
 Versuch 11 bis 15: Typ 190 (Gurtplatte in Druckzone)
 Versuchs 16 bis 20: Typ 250

Deckenelemente mit beidseitigen Gurtplatten können als dreiteiliger Querschnitt ansonsten wie Decken mit einseitiger Gurtplatte berechnet werden. Sind die Gurtplatten aus Brettlagen mit unterschiedlichen Breiten aufgebaut (siehe Bild 2) sind die Deckenelemente als fünfteilige Querschnitte zu berechnen.

3 Elemente mit rechtwinklig verklebten Hölzern

3.1 Aufbau und Berechnung

Bei LIGNOTREND-Holzblockelementen nach Zulassung Z-9.1-283, die als Wand- oder Dachelemente eingesetzt werden, sind die beiden äußeren Lagen (Holztafeln oder einzelne Bretter) über eine Zwischenschicht aus rechtwinklig angeordneten Hölzern verbunden. Einige mögliche Aufbauten von LIGNOTREND Holzblockelementen sind in Bild 5 dargestellt.

Bei einer Beanspruchung rechtwinklig zur Plattenebene entstehen in den Querhölzern Schubbeanspruchungen, die rechtwinklig zur Faserrichtung wirken (Rollschub). Bedingt durch die geringe Schubsteifigkeit des Holzes bei dieser Beanspruchung treten in den Querhölzern nicht mehr zu vernachlässigende Verzerrungen auf, die

wie bei einem nachgiebig verbundenen Biegeträger berücksichtigt werden können. Die Verformungsfigur eines solchen Trägers ist schematisch in Bild 6 gezeigt.

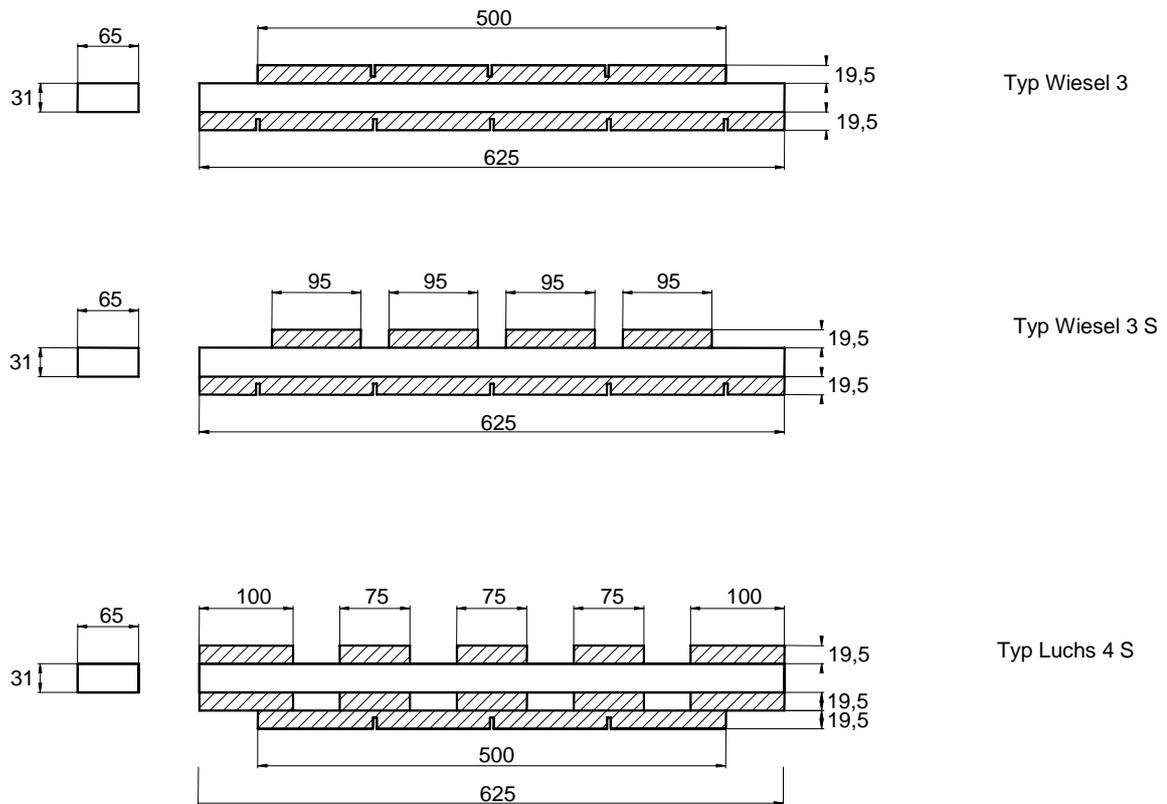


Bild 5: Form und Maße einiger LIGNOTREND Holzblockelemente

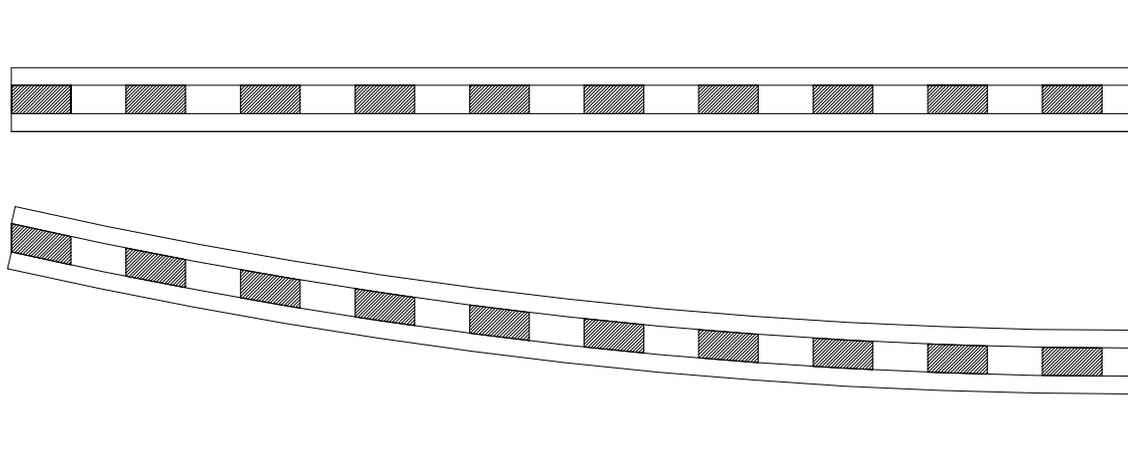


Bild 6 Biegeverformung eines Trägers mit zwei über schubweiche Zwischenhölzer verbundenen Gurten

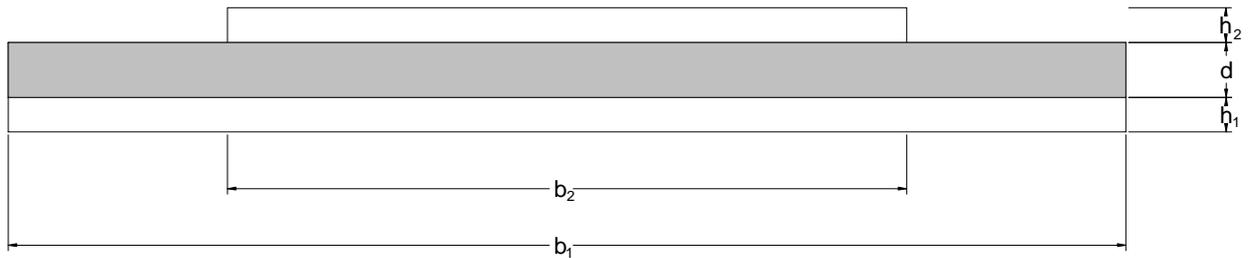


Bild 7 Idealisierter Aufbau (zweiteiliger Querschnitt mit Querholz)

Für einen zweiteiligen Querschnitt mit Querholz nach Bild 7 berechnet sich das wirksame Flächenmoment 2. Grades efI eines Elementes zu

$$efI = I_1 + I_2 + \gamma_1 a_1^2 A_1 + \gamma_2 a_2^2 A_2 \quad (6)$$

Hierin sind a_1 und a_2 die Abstände der Schwerachsen der Teilquerschnitte von der Spannungsnullebene, die

$$a_2 = \frac{\gamma_1 A_1 \cdot \left(\frac{h_1}{2} + d + \frac{h_2}{2}\right)}{\gamma_1 A_1 + \gamma_2 A_2} \quad (7)$$

$$a_1 = \left(\frac{h_1}{2} + d + \frac{h_2}{2}\right) - a_2 \quad (8)$$

betragen.

Die Abminderungsbeiwerte γ_i zur Berücksichtigung der Nachgiebigkeit infolge der Querhölzer berechnen sich zu:

$\gamma_1 = 1$ und

$$\gamma_2 = \left(1 + \frac{\pi^2 E_2 A_2}{\ell^2 C / s}\right)^{-1} \quad (9)$$

Darin bedeuten:

E_i = Elastizitätsmodul der einzelnen Querschnittsteile

A_i = Querschnittsflächen

C = Verschiebungsmodul, der sich aus der Schubverformung (Rollschub) der Querhölzer ergibt

s = Abstand der Querhölzer

ℓ = maßgebende Stützweite

Die Biegerandspannungen infolge eines äußeren Momentes M berechnen sich zu:

$$\sigma_{r,i} = \pm \frac{M}{efI} \cdot \left(\gamma_i a_i + \frac{h_i}{2}\right) \quad (10)$$

Die Schubspannungen τ_{\max} in der Spannungsnullebene infolge einer Querkraft Q berechnen sich nach

$$\tau_{\max} = \frac{Q \cdot \gamma_i S_i}{efl \cdot b} \quad (11)$$

Hierin ist b der kleinere Wert aus b_1 und b_2 .

Bestehen die Gurte aus mehreren miteinander verklebten Brettlagen mit unterschiedlichen Breiten, ist zunächst der Schwerpunkt S_i der Brettlagen des jeweiligen Gurtes zu ermitteln. Ersetzt man in den Gleichungen (7), (8) und (10) die Werte $h_i/2$ durch die Schwerpunktabstände x_i , erhält man efl nach Gleichung (6) und die Biege- bzw. Schubspannungen nach Gleichung (10) und (11).

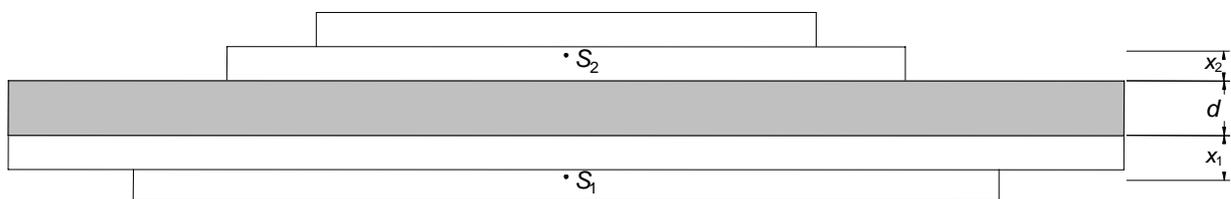


Bild 8 Idealisierter Aufbau (zweiteiliger Querschnitt mit Querholz)

3.2 Verschiebungsmodul C eines Querholzes

Aus Biegeversuchen (Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine 1998) wurde das Verformungsverhalten von LIGNOTREND Holzblockelementen untersucht. Dabei wurden die wirksamen Biegesteifigkeiten bei einer Stützweite von 1,25 m und 2,73 m an je 10 Elementen bestimmt. Bei einer Stützweite von 1,25 m ergab sich eine mittlere wirksame Biegesteifigkeit von $8,83 \cdot 10^{10}$ Nmm² und bei einer Stützweite von 2,73 m von $13,0 \cdot 10^{10}$ Nmm². Da die äußeren Brettlagen von LIGNOTREND Wandelementen aus Brettern mindestens der Sortierklasse S10/MS10 bestehen, ist ein höherer Elastizitätsmodul als bei den Deckenelementen zu erwarten, die vollständig aus Brettern der Sortierklasse S7/MS7 aufgebaut sind. Unter der Annahme eines Elastizitätsmoduls des verwendeten Fichtenholzes von 12000 N/mm² ergibt sich daraus ein wirksames Flächenmoment 2. Grades von $7,36 \cdot 10^6$ bzw. $10,8 \cdot 10^6$ mm⁴. Diese wirksamen Flächenmomente 2. Grades ergeben sich rechnerisch nach Gleichungen (6) bis (8), wenn für $\gamma_2 = 0,455$ bzw. $0,800$ angenommen werden. Die entsprechenden Werte sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

Tabelle 3: Berechnung von efl

Stützweite mm	h_1 mm	b_1 mm	d mm	h_2 Mm	b_2 mm	γ_1 -	γ_2 -	a_1 mm	a_2 mm	efl mm ⁴
1250	19,5	625	31	19,5	380	1	0,455	10,94	39,6	$7,36 \cdot 10^6$
2730	19,5	625	31	19,5	380	1	0,800	16,53	34,0	$1,08 \cdot 10^7$

Aus Gleichung (9) ergibt sich daraus für einen Achsabstand der Querhölzer von $s = 125$ mm der Verschiebungsmodul eines Querholzes mit $31 \times 65 \times 625$ mm³ zu $C = 58$

625 N/mm (kurze Stützweite) bzw. 58 875 N/mm (lange Stützweite). Mit dem Schubmodul G (Rollschub)

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \tag{12}$$

ergibt sich

$$G = \frac{C \cdot d}{65 \cdot b \cdot 1} = \frac{C \cdot 31}{65 \cdot 625 \cdot 1} \tag{13}$$

ein Schubmodul von etwa 45 N/mm².

Im Rahmen einer Vertiefungsarbeit am Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen (Gahl, 1999) wurden aus einem LIGNOTREND - Holzblockelement Zug-scherkörper mit einer Breite von 75 mm nach Bild 9 hergestellt und belastet. Aus den Last-Verformungsdiagrammen (Bild 10) ergab sich ein mittlerer Verschiebungsmodul (4 Querhölzer) von 32 000 N/mm. Hieraus berechnet sich der Schubmodul

$$G = \frac{32000 / 4 \cdot 31}{65 \cdot 75 \cdot 1} \tag{14}$$

zu etwa 51 N/mm².

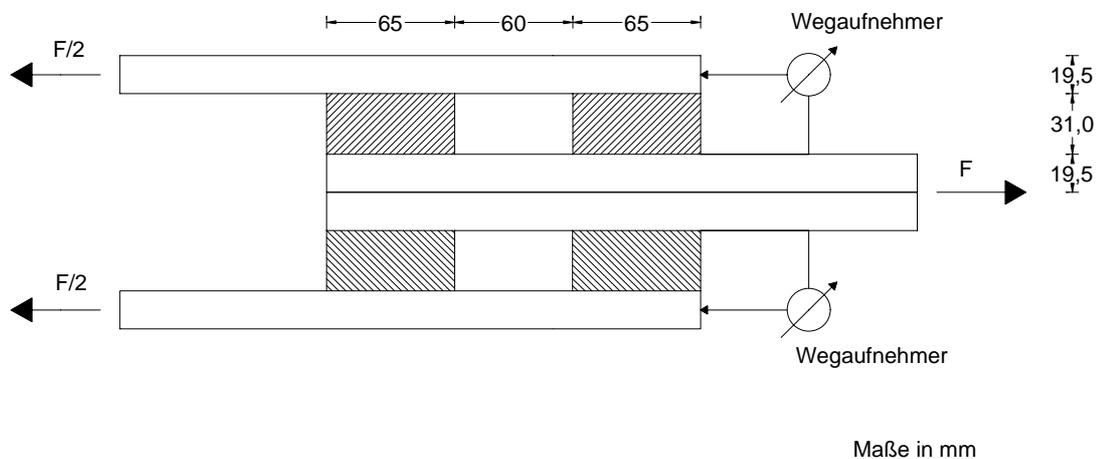


Bild 9: Zugsheerkörper zu Ermittlung des Trag- und Verformungsverhaltens der Querhölzer

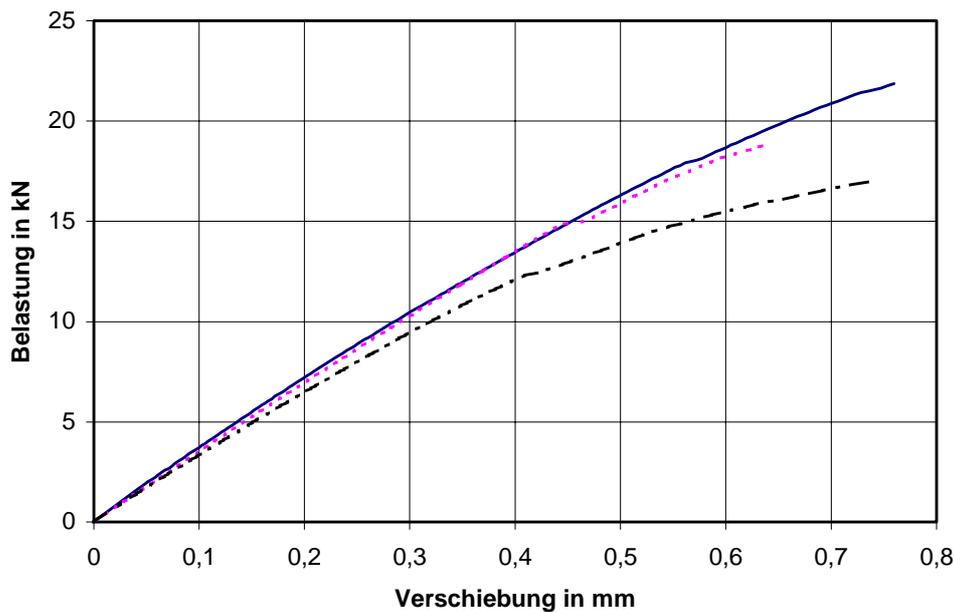


Bild 10: Last- Verformungsdiagramme von drei Zugscherkörpern

Für die Berücksichtigung der Nachgiebigkeit von Querhölzern, die auf Rollschub beansprucht werden, wird ein Rechenwert für den Schubmodul von 50 N/mm^2 vorgeschlagen.

Aus Gleichung (13) ergibt sich der Verschiebungsmodul zu

$$C = \frac{G \cdot \ell \cdot b}{d} \quad (15)$$

mit

ℓ = Länge des Querholzes (in Trägerlängsrichtung),

b = Breite des Querholzes (rechtwinklig zur Trägerlängsrichtung)

d = Dicke des Querholzes

G = Schubmodul (Rollschub)

Für eine durchgehende Zwischenschicht kann C/s in Gleichung (9) mit

$$\frac{C}{s} = \frac{G \cdot b}{d} \quad (16)$$

berechnet werden.

3.3 Schubfestigkeit (Rollschub) eines Querholzes

Bei Tragfähigkeitsversuchen (Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine 1998) mit LIGNOTREND- Holzblockelementen versagten bei einer Stützweite von 125 cm zehn geprüfte Elemente infolge eines Rollschubversagens der Querhölzer. Die mittlere

maximale Querkraft $max Q$ betrug 15,6 kN. Daraus folgt mit den Maßen der Elemente nach Tabelle 3

$$\tau_{\max} = \frac{Q_{Y_i} S_i}{efl \cdot b} = \frac{15600 \cdot 1 \cdot 19,5 \cdot 625 \cdot 10,94}{7,36 \cdot 10^6 \cdot 380} = 0,74 \text{ N/mm}^2 \quad (17)$$

Bei einem Achsabstand der Querhölzer von 125 mm und einer Breite der Querhölzer von 65 mm ergibt sich daraus eine mittlere Rollschubfestigkeit von 1,43 N/mm².

Als zulässige Schubspannung (Rollschub) wird 0,40 N/mm² vorgeschlagen. Dies entspricht etwa der in der Zulassung angegebenen zulässigen Querkraft von 7kN/m Elementbreite.

4 Neuere Entwicklungen

Zur Erlangung einer größeren Formstabilität wurden die LIGNOTREND-Deckenelemente durch Einfügen einer geschlossenen Querlage zwischen den Gurten und den Stegen weiterentwickelt. Zur Überprüfung des Rechenmodells und der getroffenen Annahmen wurden Versuche durchgeführt.

4.1 Elemente mit einer Querlage

Form und Abmessungen der untersuchten Elemente sind in Bild 11 dargestellt. Die Elemente besitzen über der aus zwei Lagen bestehenden unteren Gurtplatte eine durchgehende Querlage aus nebeneinanderliegenden Brettern.

Die Elemente wurden als Einfeldträger mit einer Stützweite von 2,4 m und einer Einzellast in Feldmitte geprüft. Dabei wurde die Belastung kontinuierlich bis zum Bruch, der nach ca. 5 min erreicht wurde, gesteigert. Die Durchbiegung wurde in Feldmitte mittels induktiver Wegaufnehmer gemessen.

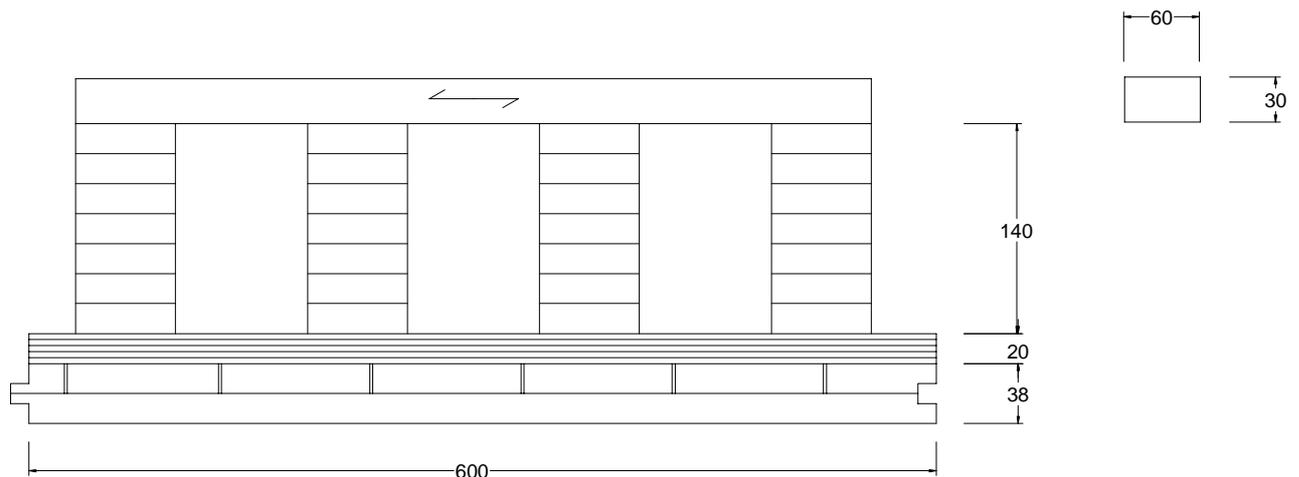


Bild 11: Form und Abmessungen eines Deckenelementes mit einer Querlage

Bei allen Elementen trat unter der Höchstlast ein Schubversagen (Rollschub) zwischen der Querlage und den Stegen auf (Bild 12).



Bild 12: Schubversagen zwischen der Querlage und den Stegen (Rollschub)

Die maximal aufnehmbaren Querkräfte Q und die aus den gemessenen Durchbiegungen in Feldmitte ermittelten wirksamen Biegesteifigkeiten $ef\ EI_{Versuch}$ sind in Tabelle 4 zusammengestellt.

Mit dem idealisierten Aufbau der Elemente nach Bild 7 wurde nach Gl. (6) und einem angenommenen Elastizitätsmodul von $11\,000\text{ N/mm}^2$ (analog der Deckentafeln mit faserparallel verklebten Hölzern) die wirksame Biegesteifigkeit $ef\ EI_{theorie}$ berechnet. Dabei wurde die gesamte Gurtfläche A_1 als mittragend angenommen. Der Abminderungswert γ_2 nach Gl. (9) wurde unter Berücksichtigung der durchgehenden Querlage nach Gl. (16) berechnet, wobei hier als mitwirkende Querlage die Breite der Verklebung mit den Stegen (b_2) angenommen wurde. Aus der maximalen Querkraft wurde die maximale Schubspannung in der Querlage berechnet. Diese Rechenergebnisse sind ebenfalls in Tabelle 4 angegeben.

Tabelle 4: Zusammenstellung der Versuchsergebnisse

	h_1 mm	b_1 mm	h_2 mm	b_2 mm	max Q kN	$ef\ EI_{Versuch}$ Nmm ²	$ef\ EI_{theorie}$ Nmm ²	τ_{max} N/mm ²
Q230-1	38	600	140	290	78,2	$1,843 \cdot 10^{12}$	$2,143 \cdot 10^{12}$	1,60
Q230-2	38	600	140	290	78,6	$1,727 \cdot 10^{12}$	$2,143 \cdot 10^{12}$	1,60
Q230-3	38	600	140	290	87,9	$1,925 \cdot 10^{12}$	$2,143 \cdot 10^{12}$	1,80

4.2 Elemente mit zwei Querlagen

Form und Abmessungen der untersuchten Elemente sind in Bild 13 dargestellt. Die Elemente besitzen über der aus zwei Lagen bestehenden unteren und oberen Gurtplatte je eine durchgehende Querlage aus nebeneinander liegenden Brettern.

Die Elemente wurden wie die Elemente mit einer Querlage geprüft.

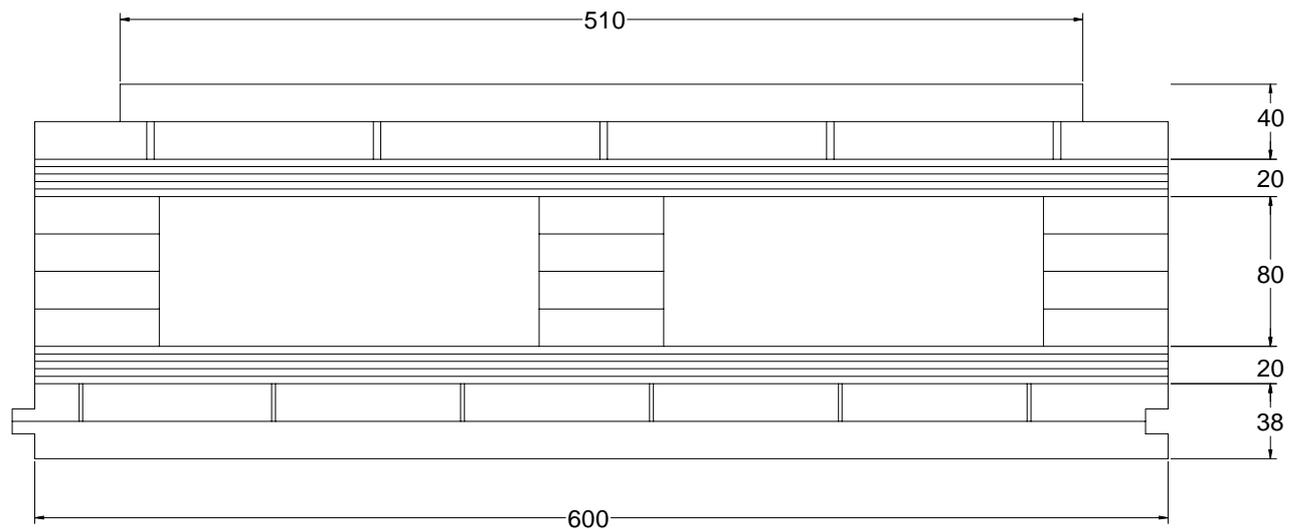


Bild 13 Form und Abmessungen eines Deckenelementes mit zwei Querlagen

Bei allen Elementen trat beim Erreichen der Höchstlast ein Schubversagen (Rollschub) zwischen der Querlage und den Stegen auf (Bild 14).



Bild 14: Schubversagen zwischen der Querlage und den Stegen (Rollschub)

Die maximal aufnehmbaren Querkräfte Q und die aus den gemessenen Durchbiegungen in Feldmitte ermittelten wirksamen Biegesteifigkeiten efE_{Versuch} sind in Tabelle 5 zusammengestellt.

Zur Berechnung der wirksamen Biegesteifigkeit und der im Element auftretenden Spannungen wird ein idealisierter dreiteiliger Querschnitt mit zwei Querlagen nach Bild 15 angenommen.

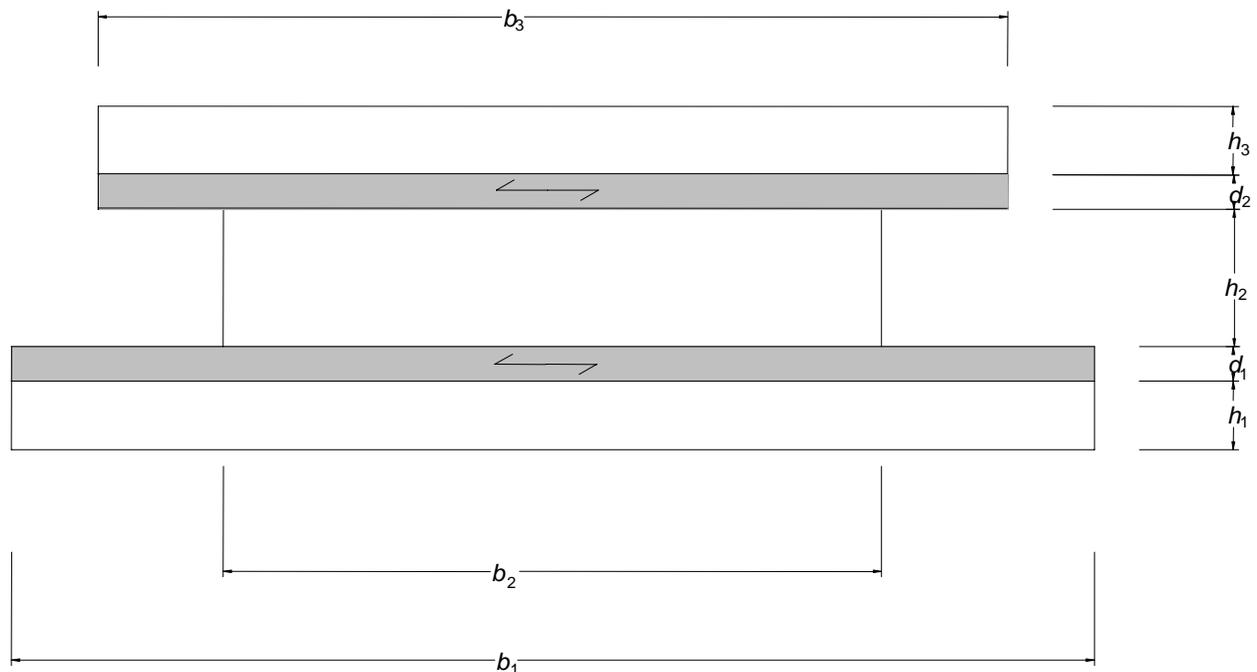


Bild 15 Idealisierter Aufbau (dreiteiliger Querschnitt mit zwei Querlagen)

Für einen dreiteiligen Querschnitt mit zwei Zwischenlagen nach Bild 15 berechnet sich das Flächenmoment 2. Grades efI eines Elementes zu

$$efI = I_1 + I_2 + I_3 + \gamma_1 a_1^2 A_1 + \gamma_2 a_2^2 A_2 + \gamma_3 a_3^2 A_3 \quad (18)$$

Hierin sind a_i die Abstände der Schwerachsen der Teilquerschnitte von der Spannungsnullebene, die

$$a_2 = \frac{\gamma_1 A_1 \cdot \left(\frac{h_1}{2} + d_1 + \frac{h_2}{2}\right) - \gamma_3 A_3 \cdot \left(\frac{h_2}{2} + d_2 + \frac{h_3}{2}\right)}{\gamma_1 A_1 + \gamma_2 A_2 + \gamma_3 A_3} \quad (19)$$

$$a_1 = \left(\frac{h_1}{2} + d_1 + \frac{h_2}{2}\right) - a_2 \quad (20)$$

$$a_3 = \left(\frac{h_2}{2} + d_2 + \frac{h_3}{2}\right) + a_2 \quad (21)$$

betragen.

Die Abminderungsbeiwerte γ_i zur Berücksichtigung der Nachgiebigkeit infolge der Zwischenhölzer berechnen sich zu:

$$\gamma_1 = \left(1 + \frac{\pi^2 E_1 A_1 \cdot d_1}{\ell^2 G \cdot b_{1,w}} \right)^{-1} \quad (22)$$

$$\gamma_2 = 1$$

$$\gamma_3 = \left(1 + \frac{\pi^2 E_3 A_3 \cdot d_2}{\ell^2 G \cdot b_{3,w}} \right)^{-1} \quad (23)$$

Darin bedeuten:

E_i = Elastizitätsmodul der einzelnen Querschnittsteile

A_i = Querschnittsflächen

G = Schubmodul (Rollschub)

d_i = Dicke der Querlagen

$b_{i,w}$ wirksame Breite der Querlagen

ℓ = maßgebende Stützweite

Die Biegegrandspannungen infolge eines äußeren Momentes M berechnen sich zu:

$$\sigma_{r,i} = \pm \frac{M}{efI} \cdot \left(\gamma_i a_i + \frac{h_i}{2} \right) \quad (24)$$

Die Schubspannungen τ_{\max} in der neutralen Faser infolge einer Querkraft Q berechnen sich zu

$$\tau_{\max} = \frac{Q \gamma_i S_i}{efI \cdot b} \quad (25)$$

Hierin ist b der kleinere Wert aus b_1 und b_2 .

Mit dem idealisierten Aufbau der Elemente nach Bild 15 wurde nach Gl. (18) und einem angenommenen Elastizitätsmodul von 11 000 N/mm² die wirksame Biegesteifigkeit $ef E I_{\text{theorie}}$ berechnet. Dabei wurde für die wirksame Breite der Querlage $b_{i,w}$ in Gl. (22) und (23) jeweils die Breite der Klebefuge zwischen Steg und Querlage (b_2) in Ansatz gebracht. Aus der maximalen Querkraft wurde die maximale Schubspannung in der Querlage berechnet. Diese Ergebnisse sind ebenfalls in Tabelle 5 zusammengestellt.

Tabelle 5: Zusammenstellung der Versuchsergebnisse

	h_1 mm	b_1 mm	h_2 mm	b_2 mm	h_3 mm	b_3 mm	max Q kN	$ef E I_{\text{versuch}}$ Nmm ²	$ef E I_{\text{theorie}}$ Nmm ²	τ_{\max} N/mm ²
B200-1	38	600	80	215	40	550	73,2	$1,867 \cdot 10^{12}$	$1,907 \cdot 10^{12}$	1,96
B200-2	38	600	80	215	40	550	78,6	$1,926 \cdot 10^{12}$	$1,907 \cdot 10^{12}$	2,11
B200-3	38	600	80	215	40	550	75,4	$1,942 \cdot 10^{12}$	$1,907 \cdot 10^{12}$	2,02

5 Wirksame Breite der Querlagen und Gurte

Die bisherigen Auswertungen wurden unter der Annahme durchgeführt, dass bei den untersuchten Elementen bei der Berechnung der Nachgiebigkeit der Querlage (γ_f - Werte) die Breite der Klebefuge (=Stegbreite) als wirksame Breite anzusetzen ist. Für die Gurte wurde die Gesamtbreite als wirksame Breite angesetzt.

Zur Überprüfung dieser Annahmen wurden Versuche an Elementen nach Bild 16 untersucht. Dazu wurden die Elemente, die ca. 3 m lang sind, zunächst in zwei ca. 1,5 m lange Teilelemente geschnitten. Eine Hälfte wurde in zwei bzw. drei 11 cm breite Streifen aufgetrennt (siehe Bild 16). Die Teilelemente und die Streifen wurden bei einer Stützweite von 1,2 m mit einer Einzellast in Feldmitte geprüft.

Die Elementstreifen versagten in einigen Fällen durch Erreichen der Biegefestigkeit des Holzes in der Gurtplatte, die in der Zugzone angeordnet war. In den meisten Fällen versagten die Elementstreifen wie auch alle Teilelemente durch einen Schubbruch in der Querlage (Bild 17).

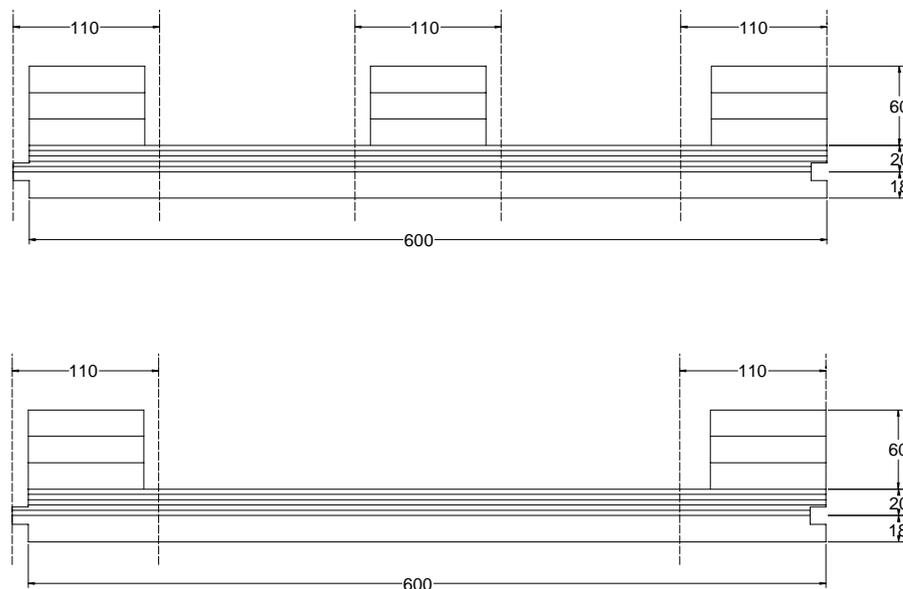


Bild 16 Form und Abmessungen der geprüften Elemente R3(oben) und R2 (unten)



Bild 17: Schubversagen zwischen der Querlage und dem Steg (Rollschub)

Tabelle 6: Zusammenstellung der Versuchsergebnisse

	b_1 mm	b_2 mm	max Q kN	$ef E I_{\text{versuch}}$ Nmm ²	$ef E I_{\text{theorie}}$ Nmm ²	τ_{max} N/mm ²	σ_{max} N/mm ²
R2-1	600	175	23,8	$1,290 \cdot 10^{11}$	$1,442 \cdot 10^{11}$	1,70	
Steg 1	98	85	9,39	$4,387 \cdot 10^{10}$	$5,161 \cdot 10^{10}$	1,24	
Steg 2	110	105	12,74	$6,336 \cdot 10^{10}$	$6,164 \cdot 10^{10}$	1,34	
R2-2	600	175	20,8	$1,244 \cdot 10^{11}$	$1,442 \cdot 10^{11}$	1,49	
Steg 1	110	105	9,17	$5,589 \cdot 10^{10}$	$6,164 \cdot 10^{10}$		39,6
Steg 2	98	85	8,56	$4,630 \cdot 10^{10}$	$5,161 \cdot 10^{10}$	1,13	
R2-3	600	200	25,0	$1,496 \cdot 10^{11}$	$1,601 \cdot 10^{11}$	1,55	
Steg 1	98	95	12,12	$5,212 \cdot 10^{10}$	$5,546 \cdot 10^{10}$	1,41	
Steg 2	110	105	11,05	$5,976 \cdot 10^{10}$	$6,164 \cdot 10^{10}$	1,16	
R3-1	600	250	35,6	$1,910 \cdot 10^{11}$	$1,895 \cdot 10^{11}$	1,74	
Steg 1	110	105	13,96	$6,382 \cdot 10^{10}$	$6,164 \cdot 10^{10}$	1,47	
Steg 2	110	75	12,19	$5,431 \cdot 10^{10}$	$4,935 \cdot 10^{10}$	1,89	
Steg 3	98	85	11,41	$4,858 \cdot 10^{10}$	$5,161 \cdot 10^{11}$	1,51	
R3-2	600	250	31,8	$1,726 \cdot 10^{11}$	$1,895 \cdot 10^{11}$	1,56	
Steg 1	110	105	8,45	$5,756 \cdot 10^{10}$	$6,164 \cdot 10^{10}$		36,5
Steg 2	110	75	8,31	$4,722 \cdot 10^{10}$	$4,935 \cdot 10^{10}$	1,29	
Steg 3	98	85	10,61	$4,930 \cdot 10^{10}$	$5,161 \cdot 10^{11}$	1,40	
R3-3	600	270	39,9	$2,022 \cdot 10^{11}$	$2,006 \cdot 10^{11}$	1,80	
Steg 1	110	110	8,05	$5,558 \cdot 10^{10}$	$5,895 \cdot 10^{10}$		35,4
Steg 2	110	75	11,91	$5,255 \cdot 10^{10}$	$4,935 \cdot 10^{10}$	1,85	
Steg 3	98	85	8,13	$4,856 \cdot 10^{10}$	$5,161 \cdot 10^{11}$	1,08	

In Tabelle 6 sind die Versuchsergebnisse und die Ergebnisse der Berechnung zusammengestellt. Es zeigt sich, dass durch die getroffenen Annahmen über die wirkenden Breiten der Querlagen und Gurte die Versuchsergebnisse gut erfasst werden.

In Bild 18 und 19 sind alle Ergebnisse der Versuche mit Elementen mit Querlagen dargestellt. Bild 18 zeigt den Quotient der Biegesteifigkeiten aus den Versuchen und den theoretischen Berechnungen. Es zeigt sich, dass mit den getroffenen Annahmen (Elastizitätsmodul, Rollschubmodul, mitwirkende Breiten) die Versuchsergebnisse gut erfasst werden.

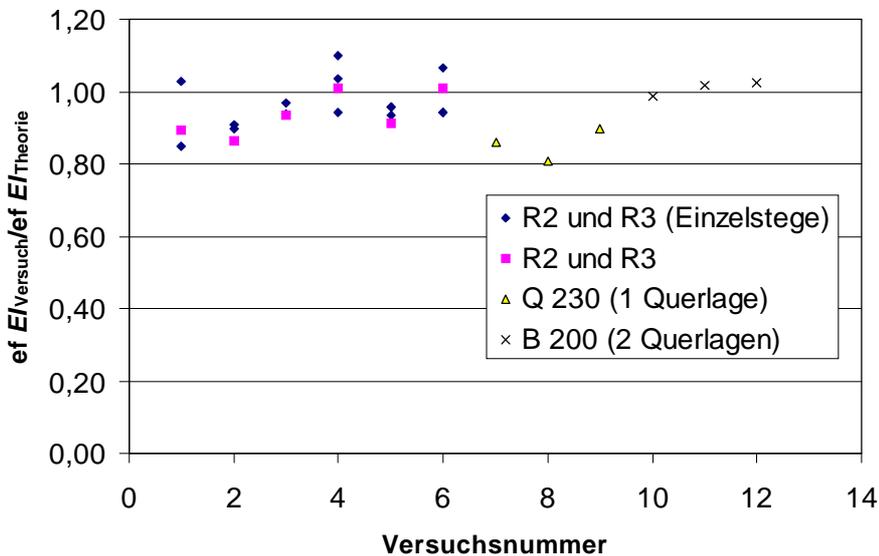


Bild 18: Quotient aus $ef EI_{\text{Versuch}} / ef EI_{\text{Theorie}}$

Bild 19 zeigt die Rollschubfestigkeit der einzelnen Versuchsreihen. Der Mittelwert beträgt 1,57 N/mm² bei einem Kleinstwert von 1,08 N/mm². Die getroffene Annahme der zulässigen Rollschubspannung von 0,4 N/mm² ist damit konservativ abgeschätzt, sollte jedoch, bis eine größere Anzahl von Versuchen zur Ermittlung der Rollschubfestigkeit vorliegt, nicht höher in Ansatz gebracht werden.

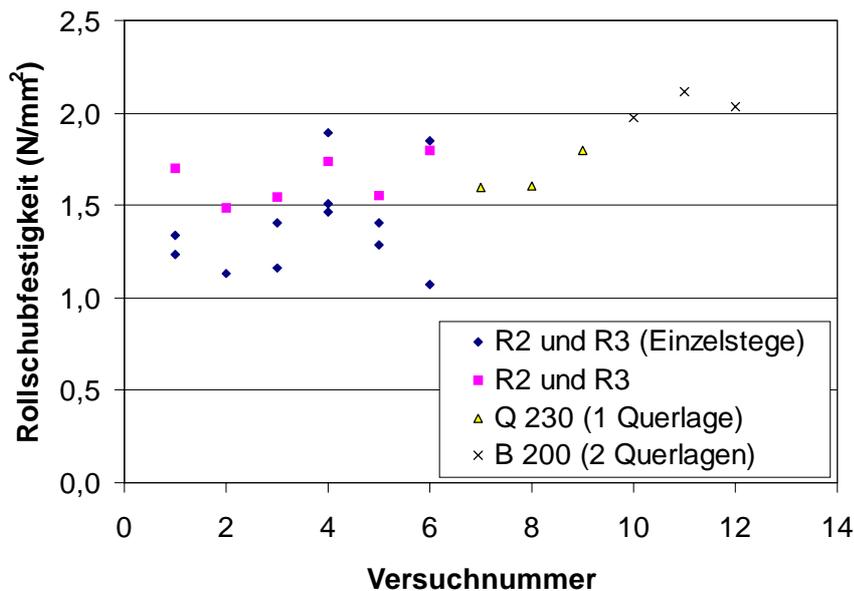


Bild 19: Rollschubfestigkeit der einzelnen Versuche

6 Zusammenfassung

Elemente mit faserparallel verklebten Hölzern können als Verbundquerschnitt nach Gl. (1) berechnet werden. Dabei kann ein Elastizitätsmodul von $11\,000\text{ N/mm}^2$ angenommen werden. Bedingt durch die Vergütung und Homogenisierung des Ausgangsmaterials kann als zulässige Biegerandspannung auf der Zugseite 10 N/mm^2 angesetzt werden, obwohl Bretter der Sortierklasse S7/MS7 verwendet werden.

Elemente mit rechtwinklig verklebten Hölzern können als nachgiebig verbundener Querschnitt nach Gl. (18) berechnet werden. Dabei ist ein Rechenwert des Schubmoduls von 50 N/mm^2 zur Berücksichtigung der Nachgiebigkeit zu verwenden. Der Elastizitätsmodul wird mit $11\,000\text{ N/mm}^2$ angenommen.

Als wirksame Breite bei der Berechnung der Nachgiebigkeit ist die Breite der Klebefuge (=Stegbreite) anzusetzen, während für die Gurte die Gesamtbreite als wirksame Breite angesetzt werden kann. Diese Annahmen wurden durch Versuche bestätigt, bei denen der lichte Abstand der nebeneinander liegenden Stege maximal 40 cm beträgt.

Als zulässige Schubspannung (Rollschub) wird $0,4\text{ N/mm}^2$ vorgeschlagen.

7 Literatur

Ermittlung der Tragfähigkeit von LIGNOTREND-Holzblockelementen. Prüfbericht Nr. 986127. Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Universität Karlsruhe.

Ermittlung der Tragfähigkeit von LIGNOTREND-Deckentafeln. Prüfbericht Nr. 986108. Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Universität Karlsruhe.

Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-9.1-283, LIGNOTREND-Holzblockelemente

Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-9.1-409, LIGNOTREND-Deckenelemente

R. Gahl (1999) Berechnung geklebter Wandtafeln. Vertieferarbeit am Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen, Universität Karlsruhe (unveröffentlicht)