



Zum Trag- und Verformungsverhalten von LIGNOTREND Elementen bei Beanspruchung in Plattenebene

H.J. Blaß und R. Görlacher

1 Allgemeines

Die Firma LIGNOTREND AG stellt Decken- und Wandelemente aus faserparallel und rechtwinklig zueinander verklebten Brettern mit nahezu beliebigen Aufbauten her. Für einige dieser Elemente wurden allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen (Zulassungen Nr. Z-9.1-409 und Z-9.1-283) erteilt, da das Trag- und Verformungsverhalten dieser Elemente rechnerisch nicht eindeutig nachweisbar war.

In der Zwischenzeit liegen jedoch neuere Kenntnisse über das Trag- und Verformungsverhalten dieser Elemente vor, so dass ein Nachweis über eine Berechnung und Bemessung möglich ist [1]. Auch durch die Bestimmungen in der z.Zt. im Entwurf vorliegenden E DIN 1052 wird es künftig möglich sein, Elemente, bei denen Bretter rechtwinklig zueinander verklebt sind und bei denen somit in den Brettern sogenannte Rollschubspannungen auftreten, zuverlässig zu bemessen.

Während die bisher vorliegende Veröffentlichung die Berechnung dieser Elemente bei Beanspruchung rechtwinklig zur Plattenebene (Biegung und Querkraft) behandelt, ist es Ziel dieser Veröffentlichung, Berechnungsansätze zur Ermittlung des Trag- und Verformungsverhalten von in Plattenebene beanspruchten Elementen aufzuzeigen. Diese Rechenansätze werden mit Ergebnisse von neueren experimentellen Untersuchungen verglichen.

2 Druckbeanspruchung in Plattenebene (Knicken)

Bei Druckbeanspruchungen in Plattenebene neigen Wandelemente dazu, seitlich auszuweichen (Biegeknicken). Maßgeblich wird dieses Versagen durch die wirksame Biegesteifigkeit der Wandelemente rechtwinklig zur Plattenebene beeinflusst, die unter Berücksichtigung des Rollschubs berechnet werden kann [1]. Der eigentliche Knicknachweis kann dann nach E DIN 1052 geführt werden.

Da bei der Konstruktion mit LIGNOTREND Wandelementen einige Besonderheiten auftreten, soll dieser Nachweis hier ausführlich behandelt werden.

LIGNOTREND Wandelemente sind unten auf einer Schwelle aufgelagert und werden an der Oberkante durch ein Rähm abgeschlossen. Dadurch entsteht ein Druckstab mit veränderlicher, bereichsweise konstanter Biegesteifigkeit. Um den Nachweis nach dem Ersatzstabverfahren durchführen zu können, muss somit zunächst eine Ersatzstablänge ermittelt werden. Dies kann z.B. nach [2] erfolgen, indem zunächst die halbe Wandhöhe betrachtet wird:

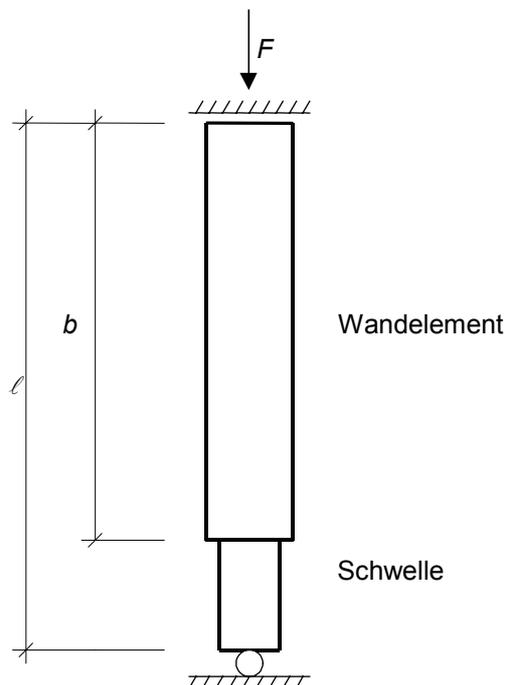


Bild 1: Ersatzsystem (halbe Wandhöhe) für LIGNOTREND Wandelement mit Schwelle

Der schematisierte Knicknachweis ist in Tabelle 1 zusammengestellt. Dabei sind folgende Annahmen zu beachten:

- Berechnung der wirksamen Biegesteifigkeit des Elements unter Berücksichtigung der Rollschubverformungen ($G_R = 50 \text{ N/mm}^2$), siehe [1].
- Berechnung der Querschnittsfläche des Elements ($A_{Element}$), jedoch ohne Querlagen
- Beiwert β_c zur Berücksichtigung ungewollter Vorverformungen wie für Brettschichtholz ($\beta_c = 0,1$)
- Festigkeitskennwerte bzw. ihre Bemessungswerte nach E DIN 1052 für Sortierklasse S10.

Tabelle 1: Schematisierter Knicknachweis

Element	Schwelle
$(EI)_{ef, \text{Element}}$ A_{Element}	$(EI)_{ef, \text{Schwelle}}$ A_{Schwelle}
$\sqrt[3]{\frac{\min(EI)_{ef}}{\max(EI)_{ef}}}$	
$b/l = \text{Elementhöhe/Wandhöhe}$	
β aus Nomogramm Tafel 5.61 V (Petersen, 1982)	
$F_{ki} = \frac{1}{\beta^2} \pi^2 \frac{2}{3} \frac{\min(EI)_{ef}}{l^2}$	
$\sigma_{c,crit} = \frac{F_{ki}}{A_{\text{Element}}}$	$\sigma_{c,crit} = \frac{F_{ki}}{A_{\text{Schwelle}}}$
$\lambda_{rel,c} = \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{\sigma_{c,crit}}}$	$\lambda_{rel,c} = \sqrt{\frac{f_{c,90,k}}{\sigma_{c,crit}}}$
$k = 0,5 \cdot [1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,c} - 0,3) + \lambda_{rel,c}^2]$	$k = 0,5 \cdot [1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,c} - 0,3) + \lambda_{rel,c}^2]$
$k_c = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel,c}^2}} \leq 1$	$k_c = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel,c}^2}} \leq 1$
$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c \cdot f_{c,0,d}} \leq 1$ mit $\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{A_{\text{Element}}}$	$\frac{\sigma_{c,90,d}}{k_c \cdot f_{c,90,d}} \leq 1$ mit $\sigma_{c,90,d} = \frac{N_d}{A_{\text{Schwelle}}}$

Anhand einer Wand aus LIGNOTREND-Elementen Lux 4S/n mit Schwelle und Rähm wird die Nachweisführung für eine vertikale Beanspruchung in Plattenebene dargestellt.

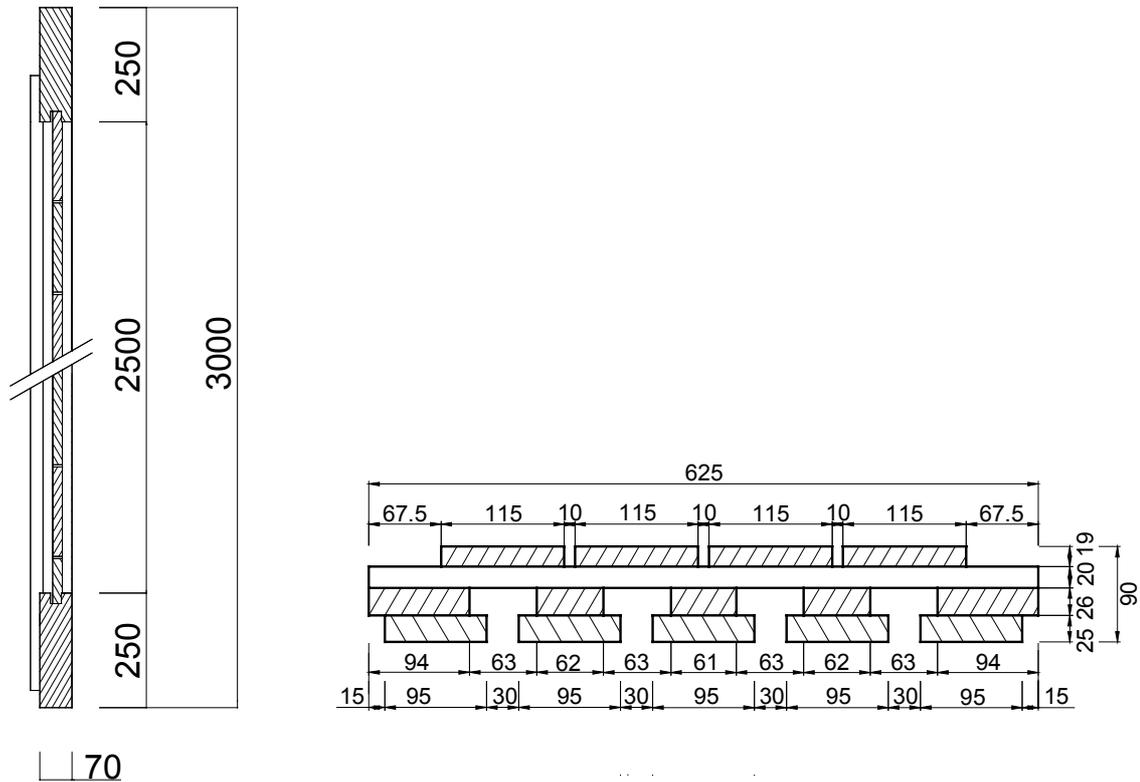


Bild 2: Wandelement mit Schwelle und Rähm

- Wandhöhe 3000 mm
- Schwellenhöhe 250 mm
- Schwellendicke 70 mm
- Elementhöhe 3000 - 500 = 2500 mm
- Elementbreite 625 mm
- $\beta_c=0,1$ (wie Brettschichtholz)
- $E_0=11000 \text{ N/mm}^2$
- $E_{90}=300 \text{ N/mm}^2$
- $\gamma_M=1,3$ und $k_{mod}=0,8$

Tabelle 2: Knicknachweis für Lux 4S/n mit Elementbreite 625 mm

Element	Schwelle
$(E_0I)_{ef} = 2,50 \cdot 10^{11} \text{ Nmm}^2$ $A_{\text{Element}} = 30340 \text{ mm}^2$	$(E_{90}I)_{ef} = 5,36 \cdot 10^9 \text{ Nmm}^2$ $A_{\text{Schwelle}} = 43750 \text{ mm}^2$
$\sqrt[3]{\frac{\min(EI)_{ef}}{\max(EI)_{ef}}} = 0,278$	
$b/l = \text{Elementhöhe/Wandhöhe} = 0,83$	
$\beta = 0,4$	
$F_{ki} = \frac{1}{0,4^2} \pi^2 \frac{\frac{2}{3} \cdot 5,36 \cdot 10^9}{1500^2} = 98\,000 \text{ N}$	
$\sigma_{c,crit} = \frac{98000}{30340} = 3,23 \text{ N/mm}^2$	$\sigma_{c,crit} = \frac{98000}{43750} = 2,24 \text{ N/mm}^2$
$\lambda_{rel,c} = \sqrt{\frac{21}{3,23}} = 2,55$	$\lambda_{rel,c} = \sqrt{\frac{2,5}{2,24}} = 1,056$
$k = 0,5 \cdot [1 + 0,1 \cdot (2,55 - 0,3) + 2,55^2]$ $= 3,864$	$k = 0,5 \cdot [1 + 0,1 \cdot (1,056 - 0,3) + 1,056^2]$ $= 1,095$
$k_c = \frac{1}{3,864 + \sqrt{3,864^2 - 2,55^2}} = 0,148$	$k_c = \frac{1}{1,095 + \sqrt{1,095^2 - 1,056^2}} = 0,722$
$N_d = A_{\text{Element}} \cdot k_c \cdot f_{c,0,d} =$ $30340 \cdot 0,148 \cdot \frac{21 \cdot 0,8}{1,3} =$ 58000 N	$N_d = A_{\text{Schwelle}} \cdot k_c \cdot f_{c,90,d} =$ $43750 \cdot 0,722 \cdot \frac{2,5 \cdot 0,8}{1,3} =$ 48600 N

Neben dem Knicknachweis sind noch die Druckspannungen rechtwinklig zur Faserrichtung, die durch die Lasteinleitung in die Schwelle entstehen, nachzuweisen.

Lasteinleitungsfläche: $A = 20\,840 \text{ mm}^2$

$$N_d = A \cdot f_{c,90,d} = 20840 \cdot \frac{2,5 \cdot 0,8}{1,3} = 32100 \text{ N.} \quad (1)$$

Maßgebend sind somit die Querdruckspannungen durch die Lasteinleitung.

Da die Kräfte von der Schwelle in das Wandelement nicht mittig eingeleitet werden, entsteht im Wandelement ein zusätzliches Biegemoment infolge der Ausmitte. Die daraus entstehenden zusätzlichen Biegespannungen in der Wand sind jedoch gering und werden vernachlässigt.

3 Schubbeanspruchung in Plattenebene (Aussteifung)

Neben der Abtragung von Vertikallasten können Wand- und Deckenelemente auch zur Aussteifung von Gebäuden herangezogen werden. Dabei werden Dach- und Deckenscheiben in der Regel durch eine Gleichstreckenlast (z.B. aus Windeinwirkung), Wandscheiben durch horizontale Lasten in Höhe der Oberkante beansprucht. In beiden Fällen werden die Lasten im wesentlichen über Schubbeanspruchung der Elemente in die Auflager weitergeleitet. Während für Scheiben aus Holzwerkstoffplatten mit Rippen bzw. Unterkonstruktionen in E DIN 1052 Bemessungsverfahren angegeben sind, fehlen für LIGNOTREND Elemente allgemeine Bemessungsregeln. Lediglich für einzelne, genau definierte Elementaufbauten sind in den allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen zulässige Horizontallasten für Wandscheiben, die direkt aus Versuchen abgeleitet wurden, angegeben.

Bei Schubbeanspruchungen von LIGNOTREND Elementen bei Beanspruchung in Plattenebene sind zwei Fälle zu unterscheiden, die sich auf die Tragwirkung und somit auch auf die Bemessung auswirken:

- es ist mindestens eine Brettlage vorhanden, bei der die nebeneinanderliegenden Bretter miteinander verklebt sind ("vollständige" Scheibe). In diesem Fall können zwischen den Brettern Schubkräfte übertragen werden und es entstehen innerhalb dieser Lage bei einer Schubverzerrung aufeinander senkrecht stehende Schubspannungen.
- eine Brettlage besteht aus nebeneinanderliegenden, nicht miteinander verklebten Brettern, die wiederum auf rechtwinklig dazu verlaufenden Brettern aufgeklebt sind ("aufgelöste" Schiebe). In diesem Fall werden die Schubkräfte zwischen den Brettern über Torsionsbeanspruchungen der verklebten Kreuzungsflächen übertragen.

Für beide Fälle wird im Folgenden ein Nachweisverfahren vorgestellt.

3.1 LIGNOTREND Elemente mit mindestens einer vollständigen Scheibe

3.1.1 Allgemeines

Ein LIGNOTREND Element mit mindestens einer vollständigen Scheibe weist eine Quer- oder eine Längslage aus nebeneinanderliegenden Brettern auf, die so miteinander verklebt sind, dass zwischen diesen Brettern Schubkräfte übertragen werden können. Eine Übertragung von Schubkräften zwischen zwei nebeneinanderliegenden Brettern kann auch erreicht werden, wenn die Fuge zwischen den beiden Brettern auf der gesamten Länge durch ein weiteres aufgeklebtes Brett abgedeckt wird. Dabei muss die Breite der Klebeflächen mindestens so groß wie die Brettstärke sein (siehe Bild 3).

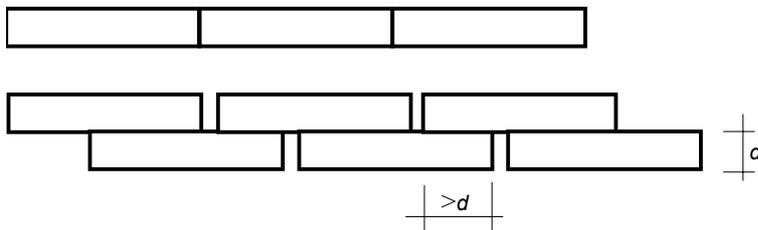


Bild 3: vollständige Scheiben aus nebeneinanderliegenden verklebten Brettern (oben) bzw. aus versetzt angeordneten Brettern (unten)

In beiden Fällen werden die Annahmen der technischen Biegelehre zugrunde gelegt, und die Schubspannung in der durchgängigen Brettlage berechnet sich zu

$$\tau = \frac{V \cdot S}{I \cdot d} \quad (2)$$

mit

V = Querkraft

I = Flächenmoment zweiten Grades

S = Flächenmoment ersten Grades

d = Dicke einer Brettlage

Bei der Berechnung der Verformung sind die Schubverzerrungen infolge der Querkraft in der Platte zu berücksichtigen. Dies kann nach der technischen Biegelehre erfolgen. Für einen Einfeldträger mit zwei Einzellasten F in den Drittelpunkten ergibt sich z.B. :

$$f_{\text{ges}} = f_{\text{M}} + f_{\text{V}} = \frac{23F\ell^3}{648EI} + \kappa_{\text{V}} \frac{F\ell}{3GA} \quad (3)$$

3.1.2 Prüfung und Berechnung

Im Rahmen einer Prüfung von LIGNOTREND Deckentafeln wurden Versuche mit Deckentafeln des Typs 190 (siehe Bild 4) durchgeführt. Die Elemente wurden als Einfeldträger mit einer Stützweite von 5,40 m gelagert und durch zwei Einzellasten in den Drittelpunkten in Plattenebene belastet. Neben der aufnehmbaren Querkraft $\max V$ wurde die Durchbiegung in Feldmitte f_{Versuch} gemessen.

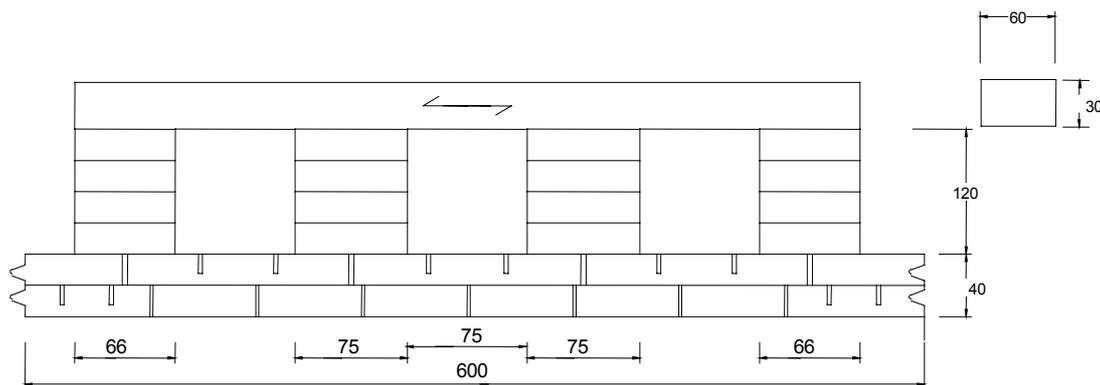


Bild 4: Form und Abmessungen eines Deckenelements Typ 190

Die Versuchsergebnisse sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

Bei der Berechnung der Durchbiegung von LIGNOTREND Deckentafeln sind Schubverformungen infolge Querkraft in der Regel zu berücksichtigen. Dabei wird näherungsweise davon ausgegangen, dass für die Übertragung der Schubkräfte und damit für den Widerstand gegen Schubverformungen nur die Platte mit einer Fläche von $600 \times 40 \text{ mm}^2$ vorhanden ist.

Bei der Ermittlung der Schubspannungen wird lediglich eine Plattendicke von $d = 20 \text{ mm}$ berücksichtigt, da zwischen den nebeneinander liegenden Brettern einer Lage ein Spalt auftritt bzw. Entlastungsnuten vorhanden sind.

Daraus ergeben sich folgende Werte und Annahmen:

$$I = 1,61 \cdot 10^9 \text{ mm}^4,$$

$$S = 4,23 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

$$A = 24\,000 \text{ mm}^2,$$

$$E = 11\,000 \text{ N/mm}^2,$$

$$G = 500 \text{ N/mm}^2$$

$$\kappa_V = 1,2$$

In Tabelle 3 sind die Ergebnisse der Versuche und der Berechnung zusammengestellt. Im Einzelnen ist angegeben:

$\max V$ Aufnehmbare Querkraft der Elemente (Schubversagen)

f_{Versuch}/F aus Versuch bei Durchbiegungsmessung in Feldmitte

τ_{\max} aus $\max V$ nach Gl. 2 berechnete maximale Schubspannung

f_M/F berechnet nach Gl. (3) (aus Moment)

f_V/F berechnet nach Gl. (3) (aus Querkraft)

f_{ges}/F berechnet nach Gl. (3)

Tabelle 3: Zusammenstellung der Versuchsergebnisse und der Berechnung

Versuchsergebnisse		Berechnung			
$\max V$	f_{Versuch}/F	τ_{\max}	f_M/F	f_V/F	f_{ges}/F
kN	mm/kN	N/mm ²	mm/kN	mm/kN	mm/kN
37,4	0,561	4,91	0,316	0,180	0,496
33,7	0,528	4,43	0,316	0,180	0,496
41,8	0,518	5,49	0,316	0,180	0,496

Die erreichten Schubfestigkeiten liegen deutlich über einem charakteristischen Wert der Schubfestigkeit von 2,5 N/mm², der für Vollholz der Sortierklasse S10 angenommen werden kann. Dies resultiert unter anderem aus der Rissefreiheit der schubbeanspruchten Brettlage. Wegen der geringen Anzahl von Versuchen wird jedoch vorgeschlagen, bei der Bemessung derartiger Elemente die charakteristische Schubfestigkeit von 2,5 N/mm² zugrunde zu legen.

Das vorgeschlagene Rechenverfahren zur Ermittlung der Durchbiegungen in Plattenebene unter Berücksichtigung des Schubeinflusses führt zu einer realistischen Einschätzung des Verformungsverhaltens.

3.2 LIGNOTREND Elemente mit aufgelöster Scheibe

3.2.1 Allgemeines

LIGNOTREND Elemente können auch aus einzelnen, nebeneinander liegenden und nicht verklebten Brettern bestehen, auf die rechtwinklig dazu eine weitere Lage aus ebenfalls nicht miteinander verklebten einzelnen Brettern aufgebracht ist. In diesem Fall können nur dann Schubkräfte im Element übertragen werden, wenn die Kreuzungsflächen zweier Bretter torsionssteif miteinander verbunden sind. Dadurch können an diesen Stellen Torsionsmomente übertragen werden, und es entsteht eine schubsteife Scheibenwirkung. In den Kreuzungsflächen entstehen Torsionsschubspannungen, die zumindest teilweise rechtwinklig zur Faserrichtung des Holzes wirken und somit sog. Rollschubspannungen darstellen.

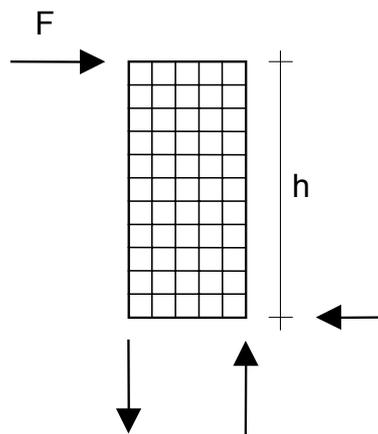


Bild 5: Beanspruchung eines Elements in Scheibenebene (System)

Näherungsweise wird davon ausgegangen, dass das äußere auf die Wand wirkende Moment (Bild 5) sich gleichmäßig auf alle einzelnen Kreuzungsflächen aufteilt. Daraus ergibt sich folgende Gleichgewichtsbedingung:

$$M_T^i = F \cdot h \cdot \frac{I_p^i}{\sum I_p} \quad (4)$$

mit

F = äußere Belastung eines Wandelements

h = Wandhöhe

I_p^i = polares Trägheitsmoment einer Kreuzungsfläche i

$\sum I_p$ = Summe der polaren Trägheitsmomente aller Kreuzungsflächen

Durch dieses Torsionsmoment entstehen in der Kreuzungsfläche i Schubspannungen, die in ihren Eckpunkten (am weitesten vom Schwerpunkt entfernt) maximal werden.

$$\tau_{\max}^i = \frac{M_T^i}{I_p^i} \cdot r_{\max}^i = \frac{F \cdot h}{\sum I_p} \cdot r_{\max}^i \quad (5)$$

Setzt man voraus, dass nur die Schubspannungen rechtwinklig zur Faserrichtung zum Versagen führen (Rollschub), dann erhält man die maßgebende Schubspannung zu

$$\tau^i = \frac{M_T^i}{I_p^i} \cdot \frac{a^i}{2} = \frac{F \cdot h}{\sum I_p} \cdot \frac{a^i}{2} \quad (6)$$

wobei a_i die größere Querschnittsseite der Kreuzungsfläche darstellt.

Durch diese Beanspruchungen verdrehen sich die beiden rechtwinklig aufeinander geklebten Hölzer um einen Winkel γ , der wie folgt berechnet werden kann:

$$\gamma = \frac{M_T^i}{I_p^i \cdot K} = \frac{F \cdot h}{\sum I_p \cdot K} \quad (7)$$

dabei ist K ein Verschiebungsmodul, der berücksichtigt, dass zwischen den Holzfasern kleine Verschiebungen auftreten, obwohl die eigentliche Klebeverbindung als starr angesehen wird. Dies wurde bei der Untersuchung von zusammengesetzten Stäben mit geklebten Bindehölzern festgestellt [3]. In dem ausgewerteten speziellen Fall der gespreizten Stäbe mit Bindehölzern wird für eine Torsionsbeanspruchung ein Verschiebungsmodul von 2 N/mm pro mm² Klebefuge vorgeschlagen.

3.2.2 Ermittlung der Tragfähigkeit

Zur Ermittlung der Schubfestigkeit wurden Versuche an LIGNOTREND Elementen der Typen Vario 4S und Lux 4S/n durchgeführt [4].

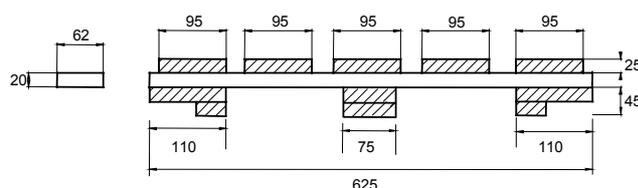


Bild 6: LIGNOTREND Element Typ Vario 4S

Querhölzer (20/62) im Achsabstand von 125 mm

Berechnung der polaren Trägheitsmomente der Kreuzungsflächen:

obere Lage:

$$I_p = \frac{ba^3 + ab^3}{12} = \frac{62 \cdot 95^3 + 95 \cdot 62^3}{12} = 6,317 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 \quad (8)$$

untere Lage:

$$I_p = \frac{ba^3 + ab^3}{12} = \frac{62 \cdot 110^3 + 110 \cdot 62^3}{12} = 9,062 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 \quad (9)$$

$$I_p = \frac{ba^3 + ab^3}{12} = \frac{62 \cdot 75^3 + 75 \cdot 62^3}{12} = 3,669 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 \quad (10)$$

Summe je Querholz:

$$\sum I_p = (5 \cdot 6,317 + 2 \cdot 9,062 + 3,669) \cdot 10^6 \text{ mm}^4 = 53,38 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 \quad (11)$$

je m Wandhöhe:

$$I_{p,ges} / m = \frac{53,38 \cdot 10^6}{0,125} = 4,27 \cdot 10^8 \text{ mm}^4 / m = 4,27 \cdot 10^5 \text{ mm}^3 \quad (12)$$

größte Seitenlänge der Kreuzungsfläche $a = 110 \text{ mm}$

$$\tau^i = \frac{M_T^i}{I_p^i} \cdot \frac{a^i}{2} = \frac{F}{4,27 \cdot 10^5} \cdot 55,0 = F \cdot 0,1288 \cdot 10^{-3} \quad (13)$$

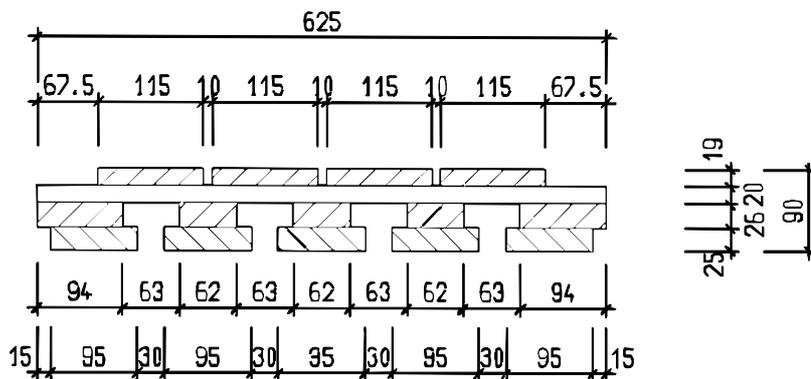


Bild 7: LIGNOTREND Element Typ Lux 4S/n

Querhölzer (20/146) im Achsabstand von 156 mm

Berechnung der polaren Trägheitsmomente der Kreuzungsflächen:

obere Lage:

$$I_p = \frac{ab^3 + ba^3}{12} = \frac{146 \cdot 115^3 + 115 \cdot 146^3}{12} = 48,33 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 \quad (14)$$

untere Lage:

$$I_p = \frac{ab^3 + ba^3}{12} = \frac{146 \cdot 94^3 + 94 \cdot 146^3}{12} = 34,48 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 \quad (15)$$

$$I_p = \frac{ba^3 + ab^3}{12} = \frac{62 \cdot 146^3 + 146 \cdot 62^3}{12} = 18,98 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 \quad (16)$$

Summe je Querholz:

$$\sum I_p = (4 \cdot 48,33 + 2 \cdot 34,48 + 3 \cdot 18,98) \cdot 10^6 \text{ mm}^4 = 319,22 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 \quad (17)$$

je m Wandhöhe:

$$I_{p,ges} / m = \frac{319,22 \cdot 10^6}{0,156} = 2,046 \cdot 10^9 \text{ mm}^4 / m = 2,046 \cdot 10^6 \text{ mm}^3 \quad (18)$$

größte Seitenlänge der Kreuzungsfläche a=146 mm

$$\tau^i = \frac{M_T^i}{I_p^i} \cdot \frac{a^i}{2} = \frac{F}{2,046 \cdot 10^6} \cdot 73 = F \cdot 0,0357 \cdot 10^{-3} \quad (19)$$

Die Elemente wurden wie in **Bild 5** dargestellt durch eine Einzellast F in Plattenebene belastet. Die dabei auftretenden Zugkräfte in den Randbrettern wurden über zwei mittels Schrauben seitlich angepresste Stahlplatten aufgenommen, die Druckkräfte wurden unmittelbar über Kontaktpressung in das Auflager eingeleitet (siehe **Bild 8**).

Die Elementlänge für den Typ Vario 4S betrug 2,5 m. Um ein frühzeitiges Versagen der Elemente des Typs Lux 4S/n am Auflager zu vermeiden, wurde die Elementlänge auf 1,3 m reduziert. Die Belastung wurde kontinuierlich bis zum Bruch, der nach ca. 5 Minuten erreicht wurde, gesteigert.

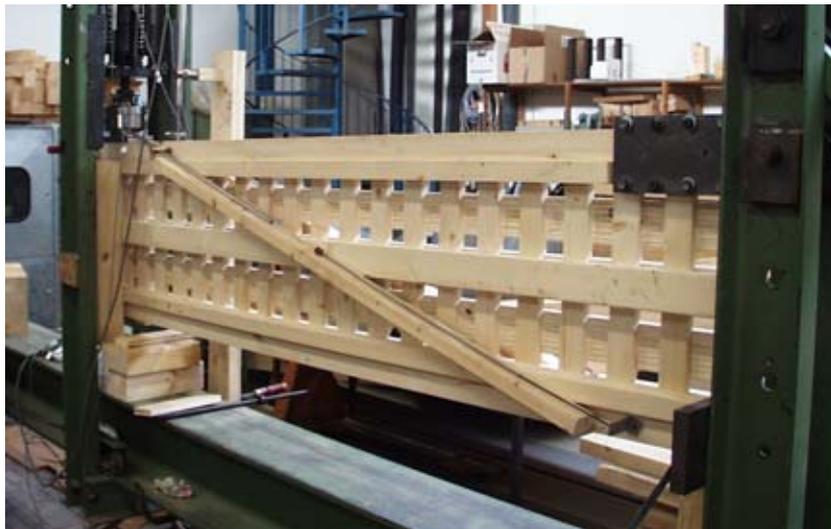


Bild 8: Versuchsaufbau

Die aufnehmbare Last F und die daraus berechneten maßgebenden Schubspannungen nach Gleichungen (13) und (19) sind in Tabelle 4 zusammengestellt. Die so berechneten Schubspannungen liegen deutlich über den zu erwartenden Festigkeiten bei reinen Rollschubbeanspruchungen von 1 bis 2 N/mm². Dies resultiert aus folgendem beim Versuch deutlich erkennbarem Versagensvorgang: bereits bei etwa 2/3 der Höchstlast kündigt sich das Versagen durch ein deutliches Knistern an, was auf das Erreichen der Schubfestigkeit in den Rand- und Eckzonen hindeutet. Dies führt jedoch nicht unmittelbar zum Versagen, da durch Spannungumlagerungen in Richtung des Drehpunktes weitere Kräfte aufgenommen werden können.

Tabelle 4: Zusammenstellung und Auswertung der Versuchsergebnisse

Element Typ	Versuchsnummer	max F kN	τ N/mm ²
Vario 4S	1	25,8	3,32
	2	21,9	2,82
	3	24,7	3,18
Lux 4S/n	1	>81,5	>2,91 ¹
	2	>79,0	>2,81 ¹
	3	83,6	2,98

¹ kein Schubversagen

Zur Überprüfung der so berechneten Werte der Schubfestigkeit wurden zunächst aus einem zusätzlichen Element des Typs Vario 4S einzelne Kreuzungsflächen herausgeschnitten. Mit Hilfe eines Drehmomentenschlüssels wurde die Torsionstragfähigkeit dieser Verbindungen ermittelt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5 zusammengestellt. Die so ermittelten Schubfestigkeiten entsprechen den an den Elementen ermittelten Werten.

Tabelle 5: Zusammenstellung der Torsionstragfähigkeit von einzelnen Kreuzungspunkten

M_T Nm	b mm	a mm	I_p mm ⁴	τ N/mm ²
350	62	95	$6,32 \cdot 10^6$	2,63
390	62	95	$6,32 \cdot 10^6$	2,93
400	62	95	$6,32 \cdot 10^6$	3,01
400	62	95	$6,32 \cdot 10^6$	3,01
440	62	95	$6,32 \cdot 10^6$	3,31
450	62	95	$6,32 \cdot 10^6$	3,38
500	62	95	$6,32 \cdot 10^6$	3,76
340	62	75	$3,67 \cdot 10^6$	3,47

3.2.3 Ermittlung der Steifigkeit

Zur Ermittlung der Schubsteifigkeit der Elemente waren weitere Versuche notwendig. Um eine reine Schubverzerrung (ohne zusätzliche Biegeverformungen) der Elemente zu erreichen, wurden die Elemente an den gegenüberliegenden Ecken für die Lasteinleitung abgeschrägt und diagonal belastet (Bild 9 und 10). Die Stauchung der Elemente wurde diagonal, in Richtung der Kraft gemessen.

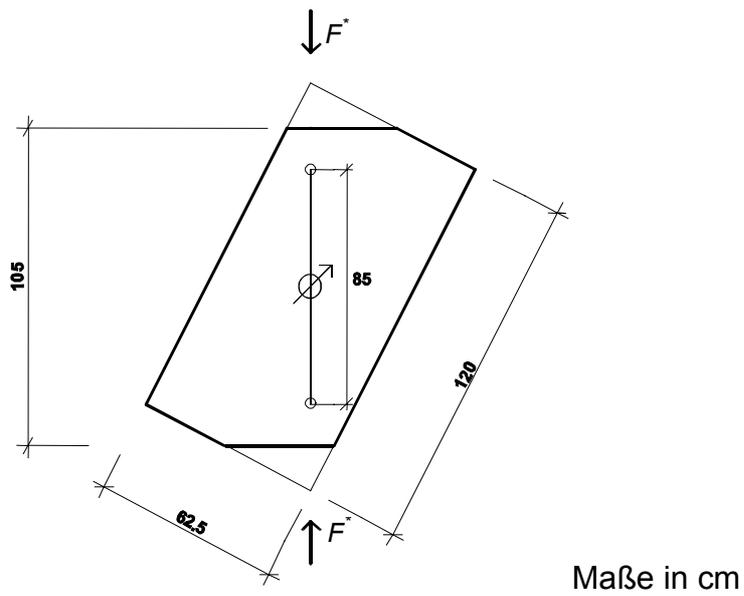


Bild 9: Form und Belastung eines Prüfkörpers



Bild 10: Versuchsaufbau

Aus der gemessenen Verkürzung der Diagonalen Δu unter einer Belastung F lässt sich der Verschiebungsmodul K eines Kreuzungspunktes wie folgt ermitteln:

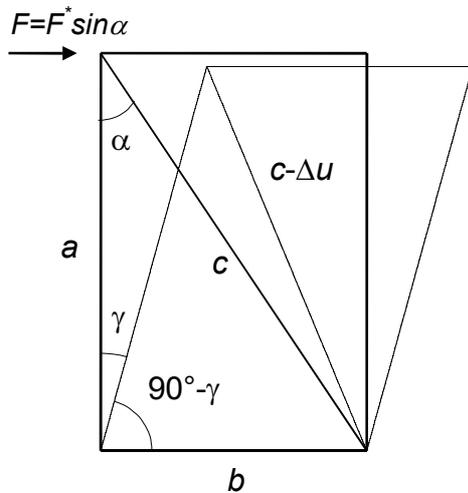


Bild 11: Verzerrung eines Elementes unter einer Last F

Aus dem Kosinussatz:

$$c - \Delta u = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cos(90^\circ - \gamma)} \quad (20)$$

folgt nach einigen Umformungen:

$$\sin \gamma = \frac{2 \cdot c \cdot \Delta u - \Delta u^2}{2ab} \quad (21)$$

Für kleine Δu gilt die Näherung

$$\gamma = \frac{c \cdot \Delta u}{ab} = \frac{\Delta u}{c \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha} \quad (22)$$

Daraus lässt sich der Verschiebungsmodul K berechnen:

$$K = \frac{\Delta F \cdot h}{\sum I_p \cdot \gamma} = \frac{\Delta F \cdot h \cdot c \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha}{\Delta u \cdot \sum I_p} \quad (23)$$

In Tabelle 6 sind die aus Versuchen an Elementen der Typen Vario 4S und Lux 4S/n ermittelten Verschiebungsgrößen $\frac{\Delta F^*}{\Delta u}$ und die daraus berechneten Verschiebungsmoduln K zusammengestellt.

Tabelle 6: Zusammenstellung der Versuchsergebnisse zur Bestimmung des Verschiebungsmoduls

$\frac{\Delta F^*}{\Delta u}$	I_p pro m Wandhöhe	α	c	K pro mm ² Fläche
kN/mm	mm ³	°	mm	N/mm ³
13,1	$4,27 \cdot 10^5$	27,5	850	4,93
43,6	$2,05 \cdot 10^6$	27,5	850	3,43
38,3	$2,05 \cdot 10^6$	27,5	850	3,01
38,6	$2,05 \cdot 10^6$	27,5	850	3,03

Um die Verformungen von Elementen mit aufgelöster Scheibe nach der technischen Biegelehre berechnen zu können, erscheint es sinnvoll, für diese Elemente eine wirksame Schubsteifigkeit $(GA)_{ef}$ anzugeben. Geht man davon aus, dass in einem Biegeträger durch eine Querkraft V eine Schubverzerrung γ von

$$\gamma = \frac{V}{(GA)_{ef}} \tag{24}$$

entsteht, lässt sich mit Hilfe von Gleichung (7) die wirksame Schubsteifigkeit angeben:

$$(GA)_{ef} = \frac{V}{\gamma} = \frac{\sum I_p \cdot K}{h} \tag{25}$$

$\frac{\sum I_p}{h}$ = Summe der polaren Trägheitsmomente der Kreuzungsflächen pro Elementlänge

K = Verschiebungsmodul der Kreuzungsfläche pro mm² Fläche

Mit dieser wirksamen Schubsteifigkeit können nun die Schubverformungen nach der technischen Biegelehre bestimmt werden. Dabei ist $\kappa_V=1$ anzunehmen.

3.3 Weitere Versuche zur Ermittlung der Torsionstragfähigkeit und Steifigkeit

Die an den LIGNOTREND- Elementen durchgeführten Versuche zur Ermittlung der Tragfähigkeit und Steifigkeit reichen nicht aus, um daraus zuverlässig charakteristische Werte ableiten zu können. Daher wurden weitere Versuche an rechtwinklig aufeinander verklebten Hölzern durchgeführt.

Die einzelnen Hölzer wurden mittels eines Einkomponenten-PUR-Klebstoffs aufeinandergeklebt, die Klebefläche betrug zwischen $40 \times 40 \text{ mm}^2$ und $64 \times 100 \text{ mm}^2$.

Die Hölzer wurden in einer speziellen Prüfvorrichtung mittels Stahlteilen seitlich gehalten, und durch einen hydraulisch betriebenen Drehmotor wurde ein Torsionsmoment aufgebracht (Bild 12 und 13). Das Torsionsmoment wurde über einen Hebelarm als Kraft mit einer Kraftmessdose bestimmt und während des Versuchs kontinuierlich aufgezeichnet. Die Verdrehung wurde durch einen Seilzugaufnehmer über die Abwicklung eines mitdrehenden Zylinders gemessen.

Da in der Prüfvorrichtung kleine Verformungen nicht auszuschließen waren, wurde vor den Versuchen die Vorrichtung mittels eines geschweißten Stahlknotens kalibriert.



Bild 12: Versuchseinrichtung

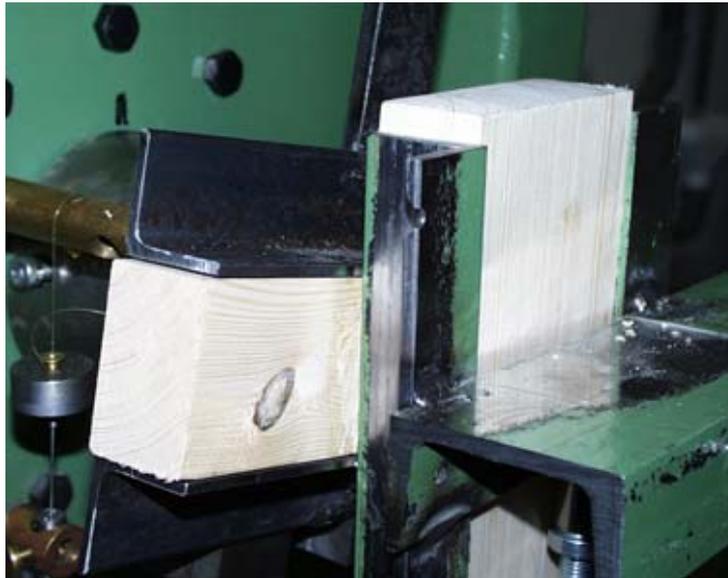


Bild 13: Rechtwinklig aufeinander geklebte Hölzer unter Torsionsbeanspruchung

Die Versuchskörper wurden kontinuierlich belastet, ein typisches Moment-Verdrehungsdiagramm ist in Bild 14 dargestellt. Aus dem linearen Bereich der Kurve wurde die Steigung $\Delta M/\Delta\gamma$ und daraus der Verschiebungsmodul K nach

$$K = \frac{\Delta M}{\Delta\gamma \cdot I_p} \quad (26)$$

berechnet.

Aus dem maximal erreichten Moment $\max M$ wurde in der Mitte der Querschnittsseite auftretende maximale Schubspannung $\max \tau$ nach

$$\max \tau = \frac{\max M}{I_p} \cdot \frac{a}{2} \quad (27)$$

berechnet, wobei a die größere Querschnittsseite der Kreuzungsfläche darstellt.

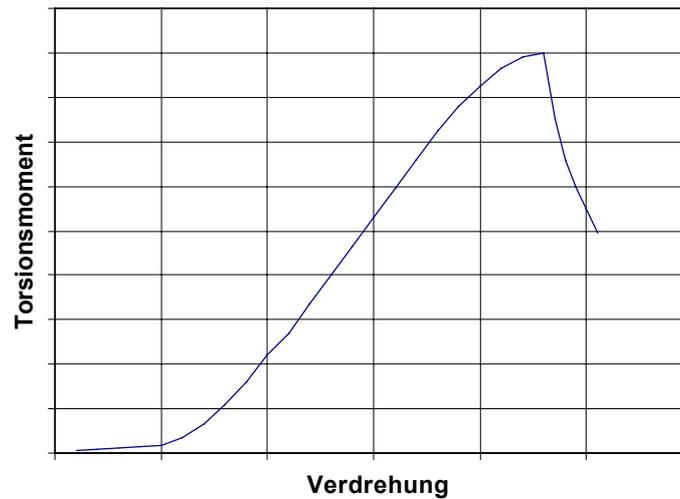


Bild 14: Typische Momenten-Verdrehungsbeziehung von rechtwinklig zueinander verklebten Hölzern

Ein typisches Versagensbild, bei dem die Fasern an den Seiten der Kreuzungsflächen abgeschert sind (Rollschubversagen) ist in Bild 15 gezeigt.



Bild 15: Bruchfläche einer torsionsbeanspruchten Kreuzungsfläche

Die so ermittelten Schubfestigkeiten sind in Bild 16 in Abhängigkeit von der Größe der Klebefläche dargestellt. Zum Vergleich sind auch die Ergebnisse aus den

Elementversuchen (Vario und Lux, siehe auch Tabelle 4) und aus den Versuchen mit herausgeschnittenen Kreuzungspunkten ($62 \times 95 \text{ mm}^2$ und $62 \times 75 \text{ mm}^2$, siehe auch Tabelle 5) eingezeichnet.

Die mittlere Schubfestigkeit liegt bei $3,6 \text{ N/mm}^2$ bei einem Kleinstwert von $2,6 \text{ N/mm}^2$. Da es sich bei diesen Untersuchungen nur um eine Vorstudie handelt wird, auch aus Gründen der Vereinfachung, vorgeschlagen, für die Schubfestigkeit von torsionsbeanspruchten, rechtwinklig zueinander verklebten Hölzern eine charakteristische Schubfestigkeit von $2,5 \text{ N/mm}^2$, also wie für Schubbeanspruchungen in Faserrichtung, festzulegen.

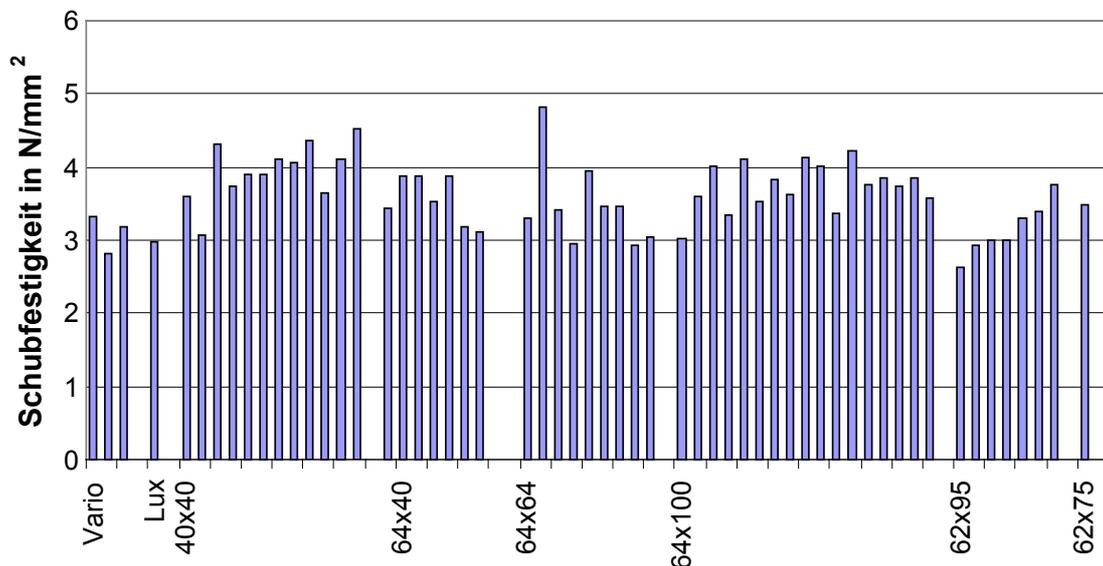


Bild 16: Schubfestigkeit von rechtwinklig zueinander verklebten Hölzern bei Torsionsbeanspruchung

Die Verschiebungsmoduln sind in Bild 17 dargestellt. In der Tendenz ist zu erkennen, dass mit größerer Anschlussfläche der Verschiebungsmodul kleiner wird.

Um auftretende Verformungen auf der sicheren Seite liegend abschätzen zu können, wird ein Verschiebungsmodul von 3 N/mm^3 vorgeschlagen.

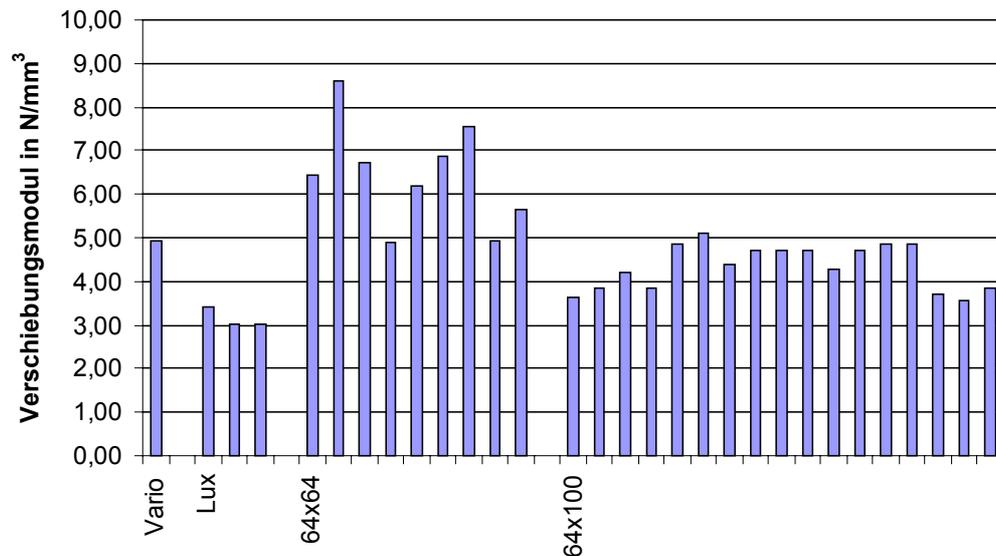


Bild 17: Verschiebungsmodul von rechtwinklig zueinander verklebten Hölzern bei Torsionsbeanspruchung

4 Zusammenfassung

Bei Beanspruchung in Plattenebene sind für LIGNOTREND-Elemente folgende Trag- bzw. Gebrauchstauglichkeitsnachweise zu führen:

Druck in Plattenebene (Biegeknicken):

Da LIGNOTREND Elemente in der Regel auf einer Schwelle aufstehen und oben durch ein Rähm abgeschlossen sind, entsteht ein Druckstab mit veränderlicher, bereichsweise konstanter Biegesteifigkeit. Um den Nachweis nach dem Ersatzstabverfahren durchführen zu können, muss eine Ersatzstablänge ermittelt werden. Dies kann z.B. nach [2] erfolgen. Der schematisierte Knicknachweis ist in Tabelle 1 zusammengestellt.

Schubbeanspruchung in Plattenebene (Aussteifung)

Hierbei ist zu unterscheiden zwischen Elementen,

- bei denen mindestens eine Brettlage vorhanden ist, bei der die nebeneinanderliegenden Bretter miteinander verklebt sind (vollständige Scheibe),
- und Elementen, bei denen eine Brettlage aus nebeneinanderliegenden, nicht miteinander verklebten Brettern besteht, die jedoch auf rechtwinklig dazu verlaufenden Brettern aufgeklebt sind (aufgelöste Scheibe).

Im ersten Fall erfolgt die Berechnung nach der technischen Biegelehre, d.h. die maßgebende Schubspannung in der durchgängigen Brettlage berechnet sich nach Gleichung (2). Schubverformungen, die infolge der Querkraft in der Platte entstehen, sind zu berücksichtigen. Dies kann ebenfalls nach der technischen Biegelehre erfolgen.

Im zweiten Fall kann man näherungsweise davon ausgehen, dass das äußere auf die Wand wirkende Moment sich nach Gleichung (4) gleichmäßig auf alle einzelnen Kreuzungsflächen aufteilt. Durch dieses Moment entstehen in den Kreuzungsflächen Schubspannungen, die rechtwinklig zur Faserrichtung wirken (Rollschub) und nach Gleichung (6) berechnet werden können. Als charakteristische Festigkeit wird für diese Fälle ein Wert von $2,5 \text{ N/mm}^2$ empfohlen.

Um die Verformungen von Elementen mit aufgelöster Scheibe nach der technischen Biegelehre berechnen zu können, kann nach Gleichung (25) die wirksame Schubsteifigkeit berechnet werden, wobei der Verschiebungsmodul zu $K=3 \text{ N/mm}^3$ angenommen werden kann. Weiterhin ist $\kappa_V=1$ anzunehmen.

Bei Elementen mit großen Kreuzungsflächen ist zu überprüfen, ob anstelle des Torsionsversagens der Kreuzungsflächen ein Schubversagen der Bretter auftreten kann. Dieser Nachweis kann wie der Nachweis für Elemente mit durchgehender Brettlage geführt werden.

Weitere Nachweise, wie z.B. die Verankerung der Elemente für abhebende Kräfte werden in diesem Beitrag nicht behandelt.

5 Literatur und allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen

[1] H.J. Blass,; R. Görlacher (2001). Zum Trag- und Verformungsverhalten von LIGNOTREND-Decken- und Wandsystemen aus Nadelschnittholz. Bauen mit Holz 103 (2001) H. 4 S. 37-40, H. 5 S. 68-71.

[2] C. Petersen (1982). Statik und Stabilität der Baukonstruktionen. 2., durchges. Auflage. Braunschweig: Vieweg, 1982 . - XVI, 960 S.

[3] K. Möhler (1956). Über das Tragverhalten von Biegeträgern und Druckstäben mit zusammengesetzten Querschnitten und nachgiebigen Verbindungsmitteln. Universität Karlsruhe, Habil.-Schr., 1956

[4] Ermittlung der Tragfähigkeit von LIGNOTREND-Elementen bei Beanspruchung in Plattenebene. Prüfbericht Nr. 026101/2. Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Universität Karlsruhe.

Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-9.1-283, LIGNOTREND-Holzblockelemente (1999). Hrsg.: Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin

Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-9.1-409, LIGNOTREND-Deckenelemente (1998). Hrsg.: Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin