

Stabilität von druckbeanspruchten Bauteilen aus Brettschichtholz

Stability of Glulam compression elements

La stabilité de composants en BLC en pression

Matthias Theiler
dsp Ingenieure & Planer AG
CH-Greifensee



Andrea Frangi
ETH Zürich, Institut für Baustatik und Konstruktion
CH-Zürich



Stabilität von druckbeanspruchten Bauteilen aus Brettschichtholz

1. Einleitung

Der moderne Holzbau erfreut sich seit einigen Jahrzehnten immer grösserer Beliebtheit. Dazu beigetragen hat sicher, dass die Architektur den Baustoff neu entdeckt hat. Nicht zuletzt ist der Baustoff Holz auch aufgrund seiner Nachhaltigkeit in den Fokus der Aufmerksamkeit gerückt. Infolge der industrialisierten Fertigungsprozesse können Produkte von hoher Qualität und Zuverlässigkeit hergestellt werden. Neuartige Holzwerkstoffe sowie moderne Verbinde- und Klebetechniken ermöglichen die Erschliessung neuer Anwendungsgebiete für den Holzbau. Forschung und Entwicklungen in Bezug auf die Brandsicherheit von Holzbauteilen führten zu neuen Brandschutzvorschriften, welche das Erstellen von mehrgeschossigen Bauten aus Holz ermöglichen. Dementsprechend sind auch die Anforderungen an die lastabtragenden Bauteile gestiegen. Eine zuverlässige und wirtschaftliche Bemessung ist von grosser Bedeutung.

Axiale Druckspannungen oder kombinierte axiale Druck- und Biegespannungen treten in vielen stabförmigen Holzbauteilen auf – so zum Beispiel in Stützen von Wohn- oder Hallenbauten, in Pfosten und Riegeln von Rahmentragwerken oder in Gurtungen und Streben von Fachwerken.

Das Tragverhalten von diesen Bauteilen wird durch die Zunahme der Lastexzentrizität infolge des überproportionalen Anwachsens der Verformungen bei zunehmender Last beeinflusst. Das Versagen von axial auf Druck beanspruchten Bauteilen kann durch das Erreichen der Festigkeit des Materials oder durch Verlust der Stabilität auftreten. Der Verlust der Stabilität ist gekennzeichnet durch ein plötzliches seitliches Ausweichen des Bauteils und wird als Knicken bezeichnet.

In den heute in Europa gültigen Holzbaunormen (z.B. Eurocode 5 EN 1995-1-1 (2010) oder SIA 265 (2012)) sind zwei verschiedene Konzepte zur Bemessung von Bauteilen aus Vollholz und Brettschichtholz unter Druckbeanspruchung oder unter kombinierter Druck- und Biegebeanspruchung vorhanden. Diese Konzepte sind allerdings nicht konsistent und es können grosse Abweichungen bei der Bemessung auftreten (siehe z. B. Köhler et al. (2008) oder Theiler et al. (2013)).

Im Rahmen eines Forschungsprojektes an der ETH Zürich wurde in den letzten Jahren das Tragverhalten von axial auf Druck beanspruchten Bauteilen aus Vollholz und Brettschichtholz untersucht (Theiler (2014)). Ausgehend von experimentellen und numerischen Untersuchungen wurden im Rahmen dieser Forschungsarbeit Kenntnisse zum Tragverhalten dieser Bauteile erarbeitet. Zudem wurden bestehende Bemessungskonzepte überprüft und angepasste Konzepte entwickelt. In diesem Beitrag werden die wichtigsten Resultate dieser Arbeit zusammengefasst.

2. Stabilität von druckbeanspruchten Stäbe

2.1. Elastisches und inelastisches Knicken

Wird ein schlanker Stab mit einer kontinuierlich ansteigenden axialen Druckkraft belastet, so wird das Versagen durch seitliches Ausweichen des Stabes eintreten. Dieses Phänomen wird als Knicken bezeichnet. Wenn der Stab perfekt gerade und beidseitig gelenkig gelagert ist, aus Material mit linear elastischem Verhalten und unendlich grosser Festigkeit besteht und die Last zentrisch angreift, so spricht man von einem Eulerstab (nach Leonhard Euler, 1717 – 1783). In diesem Fall verformt sich der Stab bis zum Erreichen der Verzweigungslast $F_{c,crit}$ nicht. Beim Erreichen der Verzweigungslast tritt ein plötzliches Ausknicken auf; der Stab verliert seine Stabilität. Dieses theoretische Knickverhalten des Stabes ist in Abbildung 1 (links, horizontale Linie bei $F_{c,crit}$ im Kraft-Verformungs-Diagramm) dargestellt. Die Verzweigungslast $F_{c,crit}$ lässt sich mit der nachfolgenden Formel berechnen:

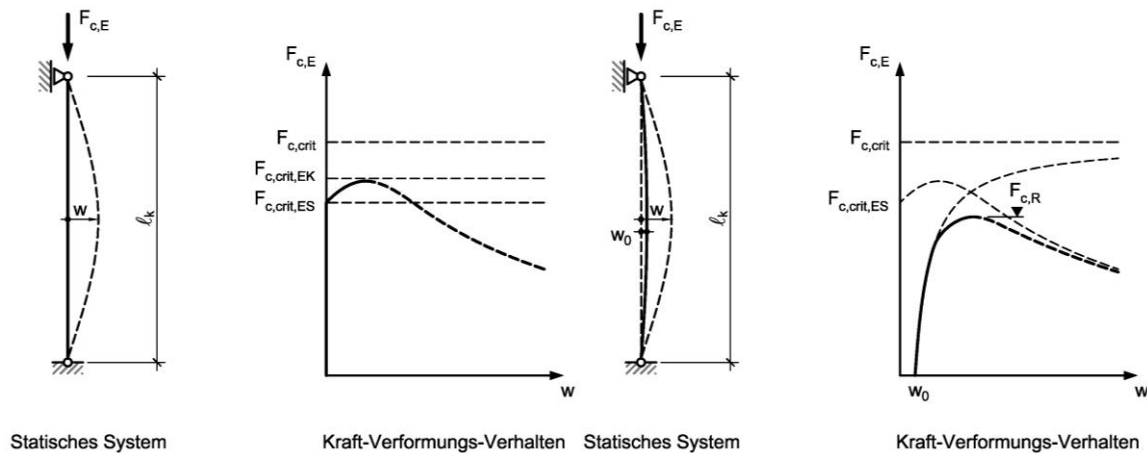


Abbildung 1 (links): Verzweigungslast eines geraden Stabes nach Euler ($F_{c,crit}$), Engesser ($F_{c,crit,ES}$), Kármán ($F_{c,crit,EK}$) und Shanley (dicke Linie).

Abbildung 1 (rechts): Kraft-Verformungs-Verhalten eines beidseitig gelenkig gelagerten Stabes mit sinusförmiger Vorverformung aus Material mit nichtlinearem Materialverhalten.

$$F_{c,crit} = \frac{\pi^2 \cdot EI}{\ell_k^2} \quad (1)$$

Dabei bezeichnet EI die Biegesteifigkeit und ℓ_k die Knicklänge des Stabes. Die mathematische Lösung des Knickproblems wurde von Euler im Jahr 1744 hergeleitet und wird noch heute als Euler'sche Knickformel bezeichnet (siehe z.B. Kollbrunner et al. (1961)). Für die Berechnung der Traglast eines realen Stabes kann die Euler'sche Knickformel nur in Sonderfällen verwendet werden. Die vorgenommene Idealisierung schränkt den Einsatzbereich stark ein. Bei gedruckten Stäben, welche aus Material mit nichtlinearem Materialverhalten bestehen, tritt bereits vor dem Erreichen der Verzweigungslast ein Versagen des Materials oder ein Plastifizieren ein. 1889 stellte Engesser seine Theorie zum inelastischen Knicken perfekt gerader Stäbe auf (Engesser (1889)). Er schlug vor, in der Euler'schen Knickformel den Elastizitätsmodul E durch den Tangentenmodul T zu ersetzen. Dabei ist der Tangentenmodul von der vorhandenen Druckspannung abhängig. Mit zunehmender Spannung nimmt der Tangentenmodul ab, wobei der Grad der Abnahme vom Materialverhalten abhängt. Die Publikation der Theorie von Engesser löste eine kontroverse Diskussion in der wissenschaftlichen Gemeinschaft aus. Im Verlauf dieser Diskussion korrigierte Engesser seine ursprüngliche Aussage und regte die Einführung eines Knickmoduls T_k an, welcher grösser ist als der Tangentenmodul T . Kármán (1910) konnte einen Knickmodul T_k für rechteckige Querschnitte herleiten. Die anhand dieser Theorie errechnete Verzweigungslast lag zwischen der Verzweigungslast von Euler und jener von Engesser und zeigte eine gute Übereinstimmung mit durchgeführten Versuchen.

Erst Jahre später konnte Shanley (1947) zeigen, dass die ursprüngliche Theorie von Engesser korrekt ist. Die mithilfe des Tangentenmoduls T berechnete Verzweigungslast stellt den Verzweigungsbeginn dar. Nach dem Erreichen der Verzweigungslast nach Engesser ($F_{c,crit,ES}$) tritt jedoch kein schlagartiges Versagen ein. Ein Stab kann Lasten grösser als $F_{c,crit,ES}$ aufnehmen, dies führt jedoch zu einer seitlichen Auslenkung des Stabes. Die Verzweigungslast nach Kármán ($F_{c,crit,EK}$) stellt einen oberen Grenzwert der Verzweigungslast dar (siehe Abbildung 1, links).

Im Gegensatz zu perfekt geraden und zentrisch gedrückten Stäben führt bei gekrümmten, exzentrisch gedrückten oder querbelasteten Stäben bereits eine kleine Belastung zu einer seitlichen Auslenkung. Mit steigender Belastung nehmen diese Verformungen überproportional zu. Es wird ein Stab aus Material mit linear elastischem Verhalten und unendlich grosser Festigkeit betrachtet, der eine sinusförmige Vorverformung w_0 aufweist. Mit zunehmender Belastung nehmen die Verformungen zu, bis sie bei Erreichen der Euler'schen Verzweigungslast unendlich gross werden (siehe Kraft-Verformungs-Verhalten in Abbildung 1, rechts).

Besteht der Stab aus einem Material mit inelastischem Materialverhalten, wird bereits vor dem Erreichen der Euler'schen Verzweigungslast ein Stabilitätsversagen auftreten. Die Kraft-Verformungs-Kurve folgt nur anfänglich der elastischen Lösung. Wenn das Material plastische Verformungen erfährt, wird die Kurve von der elastischen Lösung abweichen. Die Knicklast F_c , wird immer unterhalb der von Shanley (1947) gefundenen Lösung für perfekt gerade Stäbe liegen (siehe Abbildung 1, rechts).

2.2. Knicken von Holzstäben

Holz weist bei Druckbeanspruchung in Faserrichtung ein deutlich nichtlineares Materialverhalten auf. Linearität kann nur bis zum Erreichen der Proportionalitätsgrenze vorausgesetzt werden. Wenn die vorhandene Spannung über die Proportionalitätsgrenze hinaus gesteigert wird, reduziert sich die Steifigkeit bis schliesslich ein relativ duktiler Versagen eintritt.

Weiter muss die Inhomogenität des Materials beachtet werden. Da es sich bei Holz um einen natürlich gewachsenen Baustoff handelt, weisen die Eigenschaften von Holz eine grosse Streuung auf. Die Eigenschaften variieren zwischen Hölzern aus unterschiedlichen Wuchsregionen, es treten Streuungen zwischen verschiedenen Bäumen der gleichen Wuchsregion auf und auch innerhalb eines Baumes oder Bauteils treten beträchtliche Streuungen auf (der Variationskoeffizient liegt in der Grössenordnung von 10 bis 30% je nach Bauteiltyp und Beanspruchung).

Bei der Betrachtung des Tragverhaltens von druckbeanspruchten Bauteilen aus Holz müssen sowohl das nichtlineare Materialverhalten als auch die Streuung des Materialverhaltens berücksichtigt werden. Weiter muss beachtet werden, dass die Materialeigenschaften von verschiedenen Parametern wie zum Beispiel der Holzfeuchte oder der Dauer der Lasteinwirkung beeinflusst werden. Eine realitätsnahe Modellierung des Tragverhaltens kann nur erfolgen, wenn alle relevanten Einflüsse berücksichtigt werden.

2.3. Bemessung von druckbeanspruchten Holzstäben

Ein Holzbauteil unter Druckbeanspruchung oder unter kombinierter Druck- und Biegebeanspruchung kann auf verschiedene Arten versagen. So kann die Traglast durch die Querschnittstragfähigkeit begrenzt sein oder der Verlust der Stabilität kann zum Versagen des Bauteils führen. Weiter kann auch das Erreichen der Tragfähigkeit einer Verbindung massgebend werden. In diesem Beitrag werden lediglich Versagen infolge des Verlusts der Stabilität oder Versagen infolge des Erreichens der Festigkeit behandelt.

In der EN 1995-1-1 (2010) sind zwei verschiedene Bemessungskonzepte vorhanden, welche für die Bemessung von diesen Bauteilen verwendet werden können. Zum einen handelt es sich um ein vereinfachtes Verfahren, welches auf dem Ersatzstabverfahren beruht. Zum andern werden Angaben für die Anwendung der Theorie II. Ordnung gemacht. Bei beiden Nachweisen wird das vorhandene Stabilitätsproblem in ein Spannungsproblem überführt.

Ersatzstabverfahren

Beim Ersatzstabverfahren werden die Schnittkräfte anhand einer Tragwerksanalyse nach Theorie I. Ordnung ermittelt. Die nichtlinearen Effekte (geometrische Effekte II. Ordnung und Effekte infolge des nichtlinearen Materialverhaltens) werden mit einem Knickbeiwert k_c berücksichtigt. Der Knickbeiwert k_c wurde von Blaß (1987) abgeleitet, er wird wie folgt berechnet:

$$\sigma_{c,crit,05} = \frac{\pi^2 \cdot E_{0,05}}{\lambda^2} \quad (2)$$

$$\lambda_{rel} = \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{\sigma_{c,crit,05}}} \quad (3)$$

$$k = 0.5 \left[1 + \beta_c (\lambda_{rel} - 0.3) + \lambda_{rel}^2 \right] \quad (4)$$

$$k_c = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 + \lambda_{rel}^2}} \quad (5)$$

Dabei ist $\sigma_{c,crit,05}$ die Euler'sche Verzweigungsspannung basierend auf 5%-Fraktilwerten der Materialeigenschaften. λ ist die Schlankheit und λ_{rel} die relative Schlankheit des Stabes. $f_{c,0,k}$ ist die charakteristische Druckfestigkeit parallel zur Faser und $E_{0,05}$ der 5%-Fraktilwert des Elastizitätsmoduls. k und β_c sind Hilfswerte.

Für den allgemeinen Nachweis der Tragfähigkeit für kombinierte Druck- und Biegebeanspruchung wird ein lineares Interaktionsmodell mit Berücksichtigung des Knickbeiwertes k_c verwendet:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (6)$$

Dabei sind $\sigma_{c,0,d}$ und $\sigma_{m,d}$ die Bemessungswerte der vorhandenen Druck- beziehungsweise Biegespannungen. $f_{c,0,d}$ und $f_{m,d}$ sind die Bemessungswerte der entsprechenden Festigkeiten.

Theorie II. Ordnung

Für die Bemessung anhand der Theorie II. Ordnung werden die Schnittkräfte am verformten System bestimmt. Dazu muss davon ausgegangen werden, dass das System eine unplanmäßige Vorverformung aufweist. Es kann ein linear-elastisches Materialverhalten angesetzt werden. Folglich handelt es sich um eine linear-elastische Theorie II. Ordnung mit welcher die Vergrößerung des Biegemoments infolge geometrischer Effekte II. Ordnung berechnet wird:

$$\sigma_{c,crit,d} = \frac{\pi^2 \cdot E_{0,d}}{\lambda^2} \quad (7)$$

$$\alpha_d = \frac{1}{1 - \frac{\sigma_{c,0,d}}{\sigma_{c,crit,d}}} \quad (8)$$

$$\sigma_{m,II,d} = \sigma_{m,I,d} \cdot \alpha_d \quad (9)$$

Dabei ist $\sigma_{c,crit,d}$ der Bemessungswert der Euler'schen Verzweigungsspannung. α_d ist der Vergrößerungsfaktor nach linear-elastischer Theorie II. Ordnung. $\sigma_{m,I,d}$ und $\sigma_{m,II,d}$ sind die Biegespannungen nach Theorie I. respektive II. Ordnung. Für die Berechnung der Verzweigungsspannung wird der Bemessungswert des Elastizitätsmoduls $E_{0,d}$ verwendet. Gemäss dem Eurocode 5 EN 1995-1-1 (2010) soll für $E_{0,d}$ der mittlere Elastizitätsmodul $E_{0,mean}$ dividiert durch den Teilsicherheitsbeiwert γ_M verwendet werden.

Für den allgemeinen Nachweis der Tragsicherheit für kombinierte Druck- und Biegebeanspruchung wird ein nichtlineares Interaktionsmodell verwendet:

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,II,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (10)$$

Beurteilung der Bemessungskonzepte

Wenn man die beiden Bemessungsverfahren der EN 1995-1-1 (2010) miteinander vergleicht, stellt man fest, dass sie unterschiedliche Resultate liefern können (siehe Abbildung 2). Auch ein Vergleich mit der Norm SIA 265 (2012) zeigt Differenzen auf. Die wesentlichen Differenzen zwischen den Bemessungsverfahren betreffen die Berücksichtigung der Effekte II. Ordnung, die Materialkennwerte und der Einfluss von Holzfeuchte und Lastdauer.

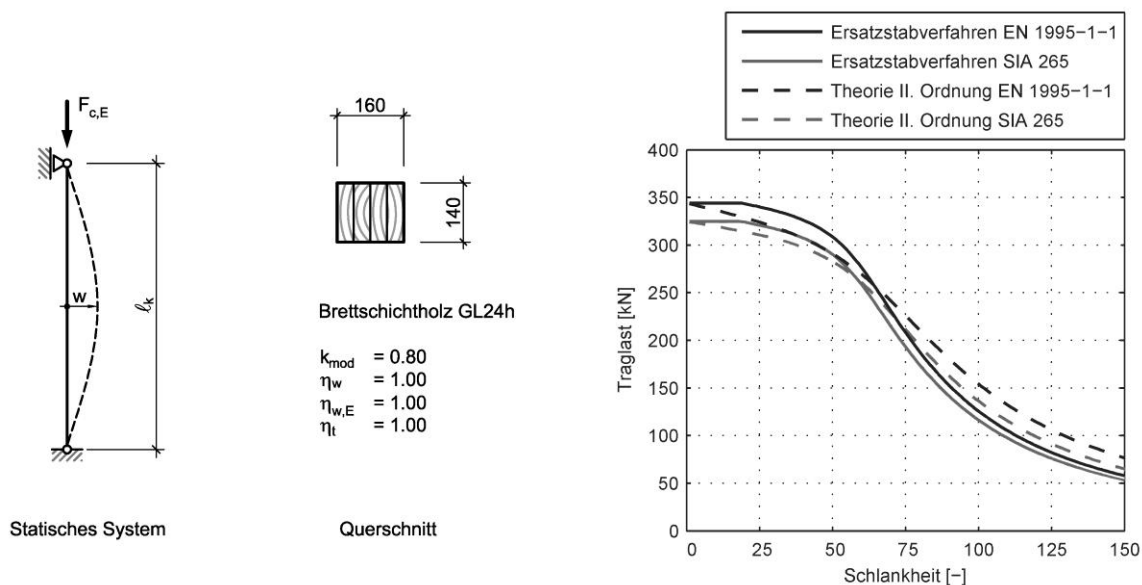


Abbildung 2: Traglast $F_{c,R,d}$ (Knicken um die starke Querschnittsachse) einer beidseitig gelenkig gelagerten Stütze in Abhängigkeit der Schlankheit λ berechnet nach Eurocode 5 EN 1995-1-1 (2010) und SIA 265 (2012).

Die Unterschiede in Bezug auf die Berücksichtigung der Effekte II. Ordnung betreffen insbesondere den Einfluss des nichtlinearen Materialverhaltens wie auch der vorhandenen Imperfektionen. Beim Ersatzstabverfahren sind diese Effekte implizit im Knickbeiwert enthalten. Bei der Anwendung der linear-elastischen Theorie II. Ordnung werden die Imperfektionen explizit berücksichtigt. Das Anwachsen der Exzentrizität infolge des nichtlinearen Materialverhaltens wird implizit durch einen reduzierten Bemessungswert des Elastizitätsmoduls parallel zur Faserrichtung berücksichtigt. In Bezug auf die Reduktion des Elastizitätsmoduls gibt es Differenzen zwischen der EN 1995-1-1 (2010) und der Norm SIA 265 (2012). So schlägt die EN 1995-1-1 (2010) vor, den mittleren Elastizitätsmodul $E_{0,mean}$ dividiert durch den Teilsicherheitsbeiwert γ_M zu verwenden. Die Schweizer Norm SIA 265 (2012) geht vom Mittelwert $E_{0,mean}$ geteilt durch γ_M/η_M aus. Dabei ist η_M ein Beiwert, welcher die Umrechnung von in Versuchen ermittelten Materialkennwerten auf für Bauteile geltende Bedingungen ermöglicht. Dadurch liefert die SIA 265 (2012) leicht kleinere Traglasten als der Eurocode 5.

Die beiden Normen weisen auch leichte Abweichungen in Bezug auf die Materialkennwerte auf. Die Norm SIA 265 (2012) geht in der Regel von etwas vorsichtigeren Festigkeits- und Steifigkeitskennwerten aus.

Sowohl die Steifigkeitseigenschaften als auch die Festigkeitseigenschaften von Holz hängen von der Holzfeuchte und der Lastdauer ab. In den Normen werden diese Einflüsse vereinfacht erfasst. In der EN 1995-1-1 (2010) werden diese Einflüsse mit einem Beiwert k_{mod} berücksichtigt. Er wird verwendet, um die Festigkeit von Holz bei erhöhter Holzfeuchte respektive bei längeren Lastdauern zu reduzieren. Eine Reduktion der Steifigkeit infolge der Einflüsse von Holzfeuchte und Lastdauer ist gemäss EN 1995-1-1 (2010) nicht erforderlich. Die Norm SIA 265 (2012) verwendet einen Beiwert η_w zur Berücksichtigung der Holzfeuchte und einen Beiwert η_t zur Berücksichtigung der Lastdauer. Im Gegensatz zur EN 1995-1-1 (2010) gibt die Norm SIA 265 (2012) einen Beiwert $\eta_{w,E}$ für die Berücksichtigung des Einflusses der Holzfeuchte auf die Steifigkeit an.

Tabelle 1: Versuchsserien und variable Parameter

Versuchs- serie	Anzahl Prüfkörper	Festigkeits- klasse	Stützenlänge L	Querschnitt $b \times h$	Schlankheit λ
1	10	GL24h	1'400 mm	140 x 160 mm	30.3
2	10	GL24h	3'200 mm	140 x 160 mm	69.3
3	10	GL24h	2'300 mm	140 x 160 mm	49.8
4	10	GL32h	1'400 mm	140 x 160 mm	30.3
5	10	GL32h	3'200 mm	140 x 160 mm	69.3

Zur Illustration der Differenzen zwischen den Bemessungsverfahren und den Normen ist in Abbildung 2 ein Beispiel dargestellt. Es handelt sich um eine gelenkig gelagerte Stütze aus Brettschichtholz GL24h. Für Schlankheitsgrade λ zwischen 0 und 150 wurden die Bemessungswerte der Traglasten mit den beiden Bemessungsverfahren gemäss den betrachteten Normen berechnet. Dabei wurde davon ausgegangen, dass die Stütze der Nutzungsklasse 1 respektive Feuchteklasse 1 zugeteilt werden kann und es wurde von einer mittleren Lastdauer ausgegangen (Klasse der Lasteinwirkungsdauer 1 respektive normale Lasteinwirkungsdauer). Ein Vergleich der Resultate zeigt, dass zwischen den beiden betrachteten Normen Abweichungen von bis zu 20% auftreten. Bei einem Vergleich der zwei Bemessungsverfahren innerhalb des Eurocode 5 EN 1995-1-1 (2010) können sogar Abweichungen von über 30% festgestellt werden. Es muss an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass es sich lediglich um ein Einzelbeispiel handelt. Je nach Bemessungssituation können die Abweichungen zwischen den Bemessungskonzepten und zwischen den Normen unterschiedlich sein. Es können dabei noch grössere Differenzen auftreten (insbesondere bei Vollholz oder bei höherer Holzfeuchte).

3. Experimentelle Untersuchungen

Im Rahmen des ETH-Forschungsprojektes wurden umfangreiche experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Es handelte sich um Versuche an Brettschichtholzstützen, welche mit einer exzentrischen Druckkraft parallel zur Faser belastet wurden. Es wurden insgesamt 50 Versuche durchgeführt, wobei verschiedene Parameter untersucht wurden. Genauere Angaben zu den durchgeführten Versuchen sind in Theiler et al. (2015) zu finden.

3.1. Material

Die Versuche wurden an 50 Brettschichtholz-Stützen durchgeführt. Alle wiesen einen Querschnitt von 140 mm x 160 mm auf. Es wurden 5 Versuchsserien gebildet, als variable Parameter wurden die Festigkeitsklasse und die Schlankheit (Stützenlänge) der Stützen untersucht. In Tabelle 1 sind die verschiedenen Versuchsserien und die entsprechenden Parameter aufgeführt.

Bevor die Prüfkörper hergestellt wurden, wurden umfangreiche Untersuchungen am Ausgangsmaterial durchgeführt. So wurden an allen für die Herstellung der Prüfkörper verwendeten Bretter die folgenden Eigenschaften ermittelt:

- Holzfeuchte mittels elektrischer Widerstandsmessung,
- Rohdichte,
- Ultraschall-Ausbreitungsgeschwindigkeit zur Charakterisierung der Steifigkeitseigenschaften,
- Astkennwerte wie der Astflächenanteil KAR (Knot Area Ratio),
- besondere Merkmale wie Markröhren, grosse Jahrringbreiten (> 6 mm) oder Harzgallen und -taschen sowie
- fotografische Dokumentation aller Seitenflächen.

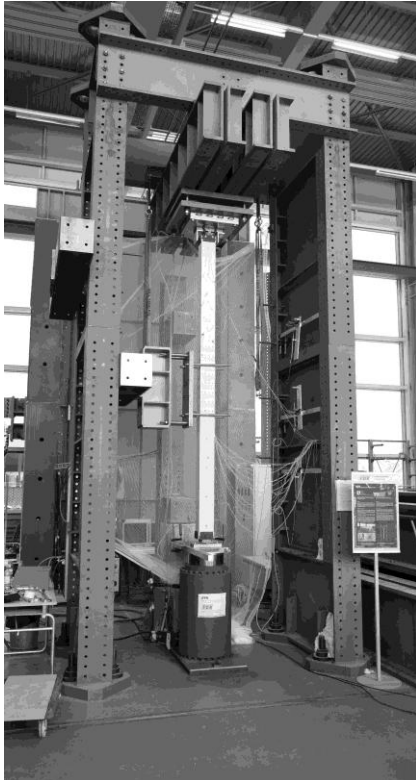


Abbildung 3: Versuchsanordnung für die Durchführung der experimentellen Untersuchungen an den Stützen der Länge $L= 3'200$ mm.

Anhand dieser Voruntersuchungen konnten einerseits Daten für die Verifizierung des numerischen Modells gewonnen werden, andererseits konnten die gewonnenen Daten auch für die Sortierung verwendet werden. Anhand einer Kombination aus visueller und maschinell unterstützter Sortierung der Bretter konnten die Bretter für die Herstellung der Prüfkörper der Festigkeitsklassen GL24h und GL32h nach SIA 265 (2012) ausgewählt werden.

Aus den sortierten Lamellen wurden die Prüfkörper hergestellt. Die Produktion erfolgte bei der Firma Neue Holzbau AG in Lungern. Sie erfolgte nach den üblichen Prozessabläufen des Werkes. Der Produktionsprozess wurde umfassend dokumentiert. So wurden bei jedem Prüfkörper die verwendeten Bretter sowie deren Lage und Ausrichtung innerhalb der Prüfkörper erfasst. Durch diese Dokumentation standen für alle Prüfkörper detaillierte Angaben zu den Materialeigenschaften zur Verfügung.

3.2. Versuchsdurchführung

Bei den durchgeführten Versuchen handelte es sich um Knickversuche. Die Prüfkörper wurden mit einer exzentrischen Normalkraft bis zum Versagen belastet. Der Versuchsaufbau für die Durchführung der Knickversuche wurde speziell für diese Versuche angefertigt (siehe Abbildung 3). Ein besonderes Augenmerk wurde auf die Lagerung der Prüfkörper gelegt. Die Lager waren so ausgebildet, dass eine gelenkige Lagerung bezogen auf die starke Querschnittsachse der Prüfkörper vorlag. Eine Rotation der Lager um die schwache Querschnittsachse war verhindert.

Während der Versuche wurden Kräfte, Verformungen und lokale Deformationen kontinuierlich gemessen. Anhand von Messungen mit Kraftmessdosen und induktiven Wegaufnehmern (lineare variable Differential-Transformatoren, LVDT) konnte das Last-Verformungs-Verhalten der Prüfkörper erfasst werden. Lokale Deformationen konnten anhand eines optischen Messsystems (NDI Optotrak Certus Motion Capture System) erfasst werden.

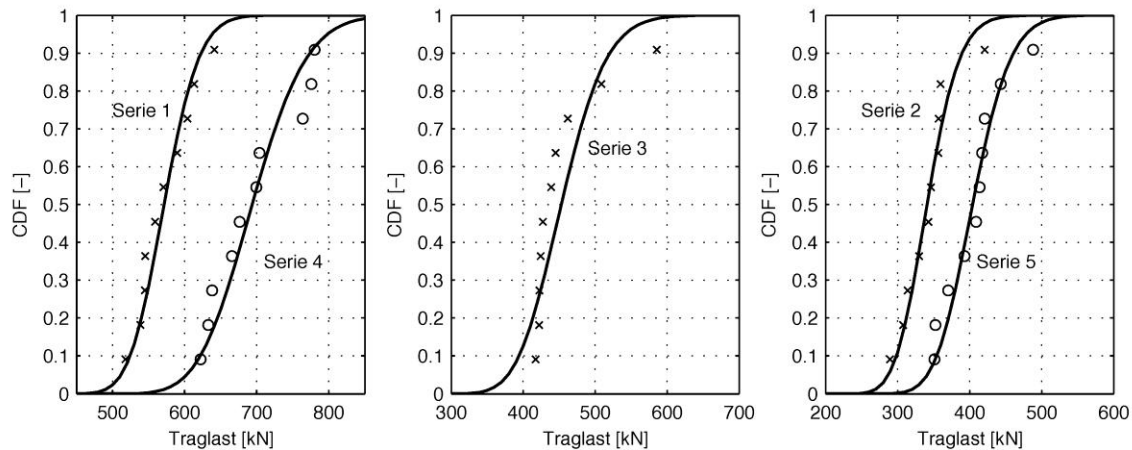


Abbildung 4: Verteilungsfunktion (CDF) der Traglasten $F_{c,R}$ der Stützen (Messwerte und angepasste logarithmische Normalverteilung) Für die Stützen der Serie 1 und 4 (links), Serie 3 (Mitte) und Serie 2 und 5 (rechts).

Bei der Durchführung der Versuche wurde die Last bis zum Versagen der Prüfkörper gesteigert. Die Versuche wurden weggesteuert durchgeführt. Die Belastungsgeschwindigkeit wurde dabei so gewählt, dass die Zeit bis zum Erreichen der Maximallast ca. 460 s betrug. Beim Erreichen der Maximallast trat im Normalfall kein sprödes Versagen auf. So konnte auch ein Teil des abfallenden Astes der Last-Verformungs-Kurve aufgezeichnet werden. Die weitere Belastung führte zu einem starken Anwachsen der horizontalen Auslenkung und schliesslich zu einem spröden Versagen unter kombinierter Druck- und Biegebelastung.

3.3. Resultate

Die Traglasten der Prüfkörper sind in Abbildung 4 dargestellt. Bei der aufgenommenen Traglast $F_{c,R}$ handelt es sich um die maximal erreichte Normalkraft. Es lässt sich feststellen, dass die Stützen aus Brettschichtholz GL32h eine im Mittel um ca. 20% höhere Traglast $F_{c,R,mean}$ aufweisen. Dies trifft sowohl auf die gedrungene Stützen mit einer Länge von $L = 1'400$ mm (GL24h: $F_{c,R,mean} = 573$ kN, $\sigma_{c,R,mean} = 25.6$ N/mm²; GL32h: $F_{c,R,mean} = 696$ kN, $\sigma_{c,R,mean} = 31.1$ N/mm²) als auch auf die schlanken Stützen mit einer Länge von $L = 3'200$ mm (GL24h: $F_{c,R,mean} = 343$ kN, $\sigma_{c,R,mean} = 15.3$ N/mm²; GL32h: $F_{c,R,mean} = 406$ kN, $\sigma_{c,R,mean} = 18.1$ N/mm²) zu. Dabei stellt $\sigma_{c,R,mean}$ die Normalspannung zum Zeitpunkt des Erreichens der maximalen Normalkraft dar. Die Streuung der Resultate innerhalb einer Versuchsserie war bei allen Versuchsserien ähnlich. Die entsprechenden Variationskoeffizienten lagen zwischen 0.07 und 0.12.

4. Numerische Untersuchungen

Im Rahmen der an der ETH Zürich durchgeführten Untersuchungen wurde auch ein mechanisches Modell entwickelt, mit dem es möglich ist, das Tragverhalten von Holzbauteilen unter Druckbeanspruchung oder unter kombinierter Druck- und Biegebeanspruchung realitätsnah abzubilden. Bei dem Modell handelt es sich um ein Gleichgewichtsmodell, bei dem das Gleichgewicht zwischen äusseren (treibenden) und inneren (rückhaltenden) Kräften am verformten System betrachtet wird. Weiter kann auch der Einfluss des nichtlinearen Materialverhaltens auf das Tragverhalten von diesen Bauteilen untersucht werden. Die Resultate der experimentellen Untersuchungen wurden verwendet, um das entwickelte Modell zu validieren. Es hat sich gezeigt, dass das Modell in der Lage ist, das Tragverhalten der exzentrisch belasteten Prüfkörper realitätsnah abzubilden. Details zum Modell sowie zur Implementierung in einer numerischen Routine und der Vergleich zwischen den experimentellen und den numerischen Untersuchungen sind in Theiler (2014) zu finden.

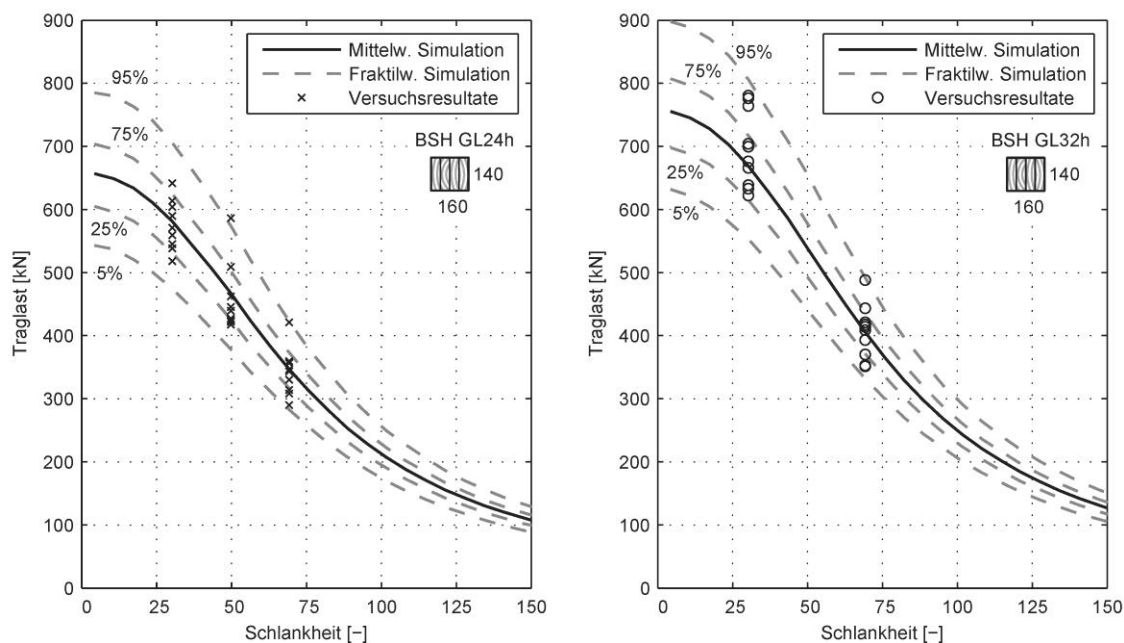


Abbildung 5: Traglast $F_{c,R}$ in Abhängigkeit der Schlankheit λ für Stützen mit einer Lastexzentrizität $w_0 = 15$ mm aus Brettschichtholz GL24h (links) und GL32h (rechts): Resultate der Monte-Carlo-Simulation und Versuchsresultate.

Eine Thematik, die bei Forschungsarbeiten im Holzbau von grosser Bedeutung ist, ist der Einfluss der Streuung der Materialeigenschaften. Die Materialeigenschaften von Holz lassen sich im Normalfall nicht exakt vorhersagen und weisen eine grosse Streuung auf. Dieser Problematik kann begegnet werden, indem bei der Modellierung die Materialeigenschaften nicht als deterministische Parameter betrachtet werden, sondern als Zufallsvariablen. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wurde dies anhand von Monte-Carlo-Simulationen berücksichtigt.

Bei der Monte-Carlo-Methode wird eine grosse Anzahl von Simulationsrechnungen durchgeführt, wobei für jede Simulationsrechnung ein Set von zufällig generierten Materialparametern verwendet wird. Dabei müssen die zufällig generierten Parameter in ihrer Gesamtheit realitätsnah sein. Dementsprechend muss die Verteilung der generierten Parameter berücksichtigt werden. Die Verteilung respektive die Streuung der Parameter wird über eine Verteilfunktion (im Normalfall wird von einer logarithmischen Normalverteilung ausgegangen), den Mittelwert und die Standardabweichung definiert. Weiter muss auch die Korrelation zwischen den verschiedenen Parametern beachtet werden. So weist ein Brett, welches einen hohen Elastizitätsmodul besitzt, im Normalfall auch eine hohe Druckfestigkeit auf. Es besteht folglich eine hohe positive Korrelation zwischen dem Elastizitätsmodul und der Druckfestigkeit.

Wenn die Verteilung der Parameter und deren Korrelation bei der Simulation berücksichtigt wird, sind die generierten Realisationen wohl zufällig, in der Summe aller Realisationen entspricht die Simulation aber in guter Näherung der real vorkommenden Grundgesamtheit.

Anhand der Monte-Carlo-Simulation wurden die durchgeführten Versuche nachgebildet. Für jede durchgeführte Versuchskonfiguration wurden 10'000 Simulationsrechnungen durchgeführt. Ein Vergleich mit den Resultaten der Versuche hat gezeigt, dass sowohl die Mittelwerte als auch die Variationskoeffizienten der Versuchsserien gut nachgebildet werden können.

Viel interessanter als der direkte Vergleich ist jedoch die Möglichkeit, die Untersuchungen auszuweiten. Anhand der Monte-Carlo-Simulation lassen sich auch Versuchsanordnungen simulieren, die im Rahmen der experimentellen Untersuchungen nicht getestet wurden. So können zum Beispiel Untersuchungen zur Stützenlänge, zur planmässigen Exzentrizität der angreifenden Last oder zu den Querschnittsabmessungen (Homogenisierungseffekt) durchgeführt werden. In Abbildung 5 sind die anhand der Monte-Carlo-Simulationen durchgeführten Untersuchungen zum Einfluss der Stützenlänge für Stützen aus Brettschichtholz GL24h und GL32h dargestellt. Es sind Mittelwerte und verschiedene Fraktilwerte der Traglast in Abhängigkeit der Stützenschlankheit abgebildet. Weiter sind auch die Versuchsresultate dargestellt.

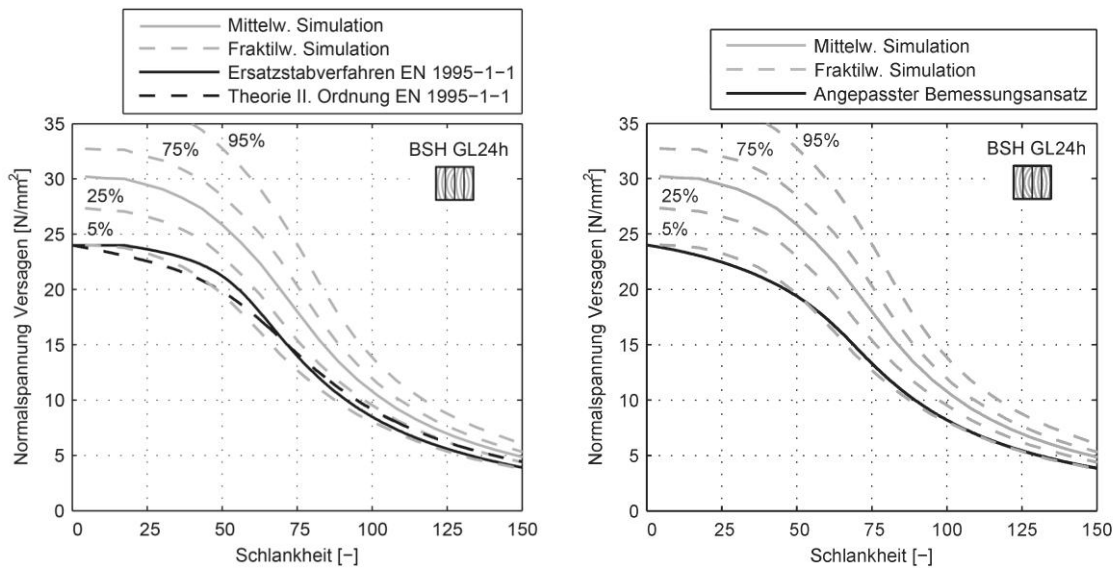


Abbildung 6 (links): Vergleich zwischen den Monte-Carlo- Simulationen und der EN 1995-1-1 (2010) für Stützen aus Brettschichtholz GL24h.

Abbildung 6 (rechts): Vergleich zwischen den Monte-Carlo- Simulationen und dem angepassten Bemessungskonzept für Stützen aus Brettschichtholz GL24h.

5. Folgerungen für die Bemessung

5.1. Bemessungskonzepte

Aus dem Vergleich zwischen den Resultaten gemäss der EN 1995-1-1 (2010) und den Resultaten der Monte-Carlo-Simulationen können Folgerungen für die Bemessung abgeleitet werden. Abbildung 6 (links) zeigt den Vergleich zwischen den charakteristischen Traglasten (5%-Fraktilwerte) gemäss der EN 1995-1-1 (2010) und den 5%-Fraktilwerten aus den Monte-Carlo-Simulationen. Beispielhaft wurde wiederum die Stütze gemäss Abbildung 2 für den Vergleich gewählt.

Anhand dieses Vergleiches können einige Differenzen zwischen den Resultaten gemäss dem Eurocode 5 EN 1995-1-1 (2010) und der Monte-Carlo-Simulationen festgestellt werden:

- Es kann eine zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen den mit dem Ersatzstabverfahren berechneten charakteristischen Werten der Traglast und den anhand der Monte-Carlo-Simulationen berechneten 5%-Fraktilwerten gefunden werden. Einzig bei Stützen mittlerer Schlankheit ($20 < \lambda < 100$) überschätzt die Norm die tatsächliche Traglast.
- Bei Stützen mittlerer und grosser Schlankheit ($\lambda > 20$) liegend die charakteristischen Werte, welche anhand der Theorie II. Ordnung gemäss der EN 1995-1-1 (2010) berechnet wurden, teilweise deutlich über den 5%-Fraktilwerten der Monte-Carlo-Simulationen. Insbesondere für schlanke Stützen ($\lambda > 100$) treten relative Differenzen von bis zu 30% auf. Die charakteristischen Werte gemäss der Norm liegen teilweise über den 25%-Fraktilwerten aus den Monte-Carlo-Simulationen.

Ausgehend von diesen Erkenntnissen lassen sich einigen Folgerungen für die beiden Bemessungskonzepte ableiten.

Die Differenzen für Stützen mittlerer Schlankheit beim Ersatzstabverfahren sind verhältnismässig klein. Sie resultieren wohl aus Unterschieden zwischen den Materialeigenschaften welche die Grundlage für die Bestimmung des Knickbeiwertes k_c bildeten (Untersuchungen von Blaß (1987)) und den Materialeigenschaften welche für die an der ETH Zürich durchgeführten Untersuchungen verwendet wurden.

Für die Überschätzung der Traglast bei der Anwendung der Theorie II. Ordnung gemäss der EN 1995-1-1 (2010) für Stützen mit einer Schlankheit $\lambda > 50$ lassen sich zwei Hauptgründe finden:

- Das Bemessungskonzept für die Anwendung der Theorie II. Ordnung basiert auf Mittelwerten des Elastizitätsmoduls parallel zur Faserrichtung. Da der Elastizitätsmodul relevant für die Traglast ist, sollte die Bemessung auf dem 5%-Fraktilwert basieren (gleiche Basis wie Festigkeitseigenschaften).
- Die Überführung des vorhandenen Gleichgewichtsproblems in ein Spannungsproblem führt zu Ungenauigkeiten bei der Berücksichtigung des Einflusses des nichtlinearen Materialverhaltens.

Ausgehend von diesen Erkenntnissen wurde in Theiler (2014) ein angepasstes Bemessungskonzept vorgeschlagen. Dabei wird das grundlegende Bemessungskonzept (Formeln (7) bis (10)) nicht verändert. Für die Berechnung der Schnittkräfte nach linear-elastischer Theorie II. Ordnung soll jedoch anstelle des Bemessungswertes des Elastizitätsmoduls $E_{0,d}$ ein Bemessungswert des Knickmoduls $T_{k,d}$ verwendet werden. Dieser kann ausgehend vom 5%-Fraktilwert des Elastizitätsmoduls $E_{0,05}$ bestimmt werden.

Für $\sigma_{c,0,d}/f_{c,0,d} \leq 0.5$ gilt:

$$T_{k,d} = \frac{E_{0,05}}{\gamma_M} \quad (11)$$

ansonsten gilt:

$$T_{k,d} = \frac{E_{0,05}}{\gamma_M} \cdot \left[1 - \left(2 \cdot \frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} - 1 \right)^{\beta_T} \right] \quad (12)$$

Dabei ist β_T ein Beiwert welcher anhand der Monte-Carlo-Simulationen bestimmt wurde. Für Vollholz kann ein Wert von $\beta_T = 3.0$ und für Brettschichtholz ein Wert von $\beta_T = 4.0$ verwendet werden.

Ein ähnliches Konzept wurde bereits von Roš et al. (1931) vorgeschlagen. Auch in der Norm SIA 164 (1981) war für Fachwerkstäbe mit einer Schlankheit von $\lambda < 100$ eine Reduktion der Steifigkeit vorgesehen (siehe auch Dubas (1981)).

Ein Vergleich zwischen dem angepassten Bemessungskonzept und den Monte-Carlo-Simulationen ist in Abbildung 6 (rechts) dargestellt. Die charakteristischen Traglasten gemäss dem angepassten Bemessungskonzept zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den 5%-Fraktilwerten der Monte-Carlo-Simulationen.

Das vorgeschlagene Bemessungskonzept führt jedoch zu einer aufwändigen Bemessung. Die Steifigkeit des Bauteils hängt von dessen Belastung ab. Bei statisch unbestimmten Systemen führt dies dazu, dass die Steifigkeit und die Beanspruchung iterativ bestimmt werden müssen. Zudem kann der Knickmodul $T_{k,d}$ für unterschiedliche Bemessungssituationen unterschiedlich gross sein. Als Vereinfachung kann die Formel (11) unabhängig von der vorhandenen Druckspannung verwendet werden. Diese Vereinfachung führt in aller Regel zu guten Resultaten, ohne dass die Steifigkeit von der Belastung abhängig ist. Die Vereinfachung entspricht auch dem Konzept, welches in der zurückgezogenen DIN 1052 (2008) verwendet wurde. In der DIN 1052 (2008) wird noch präzisiert, dass dieses Konzept nur für Einzelbauteile anzuwenden ist. Für Systeme kann der mittlere Elastizitätsmodul anstelle des 5%-Fraktilwertes verwendet werden. Damit wird berücksichtigt, dass bei Systemen aus mehreren Stäben eine Homogenisierung und ein Lastausgleich zwischen den verschiedenen Einzelbauteilen des Systems erfolgen kann.

5.2. Holzfeuchte und Lastdauer

Obwohl der Schwerpunkt der an der ETH Zürich durchgeführten Forschungsarbeit nicht auf dem Einfluss von Holzfeuchte und Lastdauer lag, lassen sich dennoch einige Folgerungen für die Bemessung ableiten.

Beim Ersatzstabverfahren wird der Einfluss von Holzfeuchte und Lastdauer vereinfacht erfasst. So werden beim Nachweis der Tragfähigkeit nach Formel (6) die Festigkeiten mit dem Faktor k_{mod} reduziert. Es handelt sich um eine globale Reduktion der Traglast.

Es wird nicht unterschieden, ob für das Versagen die Festigkeit oder die Steifigkeit (Stabilitätsversagen) verantwortlich ist. Da die Festigkeitseigenschaften im Allgemeinen stärker von Holzfeuchte und Lastdauer beeinflusst werden, handelt es sich um eine auf der sicheren Seite liegende Vereinfachung.

Bei der Anwendung der Theorie II. Ordnung wird der Einfluss von Holzfeuchte und Lastdauer nur ungenügend berücksichtigt. So wird in der EN 1995-1-1 (2010) keine Reduktion der Steifigkeit zur Berücksichtigung der Einflüsse der Holzfeuchte und der Lastdauer vorgenommen. Es werden lediglich die Festigkeitseigenschaften mit dem Faktor k_{mod}

reduziert. In der Norm SIA 265 (2012) wird eine Reduktion der Steifigkeit zur Berücksichtigung der Holzfeuchte vorgenommen, was zu besseren Resultaten führt. Bei der Anwendung des Eurocode 5 EN 1995-1-1 (2010) ist daher Vorsicht geboten bei der Bemessung von druckbeanspruchten Bauteilen der Nutzungsklasse 2 und 3 anhand der Theorie II. Ordnung.

Nicht abgedeckt durch diese Beiwerte sind die Effekte infolge Kriechens des Holzes. Bei Bauteilen, welche nicht oder nur teilweise vor der Witterung geschützt sind und bei denen die ständigen und quasi-ständigen Lasten einen wesentlichen Anteil der Gesamtlast ausmachen, sollten Kriecheinflüsse berücksichtigt werden. In der zurückgezogenen Norm DIN 1052 (2008) wurde vorgeschlagen eine Reduktion der Steifigkeit mit dem Faktor $1/(1+\varphi)$ vorzunehmen, wenn der Anteil der ständigen und quasi-ständigen Lasten 70% der Gesamtlast überschreitet. Dabei ist φ der Kriechfaktor.

6. Schlussfolgerungen

Ausgehend von den durchgeführten Untersuchungen konnten die in der EN 1995-1-1 (2010) vorhandenen Bemessungskonzepte beurteilt werden und es konnten einige Verbesserungsvorschläge gemacht werden. So konnte gezeigt werden, dass die Bemessung anhand des Ersatzstabverfahrens im Normalfall zu sicheren und wirtschaftlichen Resultaten führt. Demgegenüber konnte auch gezeigt werden, dass die Bemessung von Holzbauteilen unter Druckbeanspruchung oder unter kombinierter Druck- und Biegebeanspruchung anhand der Theorie II. Ordnung zu einer Überschätzung der Traglast führen kann. Insbesondere für Bauteile grosser Schlankheit ($\lambda > 100$) kann die Überschätzung der Traglast bis zu 30% betragen.

Anhand der gewonnenen Erkenntnisse wurde ein angepasstes Bemessungskonzept vorgeschlagen. So wird vorgeschlagen für die Bemessung der Schnittkräfte anhand der Theorie II. Ordnung ein Bemessungswert des Knickmoduls $T_{k,d}$ zu verwenden. Dieser kann vereinfacht ausgehend vom 5%-Fraktilwert des Elastizitätsmoduls anhand der Formel (11) bestimmt werden. Der Einfluss von Holzfeuchte und Lastdauer wird bei der Anwendung der Theorie II. Ordnung anhand der EN 1995-1-1 (2010) nur ungenügend erfasst. Bei der Bemessung von Bauteilen der Nutzungsklasse 2 und 3 ist daher Vorsicht geboten (die Anwendung des Ersatzstabverfahrens ist vorzuziehen). Kriecheinflüsse sollten zusätzlich berücksichtigt werden, wenn das zu bemessende Bauteil nicht oder nur teilweise vor der Witterung geschützt ist und die ständigen und quasi-ständigen Lasten einen wesentlichen Anteil der Gesamtlast ausmachen.

7. Literatur

- [1] Blaß H.J. (1987). Tragfähigkeit von Druckstäben aus Brettschichtholz unter Berücksichtigung streuender Einflussgrößen. Dissertation, Universität Fridericiana Karlsruhe, Karlsruhe.
- [2] DIN 1052 (2008). Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken – Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.
- [3] Dubas P. (1981). Stabilitätsprobleme. In: Einführung in die Norm SIA 164 (1981) – Holzbau, Lehrstuhl für Baustatik und Stahlbau, ETH Zürich, Zürich. 119–154.
- [4] EN 1995-1-1 (2010). Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau. Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.
- [5] Engesser F. (1889). Ueber die Knickfestigkeit gerader Stäbe. Zeitschrift des Architekten- und Ingenieur-Vereins zu Hannover, 35. 455–462.
- [6] Kármán T. (1910). Untersuchungen über Knickfestigkeit. In: Mitteilungen über Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens insbesondere aus den Laboratorien der technischen Hochschulen, Heft 81, Springer, Berlin, Heidelberg.
- [7] Köhler J., Frangi A., Steiger R. (2008). On the role of stiffness properties for ultimate limit state design of slender columns. In: Proceedings of CIB-W18 Meeting 41, Paper No. 41-1-1, St. Andrews.
- [8] Kollbrunner C., Meister M. (1961). Knicken, Biegedrillknicken, Kippen, Zweite Auflage. Springer, Berlin, Göttingen, Heidelberg.
- [9] Roš M., Brunner J. (1931). Die Knickfestigkeit der Bauhölzer. In: Kongress des internationalen Verbandes für Materialprüfung, Zürich.
- [10] Shanley F. (1947). Inelastic column theory. Journal of the Aeronautical Sciences, 14 (5), 261–268.
- [11] SIA 164 (1981). Holzbau. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich.
- [12] SIA 265 (2012). Holzbau. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich.
- [13] Theiler M., Frangi A., Steiger R. (2013). Strain-based calculation model for centrally and eccentrically loaded timber columns. Engineering Structures, 56. 1103–1116.
- [14] Theiler M. (2014). Stabilität von axial auf Druck beanspruchten Bauteilen aus Vollholz und Brettschichtholz. Dissertation, ETH Zürich, Zürich.
- [15] Theiler M., Frangi A. (2015): Knickversuche mit Brettschichtholzstützen unter exzentrischer Normalkraftbeanspruchung. IBK-Bericht Nr. 361, Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, Zürich.