

**IGF-Vorhaben Nr. 21285 N**

**Optimierung des Ersatzstabverfahrens für biegedrillknickgefährdete Bauteile aus Holz unter Momenten-Normalkraft-Belastung**

Projektlaufzeit: 01.01.2021 bis 31.12.2023

**Forschungsstelle**

Universität Stuttgart  
Institut für Konstruktion und Entwurf  
Pfaffenwaldring 7  
70569 Stuttgart

Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann  
Janusch Töpler, M.Sc.

**Stichworte**

Stabilität, Biegedrillknicken, Momenten-Normalkraft-Interaktion

**Forschungsfrage**

Ziel des Forschungsvorhabens war es, durch maßstabsgetreue Biegedrillknickversuche (BDK-Versuche) an Brettschichtholz-Trägern (BSH-Träger) aus Nadelholz, siehe Abb. 1, die Datenbasis für analytische und numerische Untersuchungen zu schaffen, anhand derer das kombinierte  $k_c$ - $k_m$ -Verfahren für Biegedrillknicknachweise durch eine Überarbeitung der Momenten-Normalkraft-Interaktionsbeziehung wirtschaftlich optimiert werden sollte.

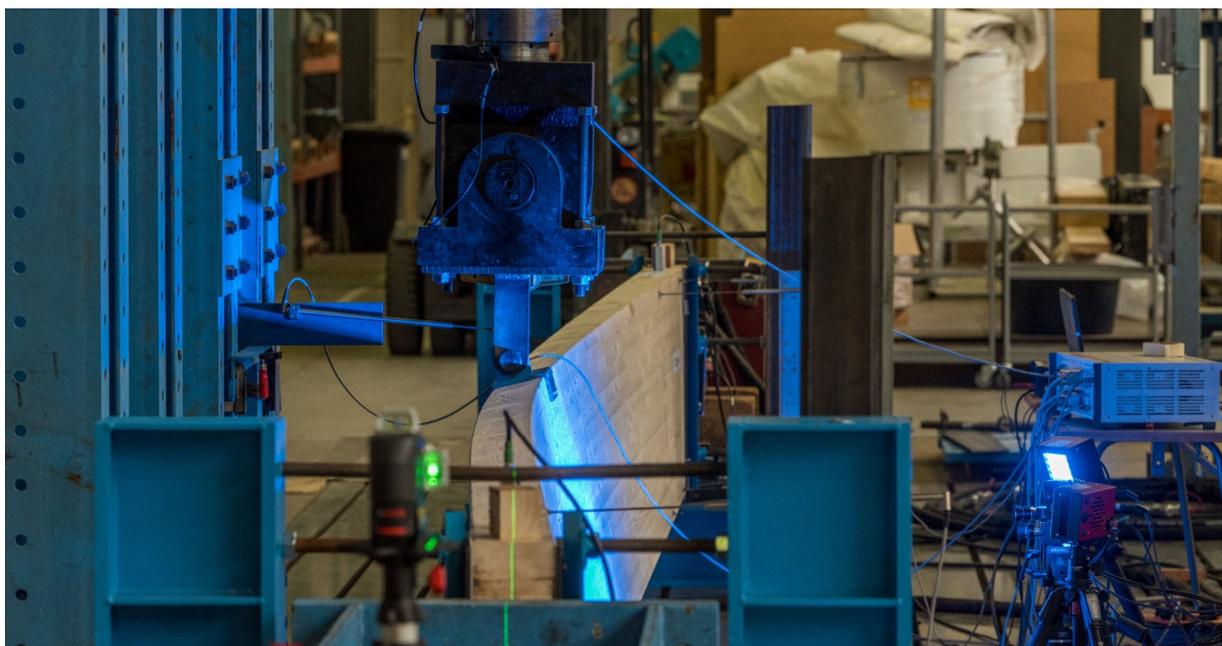


Abb. 1 Biegedrillknickversuch Träger T02.

## Stand der Technik

Die Biegeknick- (BK) und Biegedrillknick- (BDK) Bemessung erfolgt aktuell nach DIN EN 1995-1-1:2010+NA:2013. In prEN 1995-1-1:2024 wird im Vergleich zu DIN EN 1995-1-1:2010+NA:2013 zur konservativen linearen  $N_x$ - $M_{y,1}$ -Interaktionsbeziehung zurückgekehrt, die zu deutlich unwirtschaftlicheren Querschnitten bei Anwendung des  $k_c$ - $k_m$ -Verfahrens für Bauteile mit kombinierter Biegung und axialem Druck führt. Für genauere analytische Untersuchungen können die Gleichungen zur Schnittgrößenberechnung nach Theorie 2. Ordnung (T2O) verwendet werden. Gleichungen, die eine genauere Berücksichtigung des Druckplastizierens ermöglichen, ergeben sehr ähnliche Ergebnisse bei deutlich höheren Rechenzeiten als die T2O. Für die genaue Modellierung wurde deshalb auf die deutlich flexiblere Finite-Elemente-Methode zurückgegriffen.

## Experimentelle Untersuchungen

Es wurden 19 BDK-Versuche an BSH-Trägern mit einer Länge von 6 bis 8 m, Höhe von 72 bis 48 cm und 12 cm Breite mit reiner Momenten- und kombinierter Momenten-Normalkraft-Belastung durchgeführt, siehe Abb. 1. Zur Nachrechnung der BDK-Versuche wurde vorab an jedem Versuchskörper je ein elastischer Biegeversuch hochkant, flachkant und ein Torsionsversuch durchgeführt und die Biege- und Torsionssteifigkeiten der BSH-Träger ermittelt. Für die numerische Materialmodellierung wurden zudem 8 Druckversuche parallel zur Faser an Reststücken der BSH-Lamellen der BDK-Versuchskörper durchgeführt und die Spannungs-Dehnungs-Beziehung ermittelt. Die Versuche wurden an der FMPA Cottbus durchgeführt.

Die Last-Verformungs-Kurven der meisten Versuchskörper hatten ein ausgeprägt nichtlineares Verhalten, siehe Abb. 2. Nur das Verhalten von drei Trägern entsprach eher einem reinen Biegeversuch als einem Biegedrillknickversuch, siehe T15 in Abb. 2. Es ist somit praktisch möglich, dass Träger trotz entsprechender Imperfektionsempfindlichkeit kein seitliches Ausweichen und Stabilitätsversagen zeigen, wenn die Imperfektionen entsprechend gering sind. Die

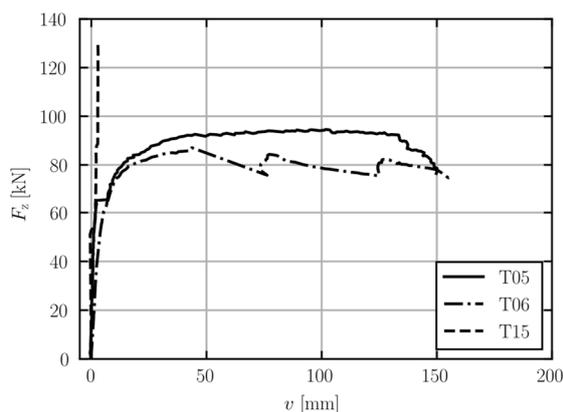


Abb. 2 BDK-Versuche T05, T06, and T15; vertikale Zylinderkraft  $F_z$  dargestellt über die horizontale Verformung der Trägerachse in Feldmitte  $v$ .

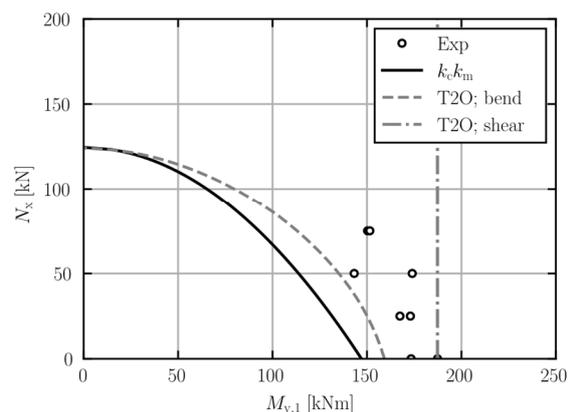


Abb. 3 Experimentell ermittelte Tragfähigkeiten von T04 bis T10 mit Abmessungen 8000 mm x 600 mm x 120 mm im Vergleich zu Ergebnissen des  $k_c$ - $k_m$ -Verfahrens und Nachweis mit Schnittgrößen nach T2O nach DIN EN 1995-1-1:2010; T2O mit Biege- (bend) und Schubnachweisen (shear).

Biegetragfähigkeit wurde erst signifikant durch die Normalkraft beeinflusst, wenn die Normalkraft einen Grenzwert überschritt, oberhalb 50 kN für Träger mit Abmessungen 8000 mm x 600 mm x 120 mm in Abb. 3. Große Normalkräfte reduzierten die Biegetragfähigkeit. Die Biegedrillknickbemessung nach DIN EN 1995-1-1:2010 lag im Vergleich zu den Versuchsergebnissen stets auf der sicheren Seite. Für die Träger mit 8 m Länge ergaben sich experimentell ca. 20 %, für die Träger mit 6 m Länge ca. 50 % höhere Biegetragfähigkeiten. Die Versuchsergebnisse belegten die nichtlineare Charakteristik der Momenten-Normalkraft-Interaktion, die für die untersuchten Schlankheiten gut durch die Interaktionsformeln in DIN EN 1995-1-1:2010 abgebildet werden konnte, siehe Abb. 3. Das Versagen trat als Zug- oder Schubversagen lokal und als Bauteilversagen auf. Während die 6 m langen Träger mit den verhältnismäßig höheren Tragfähigkeiten auf Biegung versagten, trat bei den 8 m langen Trägern ein unerwartetes vorzeitiges lokales Schubversagen auf, das die Steifigkeiten reduzierte, horizontale Verformungen erhöhte und folglich die Tragfähigkeit um 10 % bis 20 % reduzierte.

### Numerische Untersuchungen

Es wurde ein numerisches (FE) Modell zur Untersuchung des BDK- und BK-Verhaltens schlanker Holzbauteile unter Momenten-Normalkraft-Beanspruchung unter Berücksichtigung des geometrisch und des materiell nichtlinearen Verhaltens, streuender geometrischer und struktureller Imperfektionen und streuender Biegefestigkeiten entwickelt. Das Modell wurde umfassend verifiziert und anhand der experimentellen Ergebnisse und Werten aus der Literatur validiert. Schließlich wurden mit dem Modell umfangreiche Parameterstudien mit mehreren 10.000 Berechnungen zur Ermittlung von Ersatzimperfektionen für die BDK-Bemessung und Untersuchung der Momenten-Normalkraft-Interaktion durchgeführt, siehe Abb. 4 und Abb. 5. Die Ermittlung der Ersatzimperfektionen erfolgte für BSH-Träger aus GL 24h bei konstanter Biegebelastung mit verschiedenen  $H/B$ -Verhältnissen. Die Momenten-Normalkraft-Interaktion

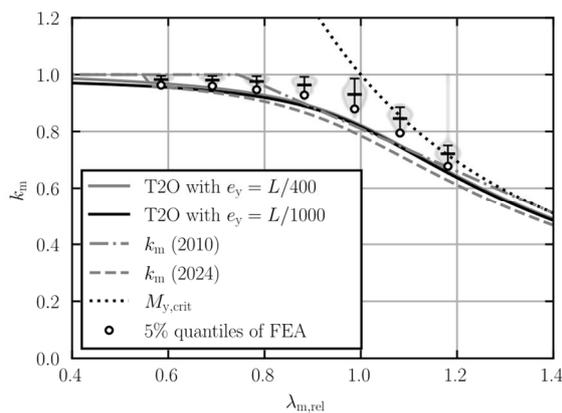


Abb. 4 Streuung von  $k_m$  bei streuenden geometrischen Imperfektionen aus FE-Berechnungen; Violinplots mit 5 % Quantilwerten (Kreis), Mittelwerten (mittlerer Balken) und 95 % Quantilwerten (oberer Balken); Ergebnisse des  $k_m$ -Verfahrens nach DIN EN 1995-1-1:2010, des  $k_m$ -Verfahrens nach prEN 1995-1-1:2024 mit  $e_{y,eqi} = L/1000$  und  $e_{\theta,mid,eqi} = 0,5 (L/1500H + 1/100)$  und von Schnittgrößenberechnungen nach T20 mit denselben Imperfektionen sowie  $e_{y,eqi} = L/400$  und  $e_{\theta,mid,eqi} = 0$ .

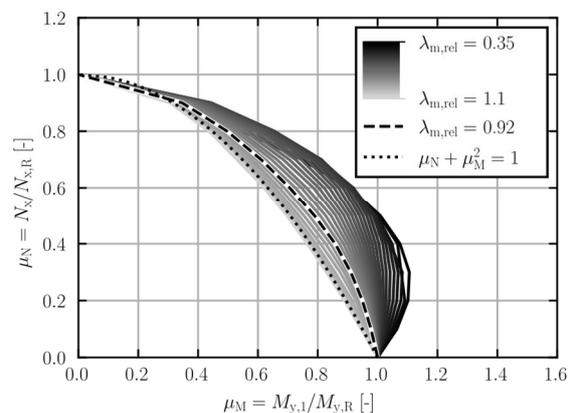


Abb. 5 Relative Drucktragfähigkeit  $N_x/N_{x,R}$  über die relative Biegetragfähigkeit  $M_{y,1}/M_{y,R}$  aus FE-Berechnungen (ohne Berücksichtigung Schubversagen) bei variierender relativer BDK-Schlankheit  $\lambda_{m,rel}$ ; GL 24h,  $H/B = 4$  und konstante Biegebelastung; mit  $M_{y,R}$  als Tragfähigkeit bei reiner Biegebeanspruchung und  $N_{x,R}$  als Tragfähigkeit bei reiner Druckbeanspruchung inklusive Stabilitätsverhalten.

wurde für Bauteile aus GL 24h, GL 30c und GL75, für konstante Momentenbelastung, eine Einzellast in Feldmitte und eine Gleichstreckenlast für verschiedene  $H/B$ -Verhältnisse durchgeführt.

Für große  $H/B$ -Verhältnisse trat in FE-Berechnungen ein signifikanter Einfluss der Plattenbiegung um die x-Achse (Plattenbiegung über die Trägerhöhe um die Längsachse) auf, der zu einer Erhöhung der Eigenwerte und der Tragfähigkeiten führte.

Für  $L/H < 6$  führte die Querschnittsverwölbung infolge Schub bei Querkraften zu einer deutlichen Erhöhung der Biegespannungen, die zu berücksichtigen ist.

Der Einfluss streuender struktureller und geometrischer Imperfektionen in BK- und BDK-Bemessungen von BSH-Bauteilen kann entweder durch eine Ersatzimperfektion Vorkrümmung  $e_{y, \text{equi}} = L/1000$  und eine Ersatzimperfektion Vorverdrehung in Feldmitte  $e_{\theta, \text{mid, equi}} = 0,5 (L/1500H + 1/100)$  oder nur durch eine Ersatzimperfektion Vorkrümmung  $e_{y, \text{equi}} = L/400$  berücksichtigt werden, siehe Abb. 4. Der Einfluss geometrischer Imperfektionen auf die BDK-Tragfähigkeit war maßgebend. Zusätzliche strukturelle Imperfektionen hatten keinen nennenswerten Einfluss.

Für geringe Schlankheiten um  $\lambda_{m, \text{rel}} = 0,3$  führte das Plastizieren zu einer ausgeprägt nichtlinearen Interaktionsbeziehung, siehe Abb. 5. Für  $H/B \geq 2$  war die Interaktionsbeziehung auch für große Schlankheiten infolge der nichtlinearen Interaktion von Moment und axialer Druckkraft bei der kritischen Biegedrillknicklast nichtlinear.

### **Bemessungsvorschlag**

Auf Grundlage der experimentellen und numerischen Ergebnisse wurden Vorschläge zur Überarbeitung des  $k_c$ - $k_m$ -Verfahrens und des Nachweises mit Schnittgrößen nach T20 nach DIN EN 1995-1-1:2010+NA:2013 gemacht. Wesentliche Teile sind

- das Beibehalten des Quadrierens des Momentenanteils in der BDK-Bemessung nach DIN EN 1995-1-1:2010 (die lineare Interaktion nach prEN 1995-1-1:2024 liefert deutlich konservativere und unwirtschaftliche Ergebnisse),
- der Vorschlag einer mechanisch begründeten Gleichung zur Berechnung von  $k_m$ ,
- die Einführung des Beiwerts  $k_{pl, c}$  zur Berücksichtigung des negativen Einflusses des Druckplastizierens auf die Biegeknicktragfähigkeit in Abhängigkeit des Materials,
- die Einführung des Beiwerts  $k_{pl, m}$  zur Berücksichtigung des negativen Einflusses des Schubplastizierens auf die Biegedrillknicktragfähigkeit in Abhängigkeit der Belastung (ob nennenswerte Querkraften vorhanden sind oder nicht),
- die Einführung des Grenzkriteriums  $L/H \geq 6$  für die Anwendung der Balkentheorie zur Ermittlung von Biegespannungen und für DIN EN 1995-1-1/NA:2013 Gleichung (NA.172) zur Ermittlung der Ersatzstablänge für Biegedrillknicken  $L_{ef, m}$ ,
- die Verwendung von Bemessungssteifigkeiten bei geometrisch nichtlinearen Berechnungen.

Vergleichsberechnungen zeigten, dass das  $k_c$ - $k_m$ -Verfahren in DIN EN 1995-1-1:2010 ein praxisgerechtes Verfahren für eine wirtschaftliche Bemessung ist. Durch punktuelle Änderungen, siehe oben, wird die Zuverlässigkeit des Bemessungsverfahrens erhöht.

## **Zusammenfassung**

Auf Basis maßstabgetreuer BDK-Versuche an BSH-Trägern wurde ein numerisches Modell entwickelt und validiert. Mit diesem Modell wurden umfangreiche Parameterstudien mit streuenden Eingangswerten zur Ermittlung von Ersatzimperfectionen und Untersuchung der Momenten-Normalkraft Interaktion von biegedrillknickgefährdeten BSH-Trägern durchgeführt. Anhand der Ergebnisse wurden punktuelle Änderungen der Bemessungsverfahren in DIN EN 1995-1-1:2010+NA:2013 vorgeschlagen.

## **Danksagung**

Wir danken den Mitarbeitenden und Prof. Dr.-Ing. Mathias Euler der Forschungs- und Materialprüfanstalt (FMPA) der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg für die Durchführung der Versuche. Des Weiteren danken wir Schaffitzel Holzindustrie GmbH + Co. KG für die Bereitstellung der Probekörper und Microtec Srl GmbH für das Bereitstellen der Sortierdaten. Einen herzlichen Dank auch an die Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses für die anregenden Diskussionen und wertvollen Anmerkungen.

Das IGF-Vorhaben 21285 N der Forschungsvereinigung Internationaler Verein für Technische Holzfragen e. V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Der vollständige Bericht kann bestellt werden bei: Internationaler Verein für Technische Holzfragen e.V. (iVTH e.V.) Riedenkamp 3, 38108 Braunschweig.