

Gutachtliche Stellungnahme

Tragfähigkeit und Steifigkeit von TriqBriq WS 25 Bauteilen

1 Allgemeines

Die Firma TRIQBRIQ AG in Stuttgart hat beim Deutschen Institut für Bautechnik in Berlin eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für TriqBriq WS 25 Wandbauteile, Stützen und Biegeträger beantragt. TriqBriq WS 25 Wandbauteile werden als tragende und aussteifende Wände in Gebäuden verwendet. Das Bausystem aus Wänden, die aus einzelnen Bausteinen bestehen, wird durch Stützen und Stürze ergänzt, die in Längsrichtung durchgehende Hölzer aufweisen.

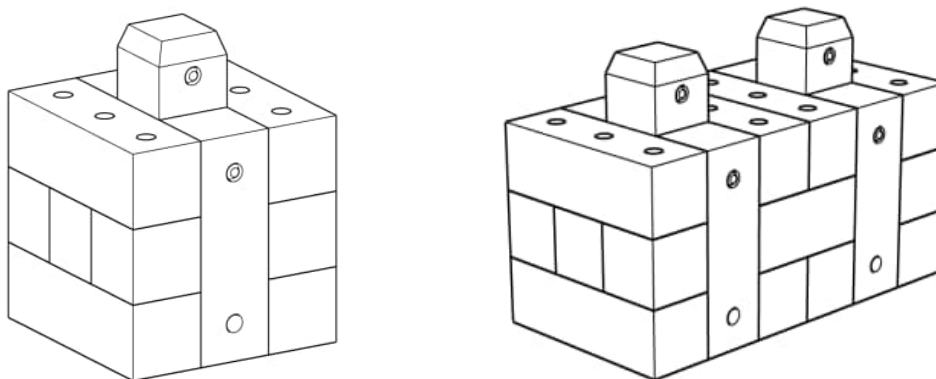


Bild 1: Wandbausteine aus Kanthölzern und Buchenholzdübeln, BRIQ 25 (links) und BRIQ 50 (rechts)

Das TriqBriq WS 25 Massivholz-Wandsystem wurde entwickelt, um das bisher für tragende Bauteile kaum genutzte Schwachholz auch als Konstruktionsholz verwenden zu können. Dabei werden Kanthölzer mit einem Querschnitt von 8,33x8,33 cm und einer Länge von 8,33 cm - 250 cm sowie Hartholzdübel aus Buche eingesetzt. Der Wandaufbau besteht aus drei Lagen dieser Hölzer, wobei die tragenden Hölzer der äußeren beiden Lagen durchgehend stehend und die übrigen Hölzer

teilweise stehend und teilweise liegend verbaut werden. Diese drei Lagen werden mittels Buchendübeln des Durchmessers 20 mm, welche im Abstand von 8,33 cm in den drei Hauptrichtungen angeordnet sind, zusammengehalten. Die durchgehend stehenden Hölzer der äußeren Lagen dienen in Wänden und Stützen hauptsächlich der vertikalen Lastabtragung, in Biegeträgern zur Aufnahme der Biege- und Normalspannungen. Diese Hölzer sind in Wandbausteinen BRIQ 25 und BRIQ 50 in vertikaler Richtung jeweils 25 cm lang und durch Hirnholzkontakt miteinander verbunden. Bild 1 zeigt Grundmodule des „Wandbausteins“ mit einer Länge von 25 cm und 50 cm und einem Querschnitt von 25 cm x 25 cm, Bild 2 Beispiele für eine Stütze und einen Biegeträger.

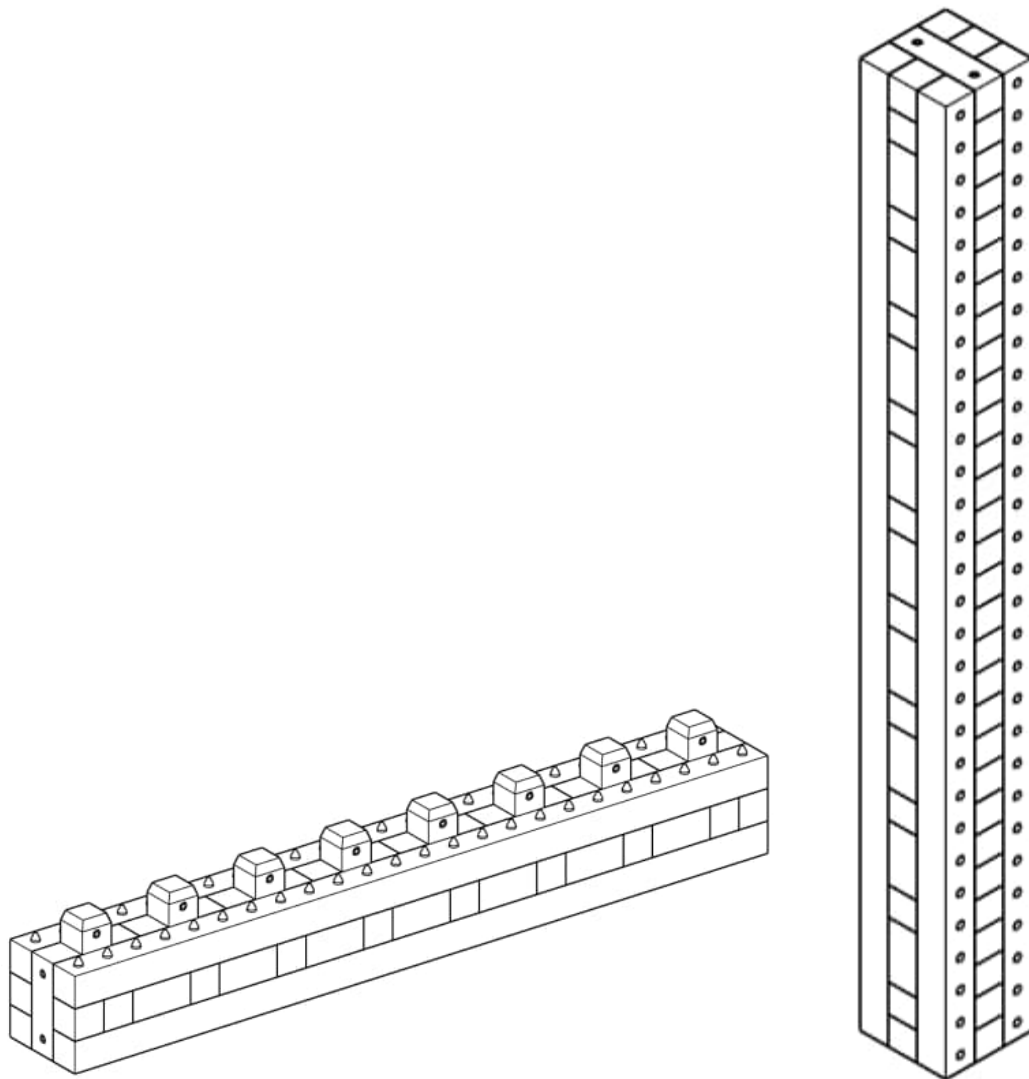


Bild 2: Sturz BRIQ 200 (links) und Stütze BRIQ 250 (rechts) aus Kanthölzern und Buchendübeln

Als Grundlage für diese Gutachtliche Stellungnahme liegen experimentelle Untersuchungen der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine des Karlsruher Instituts für Technologie vor (Prüfbericht Nr. 236101).

Diese gutachtliche Stellungnahme beurteilt die Tragfähigkeit und Steifigkeit von tragenden und aussteifenden TriqBriq WS 25 Wänden, Stützen und Biegeträgern unter Berücksichtigung der Versuchsergebnisse der Versuchsanstalt für Stahl, Holz

und Steine sowie eines mechanischen Modells, das den Einfluss von Hirnholz-Kontaktverbindungen in den druckbeanspruchten Teilen der Wände und die nachgiebige Verbindung der äußeren tragenden Hölzer über die Mittellage hinweg berücksichtigt.

Diese gutachtliche Stellungnahme stützt sich auf folgende Unterlagen:

- Versuche mit TRIQBRIQ Wandelementen. Prüfbericht Nr. 236101 der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine des Karlsruher Instituts für Technologie, 08.08.2023;
- Blaß, H.J. (1987) Tragfähigkeit von Druckstäben aus Brettschichtholz unter Berücksichtigung streuender Einflußgrößen. Dissertation Universität Karlsruhe
- Görlacher, R. (2012) Berechnung von massiven Decken- und Wandelementen aus nachgiebig miteinander verbundenen Brettern. Görlacher, R. (ed.) 2012. Karlsruher Tage 2012 - Holzbau: Forschung für die Praxis, Karlsruhe, 04. Oktober - 5. Oktober 2012. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing. DOI: <https://doi.org/10.5445/KSP/1000029877>
- Blass, HJ, Flaig, M. (2014) Keilgezinkte Rahmenecken und Satteldachträger aus Brettsperrholz. Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau, Bd. 29, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, Germany.
- Flaig, M., Schmidt, T. und Blaß, H.J. (2019); Compressive strength and stiffness of end grain contact joints in glulam and CLT. In: INTER Proceedings pp. 313-328, Edited by Rainer Görlacher, Timber Scientific Publishing, KIT Holzbau und Baukonstruktionen, Karlsruhe, Germany, ISSN 2199-9740
- DIN EN 338 Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen; Deutsche Fassung EN 338:2016;

2 Mechanisches Modell für Druckstäbe

2.1 Allgemeines

Die Tragfähigkeit von Druckstäben aus Holz in EN 1995-1-1 basiert auf der Dissertation von Blaß (1987). Wird ein schlanker Druckstab durch eine Normalkraft belastet, besteht die Gefahr, dass er sich durch seitliches Ausweichen der Beanspruchung entzieht, d.h. ausknickt. Die Tragfähigkeit eines schlanken Bauteils bei Druckbeanspruchung hängt also nicht nur von der Baustofffestigkeit, sondern vor allem von seiner Biegesteifigkeit ab. Die für die Tragfähigkeit einer Holzstütze maßgebenden Baustoffeigenschaften sind daher Druck- und Biegefestigkeit sowie Elastizitätsmodul. Für die TriqBriq WS 25 Wände und Stützen bestehen folgende Unterschiede zu durchgehenden Druckstäben aus Holz:

- Die Fugen zwischen den einzelnen Lagen sind nachgiebig. Zusätzlich treten wie bei Brettspertholz Rollschubverformungen in den Mittellagen auf.
- Die Druckfestigkeit einer Hirnholzkontaktverbindung in Wänden ist gegenüber einem durchgehenden druckbeanspruchten Bauteil, abhängig von der Holzfeuchte, um mindestens 10 % geringer (Flaig, Schmidt und Blaß, 2019).
- Die Biegetragfähigkeit eines Hirnholzkontaktstoßes hängt darüber hinaus von der vorhandenen Druckspannung ab. Ähnlich wie in Lagerfugen von Mauerwerk aus künstlichen Steinen besteht bei geringen Verhältniswerten N/M die Gefahr von klaffenden Fugen.
- Die Steifigkeit von Hirnholzkontaktstoßen lässt sich mit einer Druckfeder beschreiben. Diese in regelmäßigen Abständen von 25 cm angeordneten Federn verringern die Biegesteifigkeit auch ohne klaffende Fugen.

Nachfolgend wird die Drucktragfähigkeit von TriqBriq WS 25 Wandbauteilen und Stützen unter Berücksichtigung der genannten Einflussparameter abgeleitet. Es wird dabei dieselbe Herleitung verwendet, wie sie auch der Tragfähigkeit von Druckstäben nach Eurocode 5 zugrunde liegt. Die geringere Druckfestigkeit wird durch eine Abminderung der charakteristischen Druckfestigkeit des Holzes auf 90 % der Werte nach EN 338 berücksichtigt. Klaffende Fugen werden bei der Bemessung der Wände ausgeschlossen. In der Herleitung der Drucktragfähigkeit wird dazu ein Versagensmechanismus berücksichtigt, der Zugspannungen im Querschnitt ausschließt. Der Elastizitätsmodul der vertikal in Faserrichtung durchgehenden Lagen der Wände wird als wirksamer Elastizitätsmodul unter Berücksichtigung der Kontaktfedern zwischen den 25 cm langen Abschnitten verwendet. Die Federn werden damit über die Bauteillänge verschmiert.

2.2 Druckfestigkeit einer Hirnholzkontaktverbindung

Bei direkten Hirnholzkontaktverbindungen ohne Zwischenschicht aus Metall ist die Jahrringanzordnung der beiden Hölzer in der Regel nicht identisch. Wie Versuche mit Brettspertholz und Brettschichtholz gezeigt haben (Flaig, Schmidt und Blaß 2019), stehen die Spätholzschichten teilweise auf Frühholzschichten auf. Da Spätholz eine höhere lokale Festigkeit aufweist als Frühholz, resultiert aus dieser Tatsache eine Verringerung der Druckfestigkeit gegenüber den charakteristischen Werten nach EN 338. Der Verhältniswert aus mittlerer Druckfestigkeit mit Kontaktstoß zur

mittleren Druckfestigkeit ohne Kontaktstoß betrug $29,6/31,1 = 0,95$, der Verhältniswert aus den charakteristischen Druckfestigkeiten $28,5/32,2 = 0,89$.

In den TriqBriq WS 25 Wänden sind nicht nur einzelne gestoßene Hölzer vorhanden, sondern die vertikal ausgerichteten Lagen bestehen in Wandlängsrichtung aus mehreren 83,3 mm breiten Kanthölzern. Diese Anordnung führt zu einem Homogenisierungseffekt. Daher wird ein Verhältniswert aus Tragfähigkeit mit Hirnholzkontaktverbindung zur Tragfähigkeit ohne Hirnholzkontaktverbindung von 0,9 für die charakteristische Druckfestigkeit der äußeren Vertikallagen der TriqBriq Wände angewendet und die Schwächung durch die Bohrungen für die Buchenholzdübel vernachlässigt. Die charakteristische Druckfestigkeit des Holzes wird dabei aus EN 338 für C24 mit $f_{c,0,k} = 21 \text{ N/mm}^2$ und C16 mit $f_{c,0,k} = 17 \text{ N/mm}^2$ entnommen.

2.3 Herleitung der Drucktragfähigkeit der Vertikallagen

Die lose übereinander gestellten Stababschnitte werden als nachgiebig verbundener, durchgehender Druckstab betrachtet. Es wird der Eulerfall 2 eines Druckstabs ohne Querlast mit spannungsloser Vorverformung e_0 , einer konstanten Normalkraft N und beidseits gelenkiger Lagerung unterstellt (siehe Bild 3). Das Versagen wird im maßgebenden Querschnitt in der Mitte der Bauteillänge angenommen. Sollen Zugspannungen vermieden werden, dürfen die Biegespannungen nicht größer als die Normalspannungen aus der Druckkraft werden:

$$\frac{M}{W} \leq \frac{N}{A} \quad (1)$$

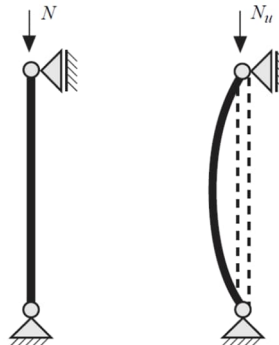


Bild 3: Beidseits gelenkig gelagerter Druckstab

Im Versagensfall wird Gleichung (1) zu

$$\frac{N_u \cdot y_m}{W} = \frac{N_u}{A} \rightarrow y_m = \frac{W}{A} \quad (2)$$

Hierin ist y_m die horizontale Durchbiegung des Druckstabs aus spannungsloser Vorverformung und Biegemoment nach Theorie 2. Ordnung.

y_m folgt aus der spannungslosen Vorverformung und dem Dischinger-Faktor:

$$y_m = \frac{e_0}{1 - \frac{N_u}{N_{\text{crit}}}} = \frac{e_0}{1 - \frac{\sigma_u}{\sigma_{\text{crit}}}} \quad (3)$$

$$\text{mit } \sigma_{\text{crit}} = \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda^2}$$

Hierin ist σ_u die mittlere Druckspannung im Stab beim Versagen, σ_{crit} die Eulersche Knicklast und λ der Schlankheitsgrad des Druckstabs. Gleichsetzen von Gleichung (2) und (3) führt zu:

$$\frac{W}{A} = \frac{e_0}{1 - \frac{\sigma_u}{\sigma_{crit}}} \rightarrow \sigma_u = \sigma_{crit} \cdot \left(1 - \frac{A \cdot e_0}{W}\right) \quad (4)$$

Die Kernweite $k = W/A$ für symmetrisch aufgebaute, nachgiebig verbundene Wandbausteine mit zwei Vertikallagen kann berechnet werden zu:

$$k = \frac{W_{ef}}{A} = \frac{EI_{ef}}{(0,5 \cdot h + \gamma \cdot a_1) \cdot EA} \quad (5)$$

Mit dem wirksamen Schlankheitsgrad λ_{ef} nach Gleichung (C.3) des Anhangs C des Eurocode 5 folgt:

$$\sigma_u = \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda_{ef}^2} \cdot \left(1 - \frac{e_0}{k}\right) \quad (6)$$

Mit:

$$\lambda_{ef} = \ell \cdot \sqrt{\frac{EA}{EI_{ef}}} \quad (7)$$

Solange die mittlere Druckspannung σ_u nach Gleichung (6) nicht überschritten wird, tritt im Druckstab keine klaffende Fuge auf. Ein Spannungsnachweis ist zusätzlich zu führen. Hierzu wird eine lineare Interaktionsbeziehung gewählt, da die halbquadratische Interaktion nach Gleichung (6.19) der EN 1995-1-1 bereits plastische Verformungen im Querschnitt zulässt. Diese würden auch die Biegesteifigkeit beeinflussen, dies ist in Gleichung (6) jedoch nicht berücksichtigt.

$$\frac{\sigma_c}{f_{c,0}} + \frac{\sigma_m}{f_m} \leq 1 \quad (8)$$

Da Gleichung (8) der Herleitung der k_c -Werte in EN 1995-1-1 zugrunde liegt, ist ein Nachweis des Druckstabs nach Abschnitt 6.3.2 und Anhang C des Eurocode 5 mit abgeminderter Druckfestigkeit und abgemindertem Elastizitätsmodul ausreichend, um den Spannungsnachweis zu führen.

Wirkt zusätzlich eine Beanspruchung rechtwinklig zur Wandebene z.B. aus Wind, müssen sowohl die dadurch entstehenden Biegespannungen in den Hirnholzkontaktflächen als auch die durch die Biegemomente entstehenden Zusatzmomente berücksichtigt werden. Das Biegemoment im verformten Stab beträgt dann:

$$M^II = \frac{N \cdot (e_0 + e_w)}{1 - \frac{N}{N_{crit}}} + M_w \quad (9)$$

Die aus M^II resultierende Biegespannung darf die Normalspannung aus N nicht überschreiten, siehe Gleichung (1):

$$\frac{N \cdot (e_0 + e_w)}{W \cdot \left(1 - \frac{N}{N_{\text{crit}}}\right)} + \frac{M_w}{W} \leq \frac{N}{A} \quad (10)$$

Löst man Gleichung (10) nach N auf und setzt die Biegespannung gleich der Normalspannung aus der Normalkraft, folgt die Traglast N_u :

$$N_u = \frac{\sqrt{\left(e_0 + e_w - k - \frac{M_w}{N_{\text{crit}}}\right)^2 - \frac{4 \cdot M_w \cdot k}{N_{\text{crit}}}} - \left(e_0 + e_w - k - \frac{M_w}{N_{\text{crit}}}\right)}{\frac{2 \cdot k}{N_{\text{crit}}}} \quad (11)$$

Hierin bedeuten:

e_0 Spannungslose Vorverformung in Stabmitte, $e_0 = \ell/400$

ℓ Länge des Druckstabs

e_w Horizontale Durchbiegung des Druckstabs nach Theorie I. Ordnung aus einer Gleichstreckenlast rechtwinklig zur Stabachse

k Kernweite des tragenden Querschnitts nach Gleichung (5)

M_w Biegemoment in der Mitte des Druckstabs aus einer Gleichstreckenlast rechtwinklig zur Stabachse

N_{crit} Eulersche Knicklast, $N_{\text{crit}} = \pi^2 \cdot E_{\text{ef}}/\ell^2$

N_u nach Gleichung (11) ist die Obergrenze der Normalkraft bei gleichzeitig wirkender Querlast w . Bei Querlasten ist eine Mindestdruckkraft N_{min} in der Wand erforderlich, um Klaffen in den tragenden Lagen zu verhindern. Alternativ lässt sich Klaffen verhindern, indem die Querlast w nach oben begrenzt wird. Diese Obergrenze folgt für eine Normalkraft N durch Auflösen der Gleichung (11) nach M_w :

$$w \leq \frac{8 \cdot N \cdot \left(k - \frac{e_0}{1 - \frac{N}{N_{\text{crit}}}}\right)}{\ell^2 + \frac{5 \cdot \ell^4}{48 \cdot E_{\text{ef}} \cdot \left(\frac{1}{N} - \frac{1}{N_{\text{crit}}}\right)}} \quad (12)$$

2.4 Steifigkeit von Druckstäben mit Hirnholzkontaktstößen

Die Steifigkeit von Druckstäben mit Hirnholzkontaktstößen lässt sich über einen wirksamen Elastizitätsmodul beschreiben. Die in regelmäßigen Abständen von 25 cm angeordneten Hirnholzstöße werden als Federn interpretiert, die sowohl die Längs- als auch die Biegesteifigkeit verringern.

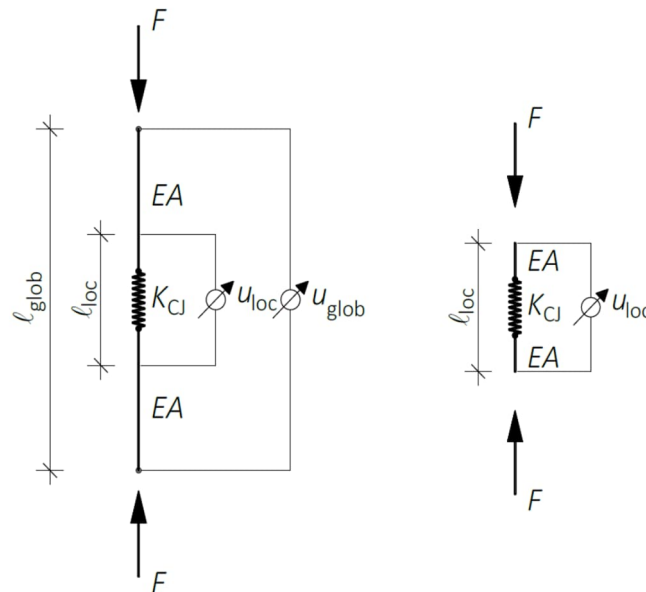


Bild 4: Messanordnung zur Bestimmung der Federsteifigkeit der Kontaktstöße aus Flaig, Schmidt und Blaß 2019

Wird jeweils ein Stabstück der Länge 250 mm und eine Feder betrachtet, kann die äquivalente Verringerung des Elastizitätsmoduls damit berechnet werden. Die Längssteifigkeit des Stababschnitts beträgt

$$\frac{EA}{l} = \frac{E \cdot 83,3^2}{250} = 27,8 \cdot E \quad (13)$$

Die Federsteifigkeit der Hirnholzkontaktfuge wird für Brettschichtholz in Flaig, Schmidt und Blaß mit 318 N/mm³ angegeben. Der Wert wurde an Bauteilen mit einem Querschnitt von 80 mm x 100 mm ermittelt und passt daher gut zu den Querschnitten in den tragenden Lagen der TriqBriq WS 25 Wände von 83,3 mm x 83,3 mm. Versuche an Brettspertholz haben gezeigt, dass die Federsteifigkeit pro Flächeneinheit mit zunehmender Querschnittsfläche ansteigt. Für die Vertikallagen der TriqBriq WS 25 Wände wird ein Wert von $K_{CJ} = 300 \text{ N/mm}^3$ zugrunde gelegt. Der wirksame Elastizitätsmodul E_{ef} folgt damit aus:

$$\frac{l}{E_{ef}A} = \frac{l}{EA} + \frac{1}{K_{CJ}A} \rightarrow E_{ef} = \frac{l}{\frac{l}{E} + \frac{1}{K_{CJ}}} = \frac{250}{\frac{250}{E} + \frac{1}{300}} \quad (14)$$

Für Schnittholz C24 beträgt der mittlere Elastizitätsmodul $E_{m,0,mean} = 11.000 \text{ N/mm}^2$, der 5%-Quantilwert $E_{m,0,k} = 7.400 \text{ N/mm}^2$, die entsprechenden Werte für C16 betragen $E_{m,0,mean} = 8.000 \text{ N/mm}^2$ bzw. $E_{m,0,k} = 5.400 \text{ N/mm}^2$. Der 5%-Quantilwert gilt für ein einzelnes Schnittholzbauteil. Die Vertikallagen von TriqBriq WS 25 Wänden bestehen jedoch aus einer Vielzahl von 250 mm langen Schnittholzbauteilen, die sowohl in Richtung der Wandhöhe als auch in Richtung der Wandlänge zur Homogenisierung der Steifigkeitseigenschaften beitragen. Daher wird der 5%-Quantilwert des Elastizitätsmoduls der Vertikallagen nicht wie für Schnittholz zu zwei Drittel des Mittelwerts bestimmt, sondern in Anlehnung an das Vorgehen bei Brettschichtholz zu fünf Sechstel des Mittelwerts. Damit folgen die wirksamen Elastizitätsmoduln der Vertikallagen der TriqBriq WS 25 Wände zu:

$$E_{\text{ef},0,\text{mean}} = \frac{250}{\frac{250}{11000} + \frac{1}{300}} = 9600 \text{ N/mm}^2$$

für WS 25 Wände aus C24

$$E_{\text{ef},0,\text{k}} = \frac{250}{\frac{250 \cdot 6}{11000 \cdot 5} + \frac{1}{300}} = 8200 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{\text{ef},0,\text{mean}} = \frac{250}{\frac{250}{8000} + \frac{1}{300}} = 7200 \text{ N/mm}^2$$

für WS 25 Wände aus C16

$$E_{\text{ef},0,\text{k}} = \frac{250}{\frac{250 \cdot 6}{8000 \cdot 5} + \frac{1}{300}} = 6100 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{0,\text{mean}} = 11000 \text{ N/mm}^2$$

für WS 25 Stützen aus C24

$$E_{0,\text{k}} = 9200 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{0,\text{mean}} = 8000 \text{ N/mm}^2$$

für WS 25 Stützen aus C16

$$E_{0,\text{k}} = 6700 \text{ N/mm}^2$$

3 Nachgiebigkeit der Fugen zwischen den Längshölzern

Für die TriqBriq WS 25 Stürze und Stützen wird das mechanische Modell aus Anhang B der EN 1995-1-1 verwendet. Die Nachgiebigkeit aus den Verschiebungsmoduln der Buchenholzdübeln und der Schubverformungen in der Mittellage wird aus den Versuchsergebnissen des KIT rückgerechnet. Der Elastizitätsmodul der Mittellage wird zu $E = 0$ angenommen.

Unter diesen Annahmen resultiert die Fugensteifigkeit $K/s = 17,4 \text{ N/mm}^2$ für jede der beiden Fugen. Da die Schubkräfte auch über die Hölzer in den Außenlagen zwischen den in Längsrichtung durchgehenden Hölzern übertragen werden, stellt der Wert $K/s = 17,4 \text{ N/mm}^2$ eine verschmierte Fugensteifigkeit dar, die sämtliche Nachgiebigkeiten zwischen den beiden Längsholzpaaren erfasst.

Für die TriqBriq WS 25 Wandbauteile wird die Fugensteifigkeit aus den Schubversuchen der Reihe SH abgeleitet. Der mittlere Verschiebungsmodul R der Prüfkörper ist in Tabelle 4 des Prüfberichts 236101 zu $R = 4097 \text{ N/mm}$ angegeben. Dieser Wert gilt für ein Längsholzpaar und eine Länge von 750 mm. Die Fugensteifigkeit für jede der beiden Fugen folgt daraus zu $K/s = 2 \cdot 4097/750 = 10,9 \text{ N/mm}^2$.

4 Vergleich mit Versuchsergebnissen

4.1 Allgemeines

Nachfolgend wird zunächst das mechanische Modell verwendet, um die Tragfähigkeit der druckbeanspruchten TriqBriq WS 25 Wandstreifen zu berechnen, deren Tragfähigkeiten im Prüfbericht 236101 dokumentiert sind. Die Prüfkörper 1 bis 3 wiesen eine Holzfeuchte von etwa 12,5% auf. Die Wände 1 bis 4 wurden mit zentrischer Lasteinleitung geprüft. Der vertikale Abstand zwischen den gelenkigen oberen und unteren Auflagern betrug 3260 mm.

Zunächst wurde die Tragfähigkeit nach dem Ersatzstabverfahren nach EN 1995-1-1 rechnerisch bestimmt. Insbesondere bei geringen Schlankheitsgraden wird nicht das Klaffen der Hirnholzugen, sondern die Festigkeit des Holzes maßgebend. Daher ist grundsätzlich auch das Biegeknicken nach Abschnitt 6.3.2 des Eurocode 5 mit abgeminderter Druckfestigkeit $0,9 \cdot f_{c,0,k}$ und abgemindertem Elastizitätsmodul $E_{ef,0,k} = 8200 \text{ N/mm}^2$ (C24) bzw. $E_{ef,0,k} = 6100 \text{ N/mm}^2$ (C16) nachzuweisen. Dieser Nachweis war jedoch für die geprüften Druckstäbe nicht maßgebend, sondern die Tragfähigkeit nach Gleichung (6). Diese beträgt für zentrisch belastete Wände:

$$N_u = \sigma_u \cdot A = \frac{\pi^2 \cdot E_{ef} \cdot A}{\lambda^2} \cdot \left(1 - \frac{e_0}{k}\right) = \frac{\pi^2 \cdot 9600 \cdot 27750}{81,0^2} \cdot \left(1 - \frac{8,15}{29,9}\right) = 291 \text{ kN}$$

Hierin bedeuten:

E_{ef} Wirksamer Elastizitätsmodul unter Berücksichtigung der Nachgiebigkeit der Hirnholzkontaktugen, $E_{ef} = 9600 \text{ N/mm}^2$

A Querschnittsfläche der Vertikallagen, $A = 4 \cdot 83,3 \text{ mm} \cdot 83,3 \text{ mm} = 27750 \text{ mm}^2$

$\gamma = 0,150$

$EI_{ef} = 4,31 \cdot 10^{11} \text{ Nmm}^2$

$k = \frac{W_{ef}}{A} = \frac{EI_{ef}}{(0,5 \cdot h + \gamma \cdot a_1) \cdot EA} = \frac{4,31 \cdot 10^{11}}{(0,5 \cdot 83,3 + 0,150 \cdot 83,3) \cdot 9600 \cdot 27750} = 29,9 \text{ mm}$

λ_{ef} Wirksamer Schlankheitsgrad, $\lambda_{ef} = \ell \cdot \sqrt{\frac{EA}{EI_{ef}}} = 3260 \cdot \sqrt{\frac{9600 \cdot 27750}{4,31 \cdot 10^{11}}} = 81,0$

e_0 Spannungslose Vorverformung, $e_0 = \ell/400 = 3260/400 = 8,15 \text{ mm}$

Die Tragfähigkeiten der Wände 1 bis 3 betragen 329 kN, 383 kN und 400 kN und überschritten damit den berechneten Wert der Tragfähigkeit von 291 kN. Die Unterschiede können verschiedene Ursachen haben:

- Geringere spannungslose Vorverformung der Prüfkörper.
- Höherer Elastizitätsmodul des Holzes.
- Höherer Verschiebungsmodul der Buchenholzdübel.

Diese Betrachtungen zeigen, dass die Tragfähigkeit nach Gleichung (6) zu einer konservativen Drucktragfähigkeit zentrisch gedrückter TriqBriq WS 25 Wände führt, selbst wenn die Schwächung der durchgehenden Vertikallagen durch Bohrungen für Buchenholzdübel vernachlässigt wird.

4.2 Scheibentragfähigkeit und Steifigkeit

Die Tragfähigkeit und Steifigkeit von TriqBriq WS 25 Wandscheiben wurde in insgesamt drei Versuchen nach EN 594 an Wandprüfkörpern bestimmt. Die Prüfkörper wiesen eine Holzfeuchte von im Mittel 12,7 % auf. Die Wände wurden konservativ ohne Auflast geprüft. Bild 5 zeigt schematisch einen Wandprüfkörper.

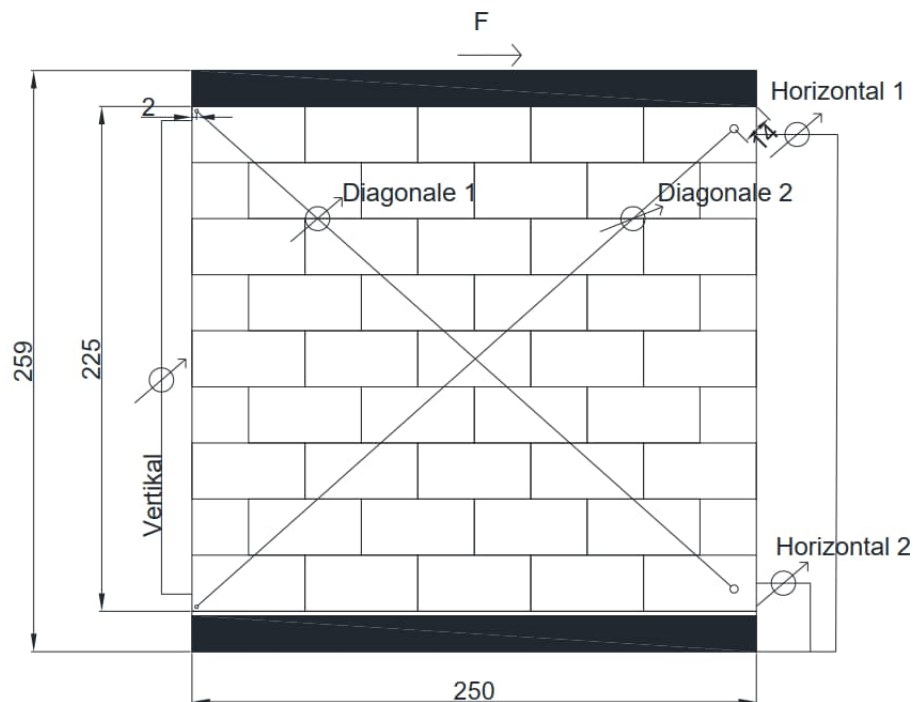


Bild 5: Ansicht der geprüften TriqBriq WS 25 Wandscheiben

Die Schubtragfähigkeit und Schubsteifigkeit einer Wand werden von der Verdübelung mit Buchenholzdübeln gewährleistet. Der nach EN 14358 berechnete charakteristische Wert der Schubtragfähigkeit der Wand pro m Länge beträgt $F_{Rk} = 12,9$ kN/m. Es wird eine charakteristische Schubtragfähigkeit von $F_{Rk} = 12$ kN/m vorgeschlagen.

Für den Nachweis der Schubverformungen der Wände wird aus den Versuchsergebnissen eine mittlere Schubsteifigkeit nach Görlacher (2012) bestimmt:

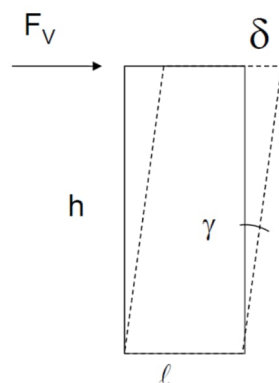


Bild 5: Schubverformungen einer Wandscheibe nach Görlacher (2012)

$$GA_{\text{ef}} = \frac{F_v}{\gamma} = \frac{F_v \cdot h}{\delta} \quad (17)$$

Die wirksame Schubsteifigkeit GA_{ef} entspricht der Wandscheibensteifigkeit R nach EN 594 mal die Wandhöhe und beträgt für die geprüften dreilagigen Wände 1060 kN.

Beschränkt man die Horizontalverformung δ im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit auf 1/500 der Wandhöhe, darf die Horizontalkraft den Wert von 1,4 kN/m nicht überschreiten. Wird der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit mit einem Grenzwert von 1/150 der Wandhöhe wie für auskragende Biegestäbe nach Tabelle 7.2 der EN 1995-1-1 zugrunde gelegt, beträgt die größte Horizontalkraft pro m Wandlänge 3,4 kN/m. Falls diese Werte nicht ausreichen, können die Schubsteifigkeiten etwaiger Beplankungen der Wände zusätzlich herangezogen werden.

5 Bemessungswerte der Tragfähigkeit und Steifigkeit

5.1 Drucktragfähigkeit

Der Bemessungswert der Drucktragfähigkeit N_{Rd} einer planmäßig zentrisch beanspruchten TriqBriq WS 25 Wand ohne planmäßige Lasten rechtwinklig zur Wandebene beträgt pro m Wandlänge:

$$N_{\text{Rd}} = \frac{k_{\text{mod}} \cdot \pi^2 \cdot EI_{\text{ef}}}{\gamma_M \cdot \ell^2} \cdot \left(1 - \frac{e_0}{k}\right) \quad (18)$$

Hierin bedeuten:

e_0 Spannungslose Vorverformung in Stabmitte, $e_0 = \ell/400$

ℓ Lichte Wandhöhe in mm

EI_{ef} Wirksame Biegesteifigkeit pro m Wandlänge, $E = 8200 \text{ N/mm}^2$ für C24, $E = 6100 \text{ N/mm}^2$ für C16, siehe Tabelle 1

k Kernweite des tragenden Querschnitts, siehe Tabelle 1

Zusätzlich ist für die Wand ein Nachweis nach EN 1995-1-1 Abschnitt 6.3.2 und Anhang C zu führen. Als tragender Querschnitt gelten dabei die beiden äußeren Vertikallagen der Wand mit einer Dicke von je 83,3 mm. Die Nachgiebigkeit infolge der mechanischen Verbindung der einzelnen Lagen der Wandbausteine sowie die Rollschubverformung der Querlagen ist zu berücksichtigen. Für den charakteristischen Wert der Druckfestigkeit für C24 darf $f_{c,0,k} = 18,9 \text{ N/mm}^2$ und für den Elastizitätsmodul $E_{0,05} = 8200 \text{ N/mm}^2$ eingesetzt werden. Die entsprechenden Werte für C16 sind $f_{c,0,k} = 15,3 \text{ N/mm}^2$ für die Druckfestigkeit und $E_{0,05} = 6100 \text{ N/mm}^2$ für den Elastizitätsmodul. Der Verschiebungsmodul für den Grenzzustand der Tragfähigkeit K_u ist zu zwei Drittel des Wertes K_{ser} anzusetzen. β_c wird wie für Vollholz mit $\beta_c = 0,2$ angenommen.

Wandhöhe [m]	2,50	2,75	3,00	3,25	3,50	3,75	4,00	
	C24							
EI_{ef} [10^{11} Nmm ²]	5,00	5,45	5,93	6,43	6,96	7,50	8,05	
k [mm]	22,9	24,4	25,9	27,3	28,8	30,2	31,6	
N_{Rk} [kN/m]	574	511	462	422	390	363	340	
	C16							
EI_{ef} [10^{11} Nmm ²]	4,26	4,69	5,14	5,61	6,09	6,58	7,07	
k [mm]	18,8	20,1	21,3	22,6	23,7	24,9	26,0	
N_{Rk} [kN/m]	449	402	365	335	310	288	268	

Der Bemessungswert der Flächenlast rechtwinklig zur Wandoberfläche darf folgenden Wert nicht überschreiten:

$$q_d \leq 8 \cdot N_{Ed} \cdot \left(k - \frac{e_0}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{crit,d}}} \right) \cdot \left(\ell^2 + \frac{5 \cdot \ell^4}{48 \cdot EI_{ef} \cdot \left(\frac{1}{N_{Ed}} - \frac{1}{N_{crit,d}} \right)} \right)^{-1} \quad (19)$$

Hierin bedeuten:

N_{Ed} Bemessungswert der Normalkraft pro m Wandlänge in N mit den Teilsicherheitsbeiwerten für günstige Auswirkung: $\gamma_G = 1,0$ und $\gamma_Q = 0$

5.2 Schubtragfähigkeit und Schubsteifigkeit

Der Bemessungswert der Schubtragfähigkeit T_{Rd} einer TriqBriq WS 25 Wand beträgt pro m Wandlänge:

$$T_{Rd} = \frac{12 \cdot k_{mod}}{\gamma_M} \text{ kN} \quad (20)$$

Der Mittelwert der wirksamen Schubsteifigkeit GA_{ef} beträgt:

$$GA_{ef} = 1060 \text{ kN} \quad (21)$$

5.3 Tragfähigkeit der TriqBriq WS 25 Stützen

Der Bemessungswert der Tragfähigkeit N_{Rd} einer TriqBriq WS 25 Stütze beträgt nach den Anhängen B und C der EN 1995-1-1:

$$N_{Rd} = \frac{k_{mod}}{\gamma_M} \cdot k_c \cdot f_{c,0,d} \cdot A \quad (22)$$

Hierin bedeuten:

k_c Beiwert nach EN 1995-1-1, 6.3.2 mit

$$\lambda_{ef} = \ell \cdot \sqrt{\frac{EA}{EI_{ef}}}$$

EI_{ef} nach EN 1995-1-1 Gleichung (B.1)

$$\gamma_1 = \gamma_3 = \lambda_{rel} = \left(1 + \frac{\pi^2 \cdot E_i \cdot A_i}{\ell^2 \cdot K/s} \right)^{-1}$$

$$E_i \cdot A_i = 9200 \cdot 2 \cdot 83,3^2 = 1,28 \cdot 10^8 \text{ N für C24}$$

$$E_i \cdot A_i = 6700 \cdot 2 \cdot 83,3^2 = 0,93 \cdot 10^8 \text{ N für C16}$$

$$K_u/s = 2 / 3 \cdot 17,4 \text{ N/mm}^2 = 11,6 \text{ N/mm}^2$$

A Querschnittsfläche der Vertikallagen, $A = 4 \cdot 83,3^2 = 27750 \text{ mm}^2$

E Elastizitätsmodul, $E = 9200 \text{ N/mm}^2$ für C24 bzw. $E = 6700 \text{ N/mm}^2$ für C16

ℓ Lichte Wandhöhe in mm

Stützenhöhe [m]	2,50	2,75	3,00	3,25	3,50	3,75	4,00
	C24						
E_{ef} [10^{11} Nmm^2]	2,44	2,63	2,83	3,05	3,27	3,51	3,75
γ	0,054	0,065	0,077	0,089	0,101	0,115	0,128
N_{Rk} [kN]	306	280	258	240	225	212	200
	C16						
E_{ef} [10^{11} Nmm^2]	2,02	2,20	2,39	2,60	2,81	3,02	3,25
γ	0,073	0,087	0,102	0,118	0,134	0,151	0,168
N_{Rk} [kN]	252	232	216	203	191	181	172

5.4 Tragfähigkeit der TriqBriq WS 25 Biegeträger

Die Tragfähigkeit von TriqBriq WS 25 Stürzen ist nach Anhang B der EN 1995-1-1 mit den Mittelwerten des Elastizitätsmoduls und $K_u = 2 \cdot K_{\text{ser}}/3$ zu bestimmen. Dabei dürfen die Schubnachweise und die Nachweise der Verbindungsmittel unberücksichtigt bleiben, da die Schubbeanspruchung gering ist. Für Spannweiten zwischen 1 m und 2 m betragen die charakteristischen Werte einer konstanten Streckenlast, die zu einer Biegespannung von $\sigma_{m,k} = 24 \text{ N/mm}^2$ (C24) bzw. $\sigma_{m,k} = 16 \text{ N/mm}^2$ (C16) führen:

Spannweite [m]	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00
	C24				
E_{ef} [10^{11} Nmm^2]	1,93	2,02	2,13	2,25	2,40
γ	0,008	0,012	0,017	0,023	0,030
Q_{Rk} [kN/m]	79,6	52,9	38,3	29,5	23,7
	C16				
E_{ef} [10^{11} Nmm^2]	1,45	1,53	1,64	1,77	1,91
γ	0,010	0,016	0,023	0,031	0,041
Q_{Rk} [kN/m]	54,4	36,5	26,8	20,9	17,0

Hierbei sind Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit nicht berücksichtigt. Diese können zu geringeren Beanspruchbarkeiten der Stürze führen.

6 Zusammenfassung

Die Firma TRIQBRIQ AG in Stuttgart strebt eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für den Einsatz von TriqBriq WS 25 Wandbauteilen, Stützen und Biegeträgern in Holzgebäuden an. Tragende und aussteifende Wandbauteile, Stützen und Biegeträger sollen in der TriqBriq WS 25 Bauweise errichtet und nach dem vorgeschlagenen Bemessungsverfahren dimensioniert werden können.

In dieser gutachtlichen Stellungnahme wurden mit Hilfe eines mechanischen Modells und auf der Basis von Tragfähigkeitsversuchen der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine des Karlsruher Instituts für Technologie Vorschläge für Bemessungswerte der Tragfähigkeit für vertikale Druckbeanspruchung sowie für Schubbeanspruchung in Wandebene abgeleitet. Zusätzlich werden Mittelwerte der Schubsteifigkeit der Wand vorgeschlagen. Die Bemessungsgleichungen sind in Abschnitt 5 zusammengestellt.

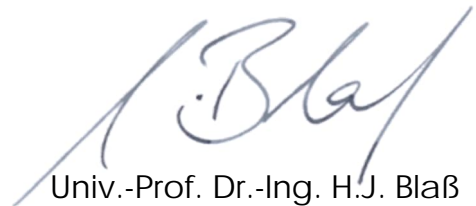
Um eine zentrische Lasteinleitung in die druckbeanspruchten Wände zu gewährleisten, werden - ähnlich wie im Mauerwerksbau - Zentrierleisten empfohlen.

Unter diesen Voraussetzungen bestehen aus unserer Sicht gegen die Erteilung einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung für TriqBriq WS 25 Wandbauteile aus C16 oder C24 keine Bedenken.

Karlsruhe, 15.11.2023



Dr.-Ing. Marcus Flaig



Univ.-Prof. Dr.-Ing. H.J. Blaß