

Zur Leistungsfähigkeit, korrekten Anwendung und Kontrolle von EDV-Programmen für die Berechnung räumlicher Stabwerke im Stahlbau (Teil 3)

(Fortsetzung aus Heft 7/2008 und Schluss)

8 Kontrolle von Voreinstellungen, Teilsicherheitsfaktoren, Lastkombinationen usw.

Vor der Nutzung eines neuen EDV-Programms kommt der Überprüfung der Voreinstellungen und der richtigen Handhabung besondere Bedeutung zu, was stets an ganz einfachen, mit Handrechnungen nachvollziehbaren Beispielen geschehen sollte. Von herausragender Bedeutung ist sicherlich der Umgang (des Programmherstellers und des Nutzers!) mit den Teilsicherheitsfaktoren und den Lastkombinationen. Aber auch die Wahl optional angebotener Berechnungsverfahren (Th. I./II./III. Ordnung), numerischer Lösungsmethoden, zusätzlicher Stabteilungen usw. kann für die Güte der Ergebnisse eine entscheidende Rolle spielen. Ein Sonderproblem ist mit der Voreinstellung „Zugentlastung“ verbunden, auf das im nächsten Kapitel genauer eingegangen wird.

Stellvertretend für den gesamten Komplex wird hier die Überprüfung des Material-Teilsicherheitsfaktors γ_M am Beispiel des Verzweigungslastfaktors η_{Ki} gezeigt. Wenn in den Ausgabeprotokollen die Indizes „k“ für „charakteristisch“ und „d“ für „Design“ fehlen, muss geprüft werden, ob sich der ausgegebene Wert auf den charakteristischen bzw. den Design-Wert der Steifigkeit bezieht, eine Frage, die die Sicherheit gegen Biegeknicken immerhin mit 10 % beeinflusst. (Darüber hinaus wäre zu klären, auf welches Lastniveau im Programm der η_{Ki} -Wert bezogen ist.)

Als Beispiel wird die Kragstütze nach Bild 13 gewählt. Maßgebend ist das Biegeknicken bezüglich der schwachen Querschnittsachse z-z. Die

Handrechnung liefert mit $\gamma_M = 1,1$ die Biegeknicklast $F_{z,Ki,d} = 178$ kN und den auf das Designlast-Niveau bezogenen Verzweigungslastfaktor $\eta_{Ki,d} = 1,78$ (Bild 13). Die Berechnung z. B. mit dem Programm P7 liefert $\eta_{Ki} = 1,96$. Dieser Wert ist offensichtlich als charakteristischer Wert aufzufassen; die Division durch $\gamma_M = 1,1$ ergibt $\eta_{Ki}/1,1 = 1,96/1,1 = 1,78$, einen Wert, der mit dem oben berechneten Design-Wert übereinstimmt.

Die falsche Deutung des vom Programm ausgegebenen Wertes wird dadurch begünstigt, dass das Kontrollkästchen „ $\gamma_M = 1,1$ “ vor der Durchführung der Berechnungen aktiviert wurde. Um solche Missdeutungen zu vermeiden, sollten die Programm-Hersteller in den Ausgabe-Anzeigen und Protokollen stets die Indizes „k“ und „d“ angeben. Die Programm-Nutzer müssen in den Fällen, in denen diese Indizes fehlen, den Sachverhalt unbedingt anhand von einfachen Beispielen klären.

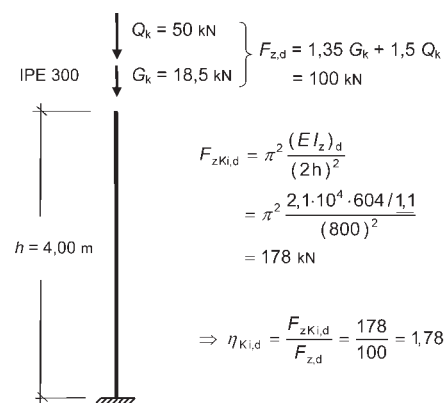


Bild 13. Verzweigungslastfaktor η_{Ki} : charakteristischer oder Design-Wert?
Fig. 13. Safety factor of the ideal buckling load: characteristic or design value?

9 Einfluss von Zugbereichen: „Zugentlastung“ 9.1 Allgemeines

In zwei verschiedenen Diplomarbeiten wurde der gleiche Einfeld-Fachwerkbinder mit biegesteifen Knoten untersucht, wobei der Obergurt durch Pfetten und einen Verband in der Dachebene seitlich gestützt wird. Obgleich dasselbe Programmsystem verwendet wurde, ergab die Analyse des Biegeknickens völlig unterschiedliche Versagensarten: In der ersten Arbeit versagt wider Erwarten zuerst der Zuggurt durch seitliches Ausweichen. In der anderen Arbeit geht das Knicken von den Druckdiagonalen und dem gedrückten Obergurt aus. Auch die Verzweigungslastfaktoren unterscheiden sich mit Werten von 5,2 bzw. 3,8 beträchtlich.

Die Fehlersuche ergab, dass das Programmsystem mit der Voreinstellung „Zugentlastung deaktiviert“ ausgeliefert wird. In der ersten Arbeit wurde diese Voreinstellung beibehalten, in der zweiten wurde die „Zugentlastung“ aktiviert. An diesem Beispiel ist zu erkennen, dass die Überprüfung und Deutung von Voreinstellungen einen fundamentalen Einfluss auf die Ergebnisse haben kann und dass jeder Anwender gut beraten ist, sich vor der Nutzung eines Programms intensiv mit dessen Grundlagen und Eigenheiten vertraut zu machen.

Das Stichwort „Zugentlastung“ soll die Tatsache beschreiben, dass Zugkräfte im Gegensatz zu Druckkräften die Durchbiegungen verkleinern und somit die Beanspruchungen vermindern. Gleichzeitig bewirken Zugkräfte, auch wenn sie nur in Teilbereichen eines Systems vorhanden sind, häufig eine starke Erhöhung der Biege-

knicklast gegenüber der Knicklast des gleichen Systems, bei dem jedoch das Zusatz-Biegemoment aus Normalkraft und Durchbiegung in den Zugbereichen vernachlässigt wird.

Wird die Zugentlastung deaktiviert, so liegen die Ergebnisse (im Allgemeinen weit) auf der sicheren Seite. Im oben angeführten Beispiel hat der in der ersten Arbeit ohne Zugentlastung berechnete Versagenszustand infolge Biegeknickens keine Ähnlichkeit mehr mit dem wirklichen Zustand (s. auch das Beispiel im Abschnitt 9.4).

Ohne Zugentlastung sollte nur in Ausnahmefällen gerechnet werden, z. B. dann, wenn das Vorhandensein der Zugkräfte nicht gesichert ist, wie das bei Zug infolge von Zwang der Fall sein kann. Sind die Zugkräfte hingegen wie bei dem im Abschnitt 9.3 untersuchten Rahmen oder bei Fachwerken für das Gleichgewicht erforderlich, muss die Zugentlastung berücksichtigt werden. Es empfiehlt sich also, die Zugentlastung in der Grundeinstellung (am besten bereits herstellerseitig!) zu aktivieren.

9.2 Symmetrie-Eigenschaften bei Systemen mit Druck- und Zugbereichen

Die Überprüfung von Symmetrie-Eigenschaften gehört zu den besonders einfachen und aussagekräftigen Kontrollmöglichkeiten, auch wenn es sich um komplexe Probleme wie das Biegeknicken handelt. So müssen alle Eigenformen eines symmetrischen Systems mit symmetrischer Belastung symmetrisch oder antimetrisch sein. Bei doppelt-symmetrischen räumlichen Systemen kann sich eine Kombination dieser Symmetrieeigenschaften bezüglich der senkrecht aufeinander stehenden Symmetrie-Ebenen ergeben.

Für ein System mit symmetrischer Geometrie, aber antimetrischer Belastung ergeben sich im Rahmen der Th. I. O. statische Größen, die teils symmetrisch, teils antimetrisch sind. Die statischen Größen nach einer Theorie zweiter oder höherer Ordnung sowie die Eigenformen eines solchen Systems sind jedoch weder symmetrisch noch antimetrisch, sondern unsymmetrisch. Hierbei spielt es keine Rolle, ob ohne oder mit Zugentlastung gerechnet wird. Der Grund

für diese auf den ersten Blick unerwartete Eigenschaft ist darin zu sehen, dass Zugkräfte die Biege- und Torsionssteifigkeit vergrößern, während Druckkräfte diese Steifigkeiten verringern. Die Biegelinie für Bereiche ohne Normalkräfte wird durch ein Polynom, für Druckbereiche zusätzlich durch Sinus- und Kosinusfunktionen und für Zugbereiche schließlich durch Hyperbelfunktionen dargestellt. Für den im nächsten Abschnitt untersuchten symmetrischen Rahmen mit antimetrischer Belastung (Bild 14) ist die Gleichung der (Knick-) Biegelinie im linken Stiel durch Hyperbel-, im rechten durch Sinus- und Kosinusfunktionen gegeben; die Verformungsfigur sowie alle statischen Größen sind deshalb unsymmetrisch.

9.3 Biegeknicken eines symmetrischen Rahmens mit antimetrischer Belastung

Für den in Bild 14 dargestellten ebenen Rahmen wird das Biegeknicken in der Rahmenebene mit Hilfe des Programms P2 untersucht. Infolge der antimetrischen Horizontallast ergeben sich nach Th.I.O. in den beiden Stielen entgegengesetzt gleichgroße

Normalkräfte; die Normalkraft im Riegel ist gleich Null (beides folgt auch aus der Antimetrie), während nach einer Theorie zweiter oder höherer Ordnung eine geringe Riegelzugkraft von 0,3 kN auftritt und die Beträge der Normalkräfte in den Stielen geringfügig voneinander abweichen (keine Antimetrie bei genauer Theorie möglich, wie weiter oben besprochen!). Da sich in der Baustatik bei ebenen Problemen die Normalkräfte nach Th.I.O. und einer genaueren Theorie in der Regel nur unwesentlich unterscheiden, ist es unerheblich, welcher der beiden Normalkraftzustände für die Knickuntersuchung verwendet wird.

Das „zugehörige Knickproblem“ ist in Bild 14b anschaulich wiedergegeben. Die äußeren Knotenlasten müssen so gewählt werden, dass – in jedem Stab die Normalkräfte des gegebenen Belastungsfalls (hier: N gemäß Bild 14a) erzeugt werden – der Gleichgewichtszustand biegeungsfrei ist.

Die Ergebnisse sind in Bild 14c,d zusammengestellt. Am Vergleich der beiden normierten Knickbiegelinien, insbesondere der ausgeknickten Form des rechten, gedrückten Stiels sowie der horizontalen Verschiebung der

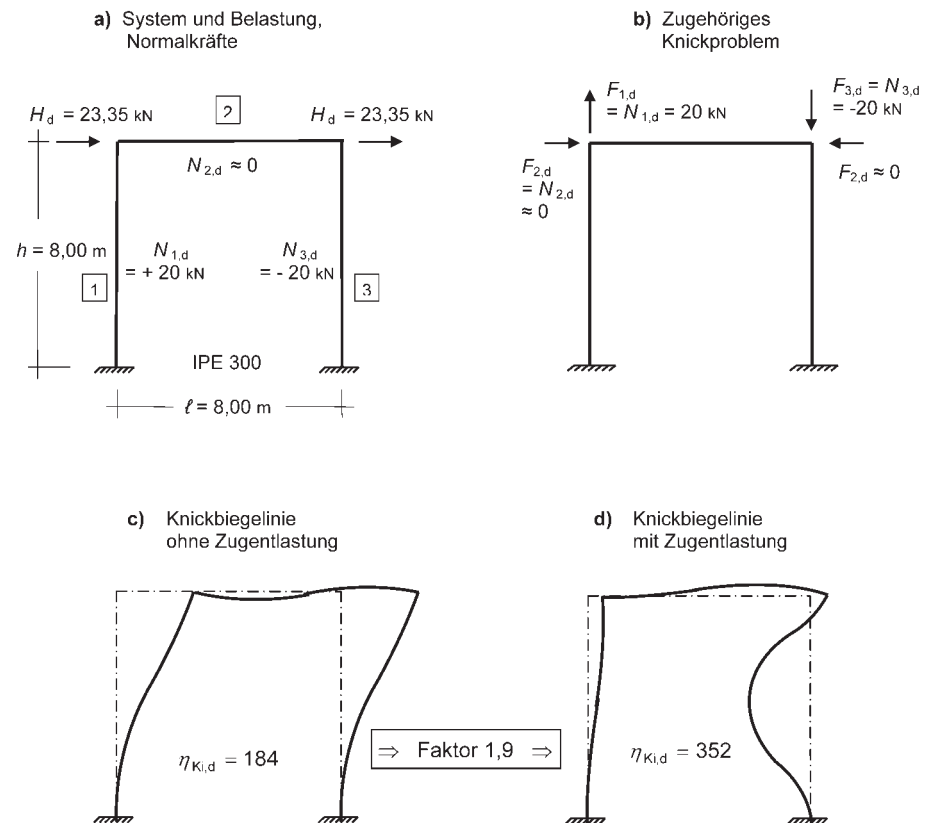


Bild 14. Biegeknicken eines Rahmens ohne und mit Zugentlastung
 Fig. 14. Flexural buckling of a frame without and with relief due to tensile force

Rahmenecken, wird der große stabilisierende Einfluss der Zugkraft des linken Stiels deutlich. Das Verhältnis der η_{Ki} -Werte beziffert diesen Einfluss auf $352/184 = 1,9$. Die Biegeknicklast verdoppelt sich im vorliegenden Fall also nahezu, wenn die Zugentlastung aktiviert und somit das wirklichkeitsnahe Systemverhalten berücksichtigt wird.

Die Vernachlässigung der Zugkraftentlastung führt zu völlig unrealistischen, auf der sicheren Seite liegenden Werten. Auch für den Ansatz von ungünstig wirkenden geometrischen Ersatzimperfectionen ist die Kenntnis der qualitativ richtigen Form der Knickbiegeline von großer Bedeutung.

9.4 Stabilität eines Fachwerkträgers

Für das in Bild 15 dargestellte ebene Fachwerk mit biegesteifen Knoten wird der Einfluss der Zugentlastung auf das Stabilitätsverhalten in der Fachwerkebene und senkrecht zu dieser Ebene mit Hilfe des Programms P2 untersucht. Das ebene

Tabelle 12. Fachwerk ohne und mit Zugentlastung
Table 12. Truss without and with relief due to tensile force

exakt, Th.II.O., Th.III.O.		
Zugentlastung	Verzweigungslastfaktor $\eta_{Ki,d}$	1. Eigenform
ohne ¹⁾	3,85	Ausweichen des Zuggurtes aus der FW-Ebene heraus ²⁾
mit	16,4	Ausknicken der Druckdiagonalen

1) Mit P4, P10 kann nicht ohne Zugentlastung gerechnet werden. Kommentar des Herstellers: „Unsere Software kann nur „richtig“ rechnen!“
2) Diese Eigenform ergibt sich mit Zugentlastung erst bei $\eta_{Ki,d} = 55$ (6. Eigenform)!

Tragwerk muss deshalb räumlich modelliert werden. Der Träger ist an den Enden gabelgelagert; Wölbeffekte werden vernachlässigt. Der mittlere Obergurtknoten wird senkrecht zur Systemebene gehalten.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 12 zusammengestellt. Die Berücksichtigung der Zugkraft erhöht die Stabilitätsgrenze um den Faktor 4,25. Ohne die Zugkraftentlastung leitet das Ausweichen des Zuggurtes aus der Fachwerkebene heraus den Stabilitätsverlust ein, wobei die Druckdiagonalen nahezu gerade bleiben. Wird die Zugkraftentlastung aktiviert, knicken wie zu erwarten die Druckdiagonalen senkrecht zur Ebene aus, wobei der Ober- und der Untergurt fast genau in der Systemebene verbleiben. Ein Ausweichen des Zuggurtes stellt sich in Wirklichkeit erst in der 6. Eigenform mit $\eta_{Ki,d} = 55$ ein.

Wird die stabilisierende Wirkung der Zugkräfte vernachlässigt, ergibt sich hier also ein völlig unrealistischer, „global“ betrachtet weit auf der sicheren Seite liegender Zustand des Systems. (In einzelnen Bereichen kann sich auch eine geringere Beanspruchung einstellen.)

10 Wölbkrafttorsion und Biegedrillknicken

In den Programmen S3D und P4 kann wahlweise mit oder ohne Berücksichtigung der Wölbsteifigkeit des Querschnitts und der Wölbbehinderung an Knotenpunkten und Lagern gerechnet werden, während in den übrigen Programmen die Wölbkrafttorsion nicht erfasst wird. Ohne Ansatz der Wölbsteifigkeit kann zwar das Gleichgewicht erfüllt werden; es wird aber an einem zu weichen System gerechnet,

so dass die Ergebnisse **im Hinblick auf diese Vernachlässigung** „global“ auf der sicheren Seite liegen.

Probleme können jedoch „lokal“ entstehen, wenn z. B. ein Betriebsfestigkeitsnachweis zu führen ist. Bei einem solchen Nachweis kommt es auf eine möglichst genaue Erfassung der in einem Punkt des Querschnitts wirkenden Spannungen an, wobei auch die durch das Wölbmoment hervorgerufenen zusätzlichen Normalspannungen von Bedeutung sein können. Dass hierdurch erhebliche Schäden auftreten können, zeigt eindrucksvoll das in [11] angeführte Beispiel: Bei großen Containerschiffen wurden nach 10 Jahren Betriebszeit Risse festgestellt, die vom Boden bis zur Wasserlinie reichten und durch eine unzutreffende Einschätzung der Wölbnormalspannungen im Mittel-schiff hervorgerufen wurden.

Bei einer Überarbeitung der Programme wäre deshalb die Berücksichtigung der Wölbkrafttorsion von großer Bedeutung, was wiederum eine genauere Erfassung der geometrischen Nichtlinearität erfordert. Auch wenn genaue Angaben über die Wölbbehinderung zur Zeit nur für einige Standardkonstruktionen vorliegen, wäre immerhin eine Abschätzung zwischen den Grenzfällen einer vollständigen Wölbbehinderung und freier Verwölbung möglich, und es könnte die Wölbsteifigkeit des Querschnitts erfasst werden. In [3] wird prinzipiell aufgezeigt, wie auch bei räumlichen Strukturen der Einfluss der unterschiedlichen Wölbbehinderung der an einem Knoten angeschlossenen Stäbe in Stabwerkprogrammen berücksichtigt werden kann.

Ein weiteres Problem ist der Nachweis der Sicherheit gegen Biegedrillknicken. Bislang gestatten es die üblichen Stabwerksprogramme nicht, diesen Nachweis in einem einzigen Berechnungsgang zusammen mit der Ermittlung der statischen Größen zu führen, wie dies für den Nachweis des Biegeknickens bereits möglich und für die praktische Anwendung außerordentlich hilfreich ist.

11 Kombination von Durchschlagen und Biegeknicken

Insbesondere bei flachen Stabkuppeln besteht die Gefahr des Durchschlagens. Hierbei sind die Nachgiebigkeit der horizontalen Auflager und die Ver-

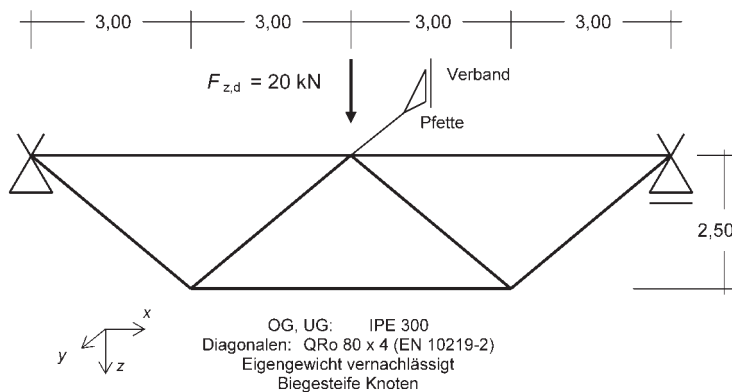


Bild 15. Biegeknicken eines Fachwerkträgers ohne und mit Zugentlastung
Fig. 15. Flexural buckling of a truss without and with relief due to tensile force

kürzung der Stabachse von ausschlaggebender Bedeutung. Wie bereits im ersten Beispiel gezeigt, darf die Verringerung des Abstands der beiden Endpunkte eines Stabes infolge der Durchbiegung nicht vernachlässigt werden. Da die Kombination aus Biegeknicken

und Durchschlagen sehr komplex ist, wird das Problem im folgenden Beispiel auf seine Grundzüge reduziert, und es wird nur der ebene Fall betrachtet (Bild 16a, b). Die Nachgiebigkeit der Unterkonstruktion wird durch horizontale Federn an den Auflagern ab-

gebildet, das Eigengewicht wird vernachlässigt, und als Imperfektionen werden eine außerplanmäßige Lage des Scheitelknotens um 4 cm sowie eine polygonale Vorkrümmung der Druckstäbe mit einem Stich von 3 cm angesetzt. Die Vorkrümmung weist einen antisymmetrischen Verlauf auf, da bei biegesteifem Scheitelknoten die antisymmetrische Form des Ausweichens für das Biegeknicken maßgebend ist.

Zur Vereinfachung der EDV-Modellierung ist es zweckmäßig, zunächst das System mit sieben Knoten und den in Bild 16a angegebenen Koordinaten einzugeben. Anschließend werden alle Stäbe dreifach unterteilt, wodurch sich die Zahl der Knoten auf 19 erhöht (Bild 16b). Alle im Folgenden angegebenen Ergebnisse beziehen sich auf die Knotennummerierung nach Bild 16b.

Die kritische Normalkraft für das antisymmetrische Biegeknicken (2. Eulerfall) beträgt $N_{Ki,d} = 175 \text{ kN}$, die zugehörige Last $F_{z,Ki,d} \approx 76 \text{ kN}$. Für das Durchschlagen des ideal geraden Systems mit 2,40 m Scheitelhöhe ergibt sich aus S3D die Last von $F_{z,Di,d} \approx 86 \text{ kN}$. Hieraus folgt, dass die Versagenslast $F_{z,U,d}$ des imperfekten Systems für die Kombination aus Biegeknicken und Durchschlagen deutlich kleiner als 76 kN sein muss (Bild 17).

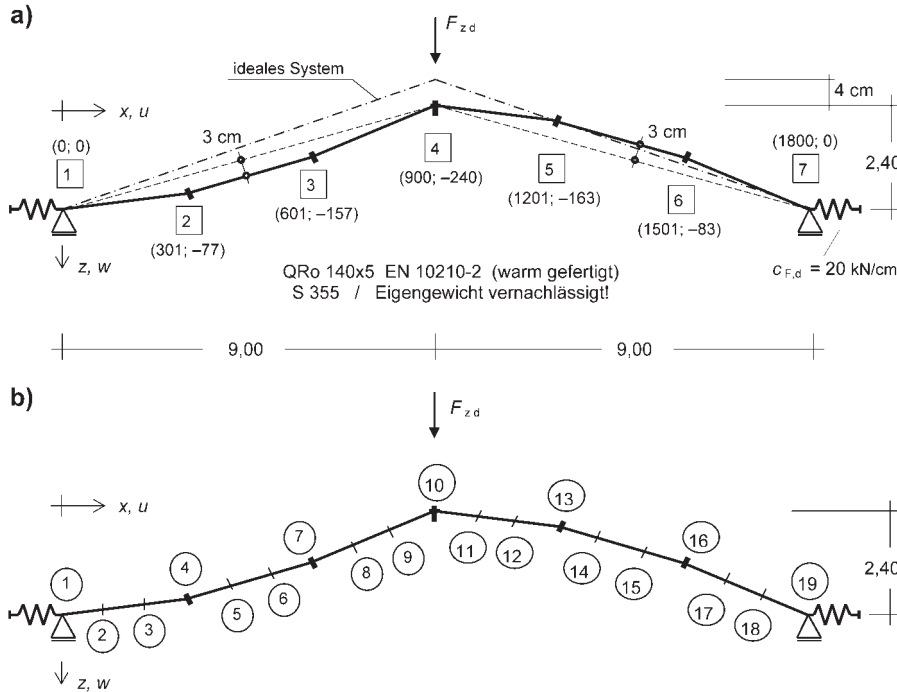


Bild 16. Sprengwerk mit geometrischen Ersatzimperfektionen
Fig. 16. King post truss with equivalent geometrical imperfections

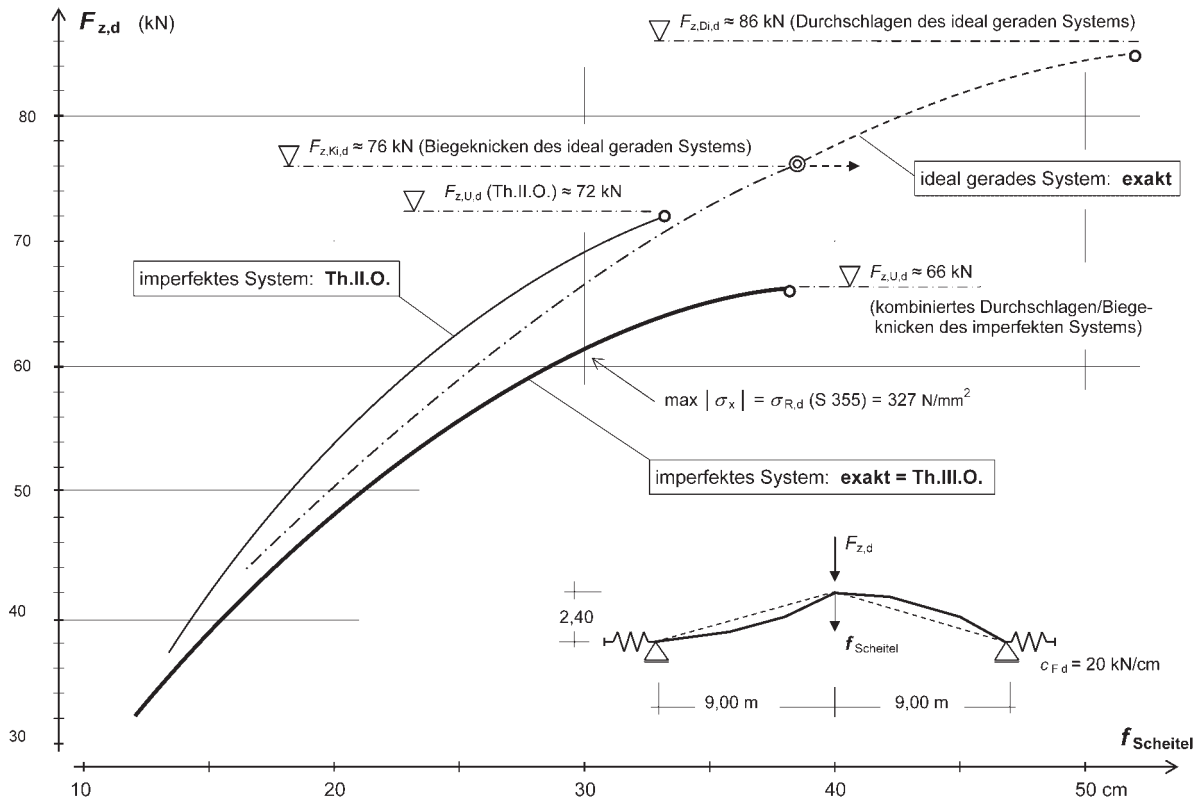


Bild 17. Kraft-Verschiebungskurven für das System nach Bild 16
Fig. 17. Load-deflection-curves of the static system acc. to Fig. 16

Die Belastung $F_{z,d}$ wird so lange gesteigert, bis die Kraft-Verschiebungskurve nahezu horizontal verläuft (Bild 17) und die Berechnung nicht mehr konvergiert. Die exakte Berechnung (S3D, NASTRAN) und die Berechnungen nach Th.III.O. (P2 bis P4) liefern hierfür übereinstimmend den Wert von $F_{z,U,d} = 66$ kN. Die Berechnung nach Th.II.O.-S/-M (z. B. P6, P7) ergibt eine um 26 % zu kleine Verschiebung des Scheitelpunktes und mit $F_{z,U,d}$ (Th.II.O.) = 72 kN eine um 9 % zu große Durchschlagslast. Die Werte weiterer statischer Größen für $F_{z,U,d} = 66$ kN sind in Tabelle 13 zusammengestellt.

Der gesamte Verlauf der exakten Kraft-Verschiebungskurve für das ideale und für das imperfekte System ist in Bild 17 dargestellt. Eine „hinreichend genaue“ Th.III.O. liefert im hier betrachteten **ebenen** Fall praktisch die exakten Ergebnisse. Während die statische Analyse ebener Systeme für Beanspruchungen in der Systemebene nach Th.II.O. (ggf. mit zusätzlichem Nachweis gegen BDK) im Allgemeinen völlig ausreicht, ist sie erwartungsgemäß für Durchschlagprobleme bereits im ebenen Fall unbrauchbar. Für den Anwender ist es also vorteilhaft, durchschlaggefährdete ebene Stabwerke zumindest nach (einer hinreichend genauen) Th.III.O. zu untersuchen, da dieser Stabilitätsnachweis dann nicht gesondert geführt werden muss.

Die Grenzspannung $\sigma_{R,d} = 327$ N/mm² wird bei $F_{z,d} = 61$ kN erreicht (Bild 17). Die zugehörige Gebrauchslast beträgt $F_{z,k} \approx 42$ kN. Die Verschiebung des Scheitels ist mit $f_{\text{Scheitel},k} \approx 17/1,1 = 15,5$ cm = $\ell / 116$ sehr groß, so dass im vorliegenden

Tabelle 13. Statische Größen am Scheitelpunkt der Kraft-Verformungskurve
Table 13. Static quantities at the crown point of the load-deflection-curve

Stat. Größen für $F_{z,U,d} = 66$ kN	exakt = Th.III.O. (P2 – P4, ≈ P1)	Th.II.O. –S / –M	Fehler Th.II.O.
u (mm) (Knoten 1)	– 73	– 70	– 5 %
w (mm) (Knoten 10)	381	282	– 26 %
max M_y (kN m) (Knoten 6)	52,2	40,0	– 23 %
N (kN)	– 150	– 149	≈ 0

Fall der Gebrauchstauglichkeitsnachweis maßgebend ist. Für das Gebrauchslastniveau liefert **in diesem Fall** auch die Th.II.O. hinreichend genaue Ergebnisse.

12 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

12.1 Zusammenfassung

Das Tragverhalten räumlicher Stabwerke wird insbesondere bei schlanken Konstruktionen, wie sie z. B. bei Tragwerken der modernen Stahl-Glasarchitektur, aber auch bereits bei Hallenbindern häufig anzutreffen sind, von einer Theorie II. oder III. Ordnung in vielen Fällen nicht hinreichend genau oder sogar völlig falsch beschrieben. Die Ergebnisse können sowohl weit auf der sicheren als auch weit auf der unsicheren Seite liegen. Stabilitätsprobleme wie das Biegedrillknicken und das Durchschlagen sind ggf. auch bei einer Th.III.O. zusätzlich zu untersuchen.

Für ein allgemein gültiges räumliches Stabwerksprogramm reicht es nicht aus, das Gleichgewicht unter Einbeziehung der Normal- und Querkräfte am verformten System zu bilden. Vielmehr müssen auch die nicht-linearen Beziehungen der Verschiebungsgeometrie hinreichend genau erfasst werden.

Erfahrungen und Zusammenhänge, die für ebene Systeme gelten, dürfen nicht auf räumliche Stabwerke übertragen werden. Das komplexe Zusammenwirken aller statischen Größen bei räumlicher Beanspruchung kann auch von erfahrenen Statikern häufig nicht einmal ansatzweise abgeschätzt werden (vgl. Tabelle 4).

12.2 Schlussfolgerungen

12.2.1 Folgerungen für die Programm-Hersteller

Erstens:

Die Einbeziehung der Zusatz-Biegemomente der Normalkräfte sowie der Zusatz-Torsionsmomente der Querkräfte infolge der elastischen Verformungen reicht nicht aus. Soll das Programm allgemein gültig sein, müssen weitere nichtlineare geometrische Beziehungen berücksichtigt werden. Mit welcher Genauigkeit dies zu geschehen hat, müsste durch weitere Untersuchungen geklärt werden. Hierbei

stellt sich jedoch die Frage, ob ein Näherungsverfahren gegenüber der in [3] formulierten genauen Theorie, die auch bei großen Verformungen ohne Mehraufwand gültig ist, überhaupt Vorteile in programmiertechnischer Hinsicht und für den Anwender bietet.

Zweitens:

Auf leistungsfähige, stabile Lösungsverfahren ist besonderer Wert zu legen.

Drittens:

Um ein neues Programmkonzept zukunftssicher aufzubauen, sollten die Probleme Biegedrillknicken, Schubverformungen und Wölbkrafttorsion von Anfang an optional berücksichtigt werden, auch wenn für die Wölbbehinderung an Knoten und Auflagern bislang nur vereinzelt Angaben vorliegen. So lassen sich immerhin Grenzfälle abschätzen.

Viertens:

Die Analyse der Eigenformen und deren Übernahme als geometrische Ersatzimperfectionen sollten unverzichtbarer Bestandteil eines modernen Stabwerksprogramms sein. Hierbei sind auch Vorkrümmungen (zumindest näherungsweise als Polygonzug) zu erfassen.

Fünftens:

Insgesamt muss dem Austesten eines Programms vor dem Vertrieb mehr Sorgfalt gewidmet werden. Dass einfache Plausibilitätskontrollen wie Symmetrie- und Gleichgewichtsbedingungen bei seit Jahren genutzten Programmen nicht erfüllt werden, ist nicht hinnehmbar.

12.2.2 Folgerungen für die Programm-Anwender

Erstens:

Es wird dringend empfohlen, die Leistungsfähigkeit der genutzten Programme u. a. anhand der vorliegenden Beispiele zu überprüfen. Vor dem Erwerb eines neuen Programms sollte zumindest die (häufig kostenlose) Demo-Version geprüft werden. Eine vom Hersteller versprochene „unbeschränkte“ Leistungsfähigkeit sollte mit Misstrauen betrachtet werden. Eigene Plausibilitätskontrollen auch während einer langjährigen Nutzung eines Programms (beson-

ders bei neuen Programmversion usw.) sind unerlässlich.

Zweitens:

Es ist sinnvoll, die Handhabung eines neuen Programms sorgfältig zunächst an einfachen Beispielen einzuüben, die durch eine Handrechnung kontrolliert werden können. Die herstellerseitigen Voreinstellungen müssen genauso gründlich geprüft werden wie die eigene Modellbildung und die Eingabeprotokolle.

Drittens:

Beim Tragsicherheitsnachweis räumlicher Systeme sollte im Zweifelsfall konservativ bemessen werden, indem z. B. auf die Ausnutzung von Querschnitts- und Systemreserven verzichtet wird. Es ist stets zu überlegen, welche Stabilitätsprobleme vom verwendeten Programm nicht erfasst werden und deshalb zusätzlich zu untersuchen sind.

Viertens:

Wird bei orthogonalen Grundrissen zunächst jede Tragwerksebene für sich berechnet, so ist anschließend bei der Kopplung dieser beiden Ebenen besondere Sorgfalt erforderlich (vgl. Abschnitt 4). Problematisch für die Berechnung sind Bereiche eines Systems, die senkrecht zur Haupttragwerksebene eine sehr geringe Steifigkeit aufweisen, wie z. B. bei Fachwerk-Durchlaufträgern die Druckstäbe neben den mittleren Auflagern. Wenn möglich, sollten solche Bereiche durch Verbände ausgesteift werden.

12.2.3 Normung, Forschung und Lehre

Erstens:

In den Stahlbaunormen (z. B. in [1], El 112, 116, 201) wäre der Hinweis nützlich, dass zur Berechnung schlanker räumlicher Stabwerke eine Th.II.O. im Allgemeinen nicht geeignet ist und dass auch eine Th.III.O. nicht in allen Fällen hinreichend genau ist, was ganz besonders für den Nachweis der Sicherheit gegen BDK gilt.

Zweitens:

Sobald eine neue Programmgeneration auf der Basis der genauen Stabtheorie verfügbar ist und somit statische Berechnungen im Sinne einer ganzheitlichen Statik auch im „Ingenieuralltag“ möglich sind, wären die Ersatzstabverfahren, die einen großen Umfang des Teils 2 der Norm ausmachen, weitgehend überflüssig und könnten aus der Norm ausgelagert werden. Folgerichtig stellt sich dann die Frage, ob die Aufteilung von DIN 18800 in die Teile 1 und 2 noch sinnvoll ist. Entsprechende Vereinfachungen wären auch im EC 3 möglich.

Drittens:

Die Wölbbehinderung an Auflager- und Knotenkonstruktionen sollte mit Hilfe von Bauteilversuchen und Berechnungsmodellen genauer erforscht werden, so wie das bereits für einige Standardkonstruktionen erfolgt ist.

Viertens:

Die in dieser Arbeit begonnene Überprüfung der Leistungsfähigkeit kommerzieller Berechnungsprogramme sollte auf weitere Probleme wie unsymmetrische Querschnitte, exzentrische Lasteinleitung, Biegedrillknicken, Wölbkrafttorsion, Seile und Schwingungsuntersuchungen ausgedehnt werden. Wünschenswert wäre die Einrichtung einer neutralen Stelle, die EDV-Programme auf Mindeststandards getestet und ein entsprechendes Gütesiegel erteilt. Hierfür ist allerdings eine ausreichende Infrastruktur Voraussetzung.

Fünftens:

In der Lehre sollte intensiv auf die Modellbildung und die Grundsätze der Anwendung von Programmen eingegangen werden, statt die Detailbeherrschung eines bestimmten Programmsystems einzuüben. Ein Schwerpunkt muss die kritische Wertung von Ergebnissen und die Vermittlung von Kontrollmechanismen sein.

Literatur

- [1] DIN 18800, Teil 2: Stahlbauten. Stabilitätsfälle, Knicken von Stäben und Stabwerken (November 1990).
- [2] Gensichen, V.: Zur praktischen Anwendung von DIN 18800 (11.90), Teil 1 und Teil 2. Bauingenieur 72 (1997), S. 393–403.
- [3] Lumpe, G.: Zur Stabilität und Biegetorsion großer Verformungen von räumlichen Stabwerken. Bauingenieur 80 (2005), S. 169–177.
- [4] Stern, J.: Der Gelenkstab mit Vorverformung. Ing.-Arch. 54 (1984), S. 152–160.
- [5] Salzgeber, G.: Nichtlineare Berechnung von räumlichen Stabtragwerken aus Stahl. Heft 10, Inst. f. Stahlbau, Holzbau und Flächentragwerke, Technische Universität Graz 2000.
- [6] Rubin, H.: Das Drehwinkelverfahren zur Berechnung biegesteifer Stabwerke nach Elastizitäts- oder Fließgelenktheorie I. und II. Ordnung unter Berücksichtigung von Vorverformungen. Bauingenieur 55 (1980), S. 81–92.
- [7] Rothert, H., Gensichen, V.: Nichtlineare Stabstatik. Baustatische Methoden, Grundlagen und Anwendungen. Berlin: Springer 1987.
- [8] Drees, Chr.: EDV-Modellierung des Tragsicherheitsnachweises eines weitgespannten zweifeldrigen Fachwerk-Hallenbinders unter Berücksichtigung der Schub- und Biegesteifigkeit der Dachscheibe. Diplomarbeit, FH Münster 2006.
- [9] Klävers, S.: Statische Berechnung einer weit gespannten Freiluft-Lagerhalle aus Stahl. Diplomarbeit, FH Münster 2006.
- [10] Lindner, J., Scheer, J., Schmidt, H. (Hrsg.): Stahlbauten: Erläuterungen zu DIN 18800 Teil 1 bis Teil 4. 3. Aufl. Berlin: Ernst & Sohn 1998.
- [11] Germanischer Lloyd: Tätigkeitsbericht 2003, S. 22–24.

Autoren dieses Beitrages:

Prof. Dr.-Ing. Volker Gensichen, Lehrgebiet Statik und Stahlbau, Fachhochschule Münster, Corrensstraße 25, 48016 Münster
 Prof. Dr.-Ing. Günter Lumpe, Lehrgebiet Stahlbau, Hochschule Biberach, Karlstraße 11, 88400 Biberach