

Stahlbau
Stabilitätsfälle (Knickung, Kippung, Beulung)
 Berechnungsgrundlagen Richtlinien

DIN
4114
 Blatt 2

Inhalt

Richtlinien 1 zu Abschnitt 1 der Vorschriften:

- Ri 1.1 Grundbegriffe
 Ri 1.2 Einheitliche Bezeichnungen

Richtlinien 3 zu Abschnitt 3 der Vorschriften:

- Ri 3.1 Allgemeines
 Ri 3.2 Einfluß von Kraftangriff und Querschnittsform

Richtlinien 6 zu Abschnitt 6 der Vorschriften:

- Ri 6.1 Grundbegriffe
 Ri 6.2 Übliche Voraussetzung
 Ri 6.3 Knicklänge der Eckstiele von Gittermasten und Fachwerkstützen
 Ri 6.4 Knicklänge von Streben und Pfosten (Knicken rechtwinklig zur Fachwerkebene)

Richtlinien 7 zu Abschnitt 7 der Vorschriften:

- Ri 7.1 Allgemeines
 Ri 7.2 Die Knickzahlen
 Ri 7.3 Direkte Bemessung von Druckstäben
 Ri 7.4 Die Engeßersche Knicklast S_K und die Engeßersche Knicksicherheitszahl ν_K
 Ri 7.5 Biegedrillknickung planmäßig mittig gedrückter Gurtstäbe mit einfach-symmetrischen Querschnitten
 Ri 7.6 Druckstäbe mit veränderlicher Querschnittshöhe
 Ri 7.7 Druckstäbe mit veränderlicher Normalkraft
 Ri 7.8 Druckstäbe mit feldweise veränderlichem Querschnitt, feldweise veränderlicher Normalkraft und federnder Querstützung
 Ri 7.9 Tragsicherheitsnachweis planmäßig mittig gedrückter Stäbe nach der Spannungstheorie II. Ordnung

Richtlinien 10 zu Abschnitt 10 der Vorschriften:

- Ri 10.1 Biegedrillknickung planmäßig außermittig gedrückter Stäbe
 Ri 10.2 Tragsicherheitsnachweis planmäßig außermittig gedrückter Stäbe nach der Spannungstheorie II. Ordnung

Richtlinien 12 zu Abschnitt 12 der Vorschriften:

- Ri 12.1 Näherungsverfahren zur Knickberechnung der Druckgurte offener Brücken (Trogbrücken)
 Ri 12.2 Genauere Knickberechnung der Druckgurte offener Brücken

Richtlinien 13 zu Abschnitt 13 der Vorschriften:

- Ri 13.1 Knickung symmetrischer Parabelbogen in der Bogenebene

Richtlinien 14 zu Abschnitt 14 der Vorschriften:

- Ri 14.1 Knicklänge der Stiele einfeldrig-mehrstöckiger und mehrfeldrig-einstöckiger Rechteckrahmen sowie von Rechteckrahmen mit belasteten Pendelstützen
 Ri 14.2 Knicklänge der Stiele von Dreieckrahmen

Richtlinien 15 zu Abschnitt 15 der Vorschriften:

- Ri 15.1 Kippung von Trägern mit I-Querschnitt

Richtlinien 17 zu Abschnitt 17 der Vorschriften:

- Ri 17.1 Beulung allseitig gedrückter Bleche
 Ri 17.2 Beulwerte für verschiedene Lagerungsbedingungen der Längsränder

Richtlinien 18 zu Abschnitt 18 der Vorschriften:

- Ri 18.1 Mindeststeifigkeit von Quer- und Längssteifen, die zur Unterteilung des Stegbleches in einzelne Felder dienen
 Ri 18.2 Beulspannung ausgesteifter Stegbleche

Richtlinien 1 zu Abschnitt 1 der Vorschriften

Ri 1.1 Grundbegriffe

Das Gleichgewicht, das in einem belasteten Tragwerk zwischen den äußeren und inneren Kräften vorhanden ist, kann stabil oder instabil sein. Es ist stabil, wenn zu jeder sehr kleinen störenden Verformung des belasteten Tragwerkes ein positiver Arbeitsbetrag aufgewandt werden muß. Diese Eigenschaft ist bei manchen Tragwerken und Belastungsarten nur unter verhältnismäßig kleinen, tief unter der Bruchgrenze liegenden Laststufen gewährleistet. Unter den höheren Laststufen gibt es hier zumindest eine Art der störenden Verformung, zu

deren Verwirklichung keine positive Störungsarbeit — also keine Gewaltanwendung — erforderlich ist. Ist die (grundsätzlich von zweiter Ordnung kleine) Störungsarbeit zumindest bei einer dieser kleinen störenden Verformungen gleich Null, aber für keine einzige mögliche negativ, so liegt hier die Grenze vor, bei der die Eigenschaft der Stabilität verlorengeht (Stabilitätsgrenze); sie wird bei Stäben oder Stabwerken als „Knickbelastung“, bei den auf Biegung beanspruchten Trägern als „Kippbelastung“ und bei dünnen Blechen, Schalen oder Faltenwerken als „Beulbelastung“ bezeichnet. Das Tragwerk versucht hier, sich der Weiterführung der schon vorhandenen (unter den kleineren Laststufen aufgezwungenen) Verformung durch ein Ausweichen zu entziehen.

Fortsetzung Seite 2 bis 32

Fachnormenausschuß Bauwesen im Deutschen Normenausschuß

Änderung Februar 1953:

Bilder 5b, 28 und 29 berichtigt. Berichtigungen in den Abschnitten Ri 7.13, 7.521, 12.12, 12.25, 14.16, 18.21, sowie in Tafel 9, Zeile 7 und Fußnote 18.

Deutscher Normenausschuß, Berlin W 15

Ri 1.2 Einheitliche Bezeichnungen

Für die Bezeichnungen in den Festigkeitsberechnungen und Zeichnungen gelten DIN 1350 „Zeichen für Festigkeitsberechnungen — Formelzeichen — mathematische Zeichen — Maßeinheiten — Zeichen für Formstahl, Stabstahl und Bleche“ mit Beiblatt „Besondere Zeichen für Bauingenieurwesen“ sowie die folgenden Angaben:

- P_K oder S_K Knick-, Kipp- oder Beullast, auch Engesersche¹⁾ Knicklast genannt [kg]; es ist dies die Last an der Stabilitätsgrenze bei Erfüllung bestimmter idealisierender Voraussetzungen (z. B. ideal gerade Stabachse, ideal mittiger Kraftangriff und ideal isotroper Werkstoff)
- σ_K Knick-, Kipp- oder Beulspannung, auch Engesersche Knickspannung genannt [kg/cm²]
- T Knickmodul, auch Engeserscher Knickmodul genannt [kg/cm²]
- ν_K Knick- oder Kippsicherheitszahl, auch Engesersche Knicksicherheitszahl genannt
- ν_B Beulsicherheitszahl im unelastischen (Engeser-) Bereich
- P_{Ki} oder S_{Ki} ideale Knick-, Kipp- oder Beullast, auch Eulersche²⁾ Knicklast genannt [kg]; es ist dies die Last an der Stabilitätsgrenze bei zusätzlicher Voraussetzung eines Idealwerkstoffes, der unbeschränkt dem Hookeschen Formänderungsgesetz gehorcht
- σ_{Ki} ideale Knick-, Kipp- oder Beulspannung, auch Eulersche Knickspannung genannt [kg/cm²]
- ν_{Ki} ideale Knick- oder Kippsicherheitszahl, auch Eulersche Knicksicherheitszahl genannt
- ν_{Bi} ideale Beulsicherheitszahl im elastischen (Euler-) Bereich
- P_{Kr} oder S_{Kr} Traglast [kg]; es ist dies die größte im Gleichgewicht getragene Last, die man bei Verzicht auf die Voraussetzung eines Hookeschen Idealwerkstoffes und auf die idealisierenden Voraussetzungen geometrischer Art erhält
- σ_{Kr} Tragspannung [kg/cm²]
- ν_{Kr} Tragsicherheitszahl
- σ_{zul} zulässige Zugspannung [kg/cm²]
- $\sigma_{d\,zul}$ zulässige Druckspannung [kg/cm²]
- $\omega = \frac{\sigma_{zul}}{\sigma_{d\,zul}}$ Knickzahl
- σ_F Spannung an der Fließgrenze [kg/cm²]
- s oder l Netzlänge des Stabes [cm]

- s_0 Abstand der nach Zeichnung geschätzten Mitten der Anschlüsse [cm]
- i_x Trägheitshalbmesser des Stabquerschnittes, bezogen auf die Hauptachse $x-x$ [cm]
- s_x oder l_x Knicklänge des Stabes für das Ausknicken rechtwinklig zur Hauptachse $x-x$ des Stabquerschnittes [cm]
- $\lambda_x = \frac{s_{Kx}}{i_x}$ Schlankheitsgrad des Stabes für das Ausknicken rechtwinklig zur Hauptachse $x-x$ des Stabquerschnittes
- $Z_x = \frac{F}{i_x^2}$ Querschnittszahl für das Ausknicken des Stabes rechtwinklig zur Hauptachse $x-x$ des Stabquerschnittes
- a planmäßig bekannter Angriffshebel der Druckkraft [cm]
- u praktisch unvermeidbarer Angriffshebel der Druckkraft eines planmäßig mittig gedrückten Stabes [cm]
- y_M Abstand des Schubmittelpunktes vom Querschnittsschwerpunkt [cm]
- e_d und e_z Randabstand, gemessen auf der Biegedruck- bzw. Biegezugseite [cm]
- k_d und k_z Kernweite des Stabquerschnittes, gemessen auf der Biegedruck- bzw. Biegezugseite [cm]
- W_d und W_z Widerstandsmoment des unverschwächten Stabquerschnittes, bezogen auf die Biegedruck- bzw. Biegezugseite [cm³]
- σ_{bd} und σ_{bz} Biegedruck- bzw. Biegezugspannung [kg/cm²]
- M Schubmittelpunkt des Stabquerschnittes
- J_D Drillwiderstand des Stabquerschnittes [cm⁴]
- C_M Wölbwiderstand des Stabquerschnittes, bezogen auf den Schubmittelpunkt [cm⁶]
- k Kipp- oder Beulwert

Bemerkung: Alle Stabkräfte und Spannungen sind mit ihren Absolutbeträgen (ohne Vorzeichen) in die Formeln einzuführen.

Richtlinien 3 zu Abschnitt 3 der Vorschriften

Ri 3.1 Allgemeines

In Abschnitt 3 der Vorschriften beschriebene Biegedrillknickung als allgemeine Form der Knickung gerader Stäbe von gleichbleibendem Querschnitt ist von Bedeutung vor allem bei dünnwandigen, offenen Profilen (Bild 1a). Die Verkopplung von Biegung und Verdrehung zerfällt jedoch bei speziellem Lastangriff oder besonderen Symmetrien des Querschnitts, wie in Bild 1b bis h für einige Sonderfälle dargestellt ist.

Ri 3.2 Einfluß von Lastangriff und Querschnittsform

Beim außermittig gedrückten Stab mit unsymmetrischem Querschnitt (Bild 1a) fällt im allgemeinen der Drillruhepunkt D nicht mit dem Schubmittelpunkt M zusammen. Es liegt dann stets Biegedrillknickung vor. Greift aber die Last im Schubmittelpunkt an (Bild 1b), dann ist sowohl reine Biegeknickung um eine Hauptachse als auch Biegedrillknickung möglich,

¹⁾ F. Engeser, Schweiz. Bauztg. 1895, S. 24. Engeser hat in dieser Abhandlung seine früheren Darlegungen (Z. d. Arch. u. Ing. Ver. Hannover, 1889, S. 455) auf Grund eines Einwandes von F. Jasinski (Schweiz. Bauztg. 1895, S. 172) berichtigt und damit die rationelle Theorie der Biegeknickung von Idealstäben außerhalb des Hookeschen Bereiches gewonnen. Unabhängig davon wurde diese Theorie von Th. v. Kármán (Physikal. Zeitschr. 1908, S. 138 und VDI-Forschungsheft 81, Berlin 1910) entwickelt und experimentell befestigt.

²⁾ L. Euler hat im Anhang „De curvis elasticis“ seines im Jahre 1744 erschienenen Werkes über die Begründung der Variationsrechnung („Methodus inveniendi...“) die nach ihm benannte Formel für die ideale Biegeknicklast gelenkig gelagerter, mittig gedrückter Idealstäbe gefunden und damit erstmalig ein Stabilitätsproblem gelöst.

Richtlinien 6 zu Abschnitt 6 der Vorschriften

Ri 6.1 Grundbegriffe

Die Knicklänge ist die Länge jenes gedachten, beiderseits gelenkig gelagerten Stabes, der bei gleichen Querschnittsabmessungen die gleiche ideale Knicklast wie der untersuchte Stab hat; sie stimmt daher bei Stäben, die an beiden Enden gelenkig gelagert sind, mit der Netzlänge s überein. Beispielsweise gilt für Stäbe von unveränderlichem Querschnitt, die an dem einen Ende gelenkig gelagert und an dem anderen Ende fest eingespannt sind, $s_K = 0,699 \cdot s \approx 0,7 \cdot s$, ferner bei Stäben, die an beiden Enden fest eingespannt sind, $s_K = 0,5 \cdot s$ und schließlich bei Stäben, die an dem einen Ende fest eingespannt und am anderen Ende frei sind, $s_K = 2 \cdot s$.

setzung ausnahmsweise nicht zu, so ist dies bei der Berechnung von s_K zu berücksichtigen¹⁾. Wird beispielsweise bei der in Bild 2 dargestellten Stütze von unveränderlichem Querschnitt die Wirkungsgerade der am Stab angreifenden Kraft durch konstruktive Maßnahmen gezwungen, immer — also auch während des Ausknickens der Stütze — durch den Punkt A (im Abstand $a = s/\alpha$ vom freien Stabende) zu gehen, so ist die Knicklänge s_K aus der Gleichung

$$\operatorname{tg} \frac{\pi \cdot s}{s_K} - \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \cdot \frac{\pi \cdot s}{s_K} = 0$$

zu berechnen. Für positive Werte α (Bild 2a und b) wird $s_K > 2 \cdot s$ und für negative Werte α (Bild 2c) wird $s_K < 2 \cdot s$; in den Sonderfällen $\alpha = 0$ (Bild 2d), $\alpha = -1$ und $\alpha = -\infty$ erhält man die in Ri 6.1 angegebenen Knicklängen $s_K = 2 \cdot s$, $s_K = s$ und $s_K \approx 0,7 \cdot s$.

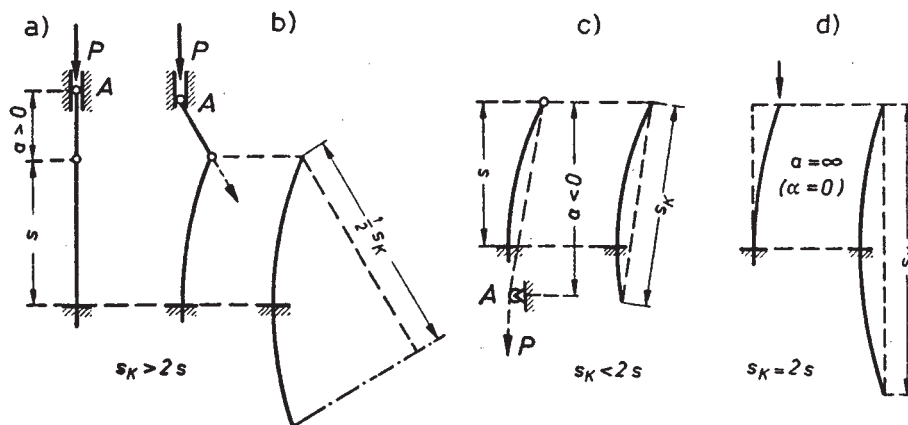


Bild 2

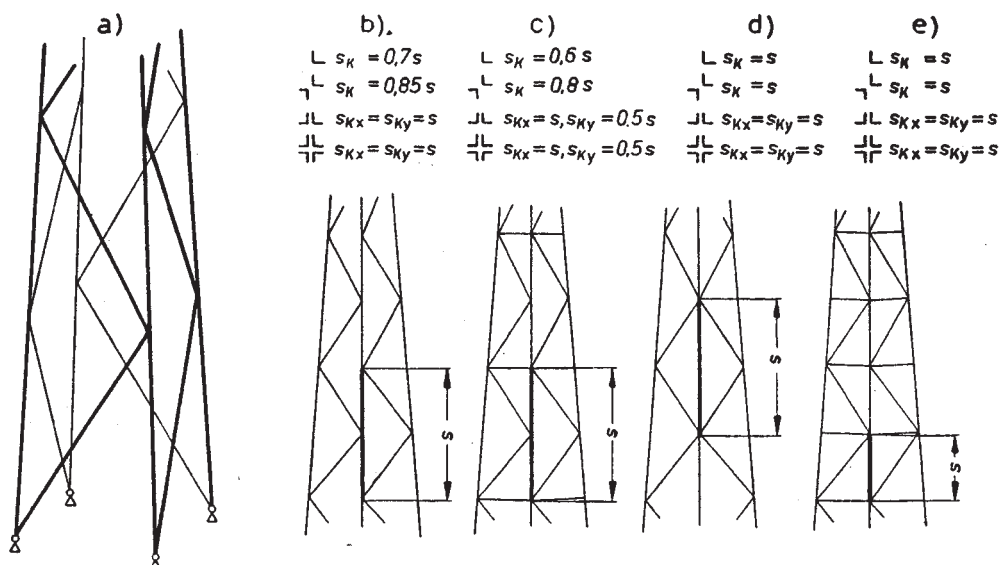


Bild 3

Ri 6.2 Übliche Voraussetzung

Bei der Berechnung von s_K wird in der Regel vorausgesetzt, daß die am Stab angreifende Kraft ihre Richtung während des Ausknickens des Stabes unverändert beibehält. Trifft diese Voraus-

Ri 6.3 Knicklänge der Eckstiele von Gittermasten und Fachwerkstützen

Ri 6.3.1 Ist der Stab ein aus gleichschenkligen Winkelstäben gebildeter, in zwei verschiedenen Fachwerkebenen gestützter Eckstiel eines vierwandigen, überwiegend auf Biegung beanspruchten Gittermastes (Bild 3a), so gelten diejenigen wirksamen Knicklängen s_K , die

¹⁾ Vgl. P. P. Bijlaard, De Ingenieur, Nederl.-Ind. 1939, S. 1, K. Hoening, Bautechn. 1942, S. 176, sowie H. Beer, Stahlbau 1944, S. 23.

in Bild 3b bis e für verschiedene Ausfachungsarten und Querschnittsausbildungen angegeben sind⁵⁾. Dabei ist vorausgesetzt, daß bei Ausfachungen nach Bild 3b und c die Eckstielkraft in den Halbfeldern von unten nach oben je um mindestens 10% des größten, im obersten Halbfeld wirkenden Wertes abnimmt.

Für die Stabkraft ist dieser größte Wert und für den Schlankheitsgrad λ (Abschnitt 7 der Vorschriften) ist in allen Fällen $\lambda = s_K/i_{\min}$ einzuführen, wobei $i_{\min}$ der kleinste Trägheitshalbmesser des Eckstielquerschnittes ist. Ausnahmsweise darf bei Gittermasten von Starkstromfreileitungen, wenn die Eckstiele nur aus einem gleichschenkligen Winkelstahl bestehen, für die Ausfachungsart nach Bild 3b und c und unter Zugrundelegung einer Knicklänge $s_K = s$ die Schlankheit mit dem Trägheitshalbmesser ermittelt werden, der sich auf die zum Winkelschenkel parallele Achse bezieht.

Ri 6.32 Ist der Stab ein aus gleichschenkligen Winkelstäben gebildeter, in zwei verschiedenen Fachwerkebenen gestützter Eckstiel eines vierwandigen, überwiegend auf axialen Druck beanspruchten Fachwerkturnes (eines Joches oder einer Gitterstütze, vgl. Bild 4a), so gelten diejenigen wirksamen Knicklängen s_K , die in Bild 4b bis e für verschiedene Ausfachungsarten und Querschnittsausbildungen angegeben sind. Dabei ist vorausgesetzt, daß bei Ausfachungen nach Bild 4b und c die Eckstielkraft in den Halbfeldern von unten nach oben je um weniger als 10% des größten, im obersten Halbfeld wirkenden Wertes abnimmt. Für die Stabkraft ist dieser größte Wert und für den Schlankheitsgrad λ (Abschnitt 7 der Vorschriften) ist in allen Fällen $\lambda = s_K/i_{\min}$ einzuführen, wobei $i_{\min}$ der kleinste Trägheitshalbmesser des Eckstielquerschnittes ist.

Ri 6.33 Wird der Eckstiel eines Gittermastes oder einer Fachwerkstütze aus zwei oder vier nebeneinanderliegenden Winkelstäben gebildet ($\angle$ - oder $\boxplus$ -Querschnitt) und liegen die Winkelschenkel parallel zu den Fachwerkebenen, so ist er auf Knickung in jeder der beiden Fachwerkebenen zu untersuchen. Für den Schlankheitsgrad λ (Abschnitt 7 der Vorschriften) ist der größere der beiden Werte $\lambda_x = s_{Kx}/i_x$ und $\lambda_y = s_{Ky}/i_y$ einzuführen.

Ri 6.34 Bei der Berechnung der größten Stabkraft des Eckstieles ist sowohl die axiale Druckkraft als auch

das Biegemoment des Gittermastes oder der Fachwerkstütze zu berücksichtigen. Mit dieser größten Stabkraft und den in Ri 6.31, Ri 6.32, Ri 6.33 angegebenen Schlankheitsgraden ist der in Abschnitt 7 der Vorschriften geforderte Nachweis zu erbringen. Bei Fachwerkstützen sind außerdem noch die in den Vorschriften Abschnitt 8.231 und 8.232 angegebenen Bestimmungen (für die mit der axialen Druckkraft belastete ganze Fachwerkstütze) zu beachten.

Ri 6.4 Knicklänge von Streben und Pfosten (Knicken rechtwinklig zur Fachwerkebene)

Ri 6.41 Wird der Druckstab mit der Stabkraft S und der Länge s in seiner Mitte von einem Zugstab mit der Stabkraft S_z und der Länge s_z gekreuzt (Bild 5a), und können sich die Stabenden rechtwinklig zur gemeinsamen Stabebene (Fachwerkebene) nicht verschieben,

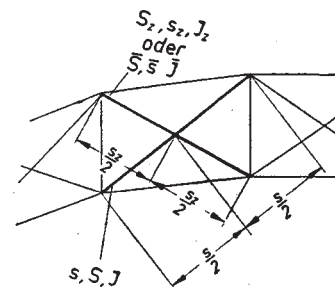


Bild 5a

so muß für die Untersuchung auf Knicken aus der Fachwerkebene heraus die wirksame Knicklänge s_K des Druckstabes bekannt sein. Sie kann niemals kleiner als $0,5s$ sein. An der Kreuzungsstelle ist zu unterscheiden, ob beide Stäbe mit vollem Trägheitsmoment durchgeführt werden, oder ob dies nur für einen zutrifft, während der andere als gelenkig an die Kreuzungsstelle angeschlossen gilt. Unabhängig davon müssen beide Stäbe an der Kreuzungsstelle unmittelbar oder über ein Knotenblech in ausreichendem Maße verbunden sein. Hierzu sind durchgehende Stäbe mit mindestens einem Viertel der zum Anschluß des gedrückten Stabes erforderlichen Niete oder mit einer nach den Vorschriften gleichwertigen Schweißverbindung an die Kreuzungsstelle anzuschließen. Bei Gittermasten von Starkstromfreileitungen dürfen für die Verbindung gekreuzter Diagonalen ausnahmsweise auch Schrauben, deren Muttern besonders (z. B. durch Federringe) gesichert sein müssen, verwendet werden.

⁵⁾ Vgl. Girkmann u. Königshofer, Die Hochspannungsfreileitungen, Wien 1938.

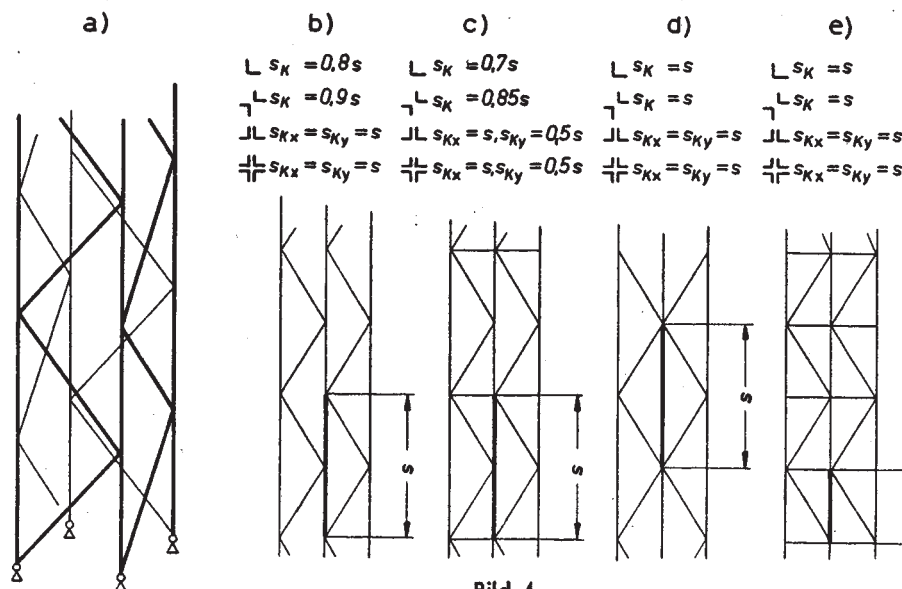


Bild 4

Ri 6.42 Sind beide Stäbe an der Kreuzungsstelle mit ihrem vollen Trägheitsmoment durchgeführt (Bild 5b), so gilt für die wirksame Knicklänge des zu bemessenden Druckstabes:

$$s_K = s \sqrt{1 - \frac{S_z \cdot s}{S \cdot s_z} \left(0,75 + \frac{\pi^2 E J_z}{s_z^2 \cdot S_z} \right)}$$

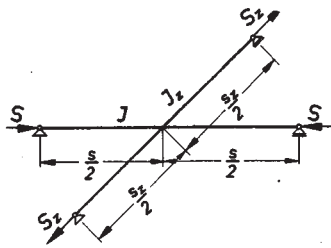


Bild 5 b

Jedoch darf die Knicklänge nicht kleiner sein als $s_K = 0,5 s$, auch wenn die vorstehende Formel einen kleineren Wert liefert.

Ri 6.43 Wirkt an Stelle der aussteifenden Zugkraft S_z eine Druckkraft $\bar{S}$ (Bild 5c), so ist die wirksame Knicklänge größer und beträgt:

$$s_K = s \sqrt{1 + \frac{\bar{S} \cdot s}{S \cdot \bar{s}} \left(1 - \frac{\pi^2 \kappa E J}{\bar{s}^2 \cdot \bar{S}} \right)}$$

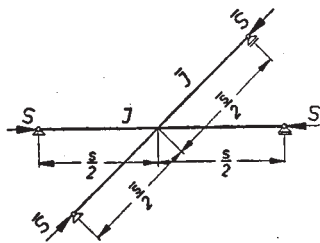


Bild 5 c

Jedoch darf die Knicklänge nicht kleiner sein als $s_K = 0,5 s$, wenn die voranstehende Formel einen kleineren Wert liefert. Auch der Stab $\bar{S}$ darf mit keiner kleineren Knicklänge als $\bar{s}_K = 0,5 \bar{s}$ bemessen werden. Der Abminderungsbeiwert κ bei Knickung im plastischen Bereich ist für $\lambda = s/i$ der Tafel 3 in Ri 7.42 zu entnehmen.

Ri 6.44 Ist der aussteifende Zugstab an der Kreuzungsstelle gelenkig angeschlossen, während der Druckstab durchgeführt ist (Bild 5d), so folgt für die Knicklänge des Druckstabes:

$$s_K = s \sqrt{1 - 0,75 \frac{S_z \cdot s}{S \cdot s_z}}$$

jedoch nicht weniger als $s_K = 0,5 s$.

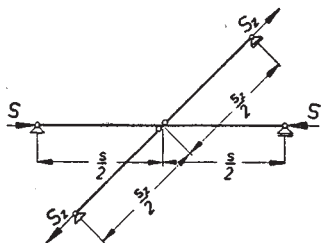


Bild 5 d

Ri 6.45 Wird der Druckstab an der Kreuzungsstelle gelenkig angeschlossen, während der Zugstab durchläuft (Bild 5e), und ist $\frac{S_z \cdot s}{S \cdot s_z} \geq 1$, so darf der Druckstab mit

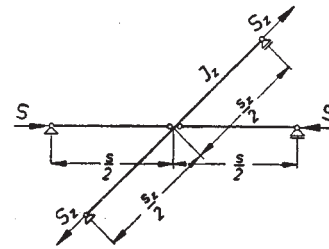


Bild 5 e

$s_K = 0,5 s$ bemessen werden. Ist dagegen $\frac{S_z \cdot s}{S \cdot s_z} < 1$,

so gilt $s_K = 0,5 s$ nur dann, wenn zusätzlich nachgewiesen ist, daß die Biegesteifigkeit des durchlaufenden Zugstabes bei Ausbiegung rechtwinklig zur Fachwerkebene der Forderung genügt:

$$E J_z \geq \nu_K \cdot \frac{S \cdot s_z^2}{12 \cdot s} \left(1 - \frac{S_z \cdot s}{S \cdot s_z} \right)$$

Für ν_K ist diejenige Knicksicherheit einzusetzen, die der Schlankheit des Druckstabes S entspricht. Sie kann der Tafel 3 der Richtlinien entnommen werden.

Ri 6.46 Sind beide Stäbe auf Druck beansprucht (Bild 5f), so darf für den an der Kreuzungsstelle gelenkig angeschlossenen Druckstab S die Knicklänge $s_K = 0,5 s$ eingesetzt werden, wenn zusätzlich nachgewiesen ist, daß die Biegesteifigkeit

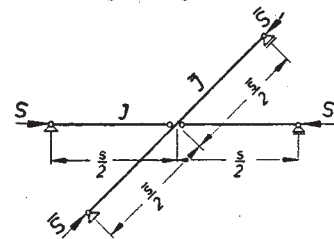


Bild 5 f

des durchlaufenden Stabes $\bar{S}$ bei Ausbiegung rechtwinklig zur Fachwerkebene der Forderung genügt:

$$E \bar{J} \geq \nu_K \cdot \frac{S \cdot \bar{s}^2}{12 \cdot s} \left(1 + 1,21 \frac{\bar{S} \cdot s}{S \cdot \bar{s}} \right)$$

Mit $\nu_K = 2,5$ ist der durchlaufende Druckstab ausreichend sicher bemessen. Wird aber eine Knicksicherheit $1,77 \leq \nu_K < 2,5$ gewählt, so ist zusätzlich noch der nach Abschnitt 7.1 der Vorschriften geforderte Nachweis mit der Knicklänge des durchlaufenden Druckstabes

$$\bar{s}_K = \frac{\bar{s}}{\sqrt{1 - \frac{S \cdot \bar{s}^2}{12 E \bar{J} \cdot s}}}$$

zu erbringen.

Ri 6.47 Ist der Stab an beiden Enden unverschieblich festgehalten, wirken jedoch in den beiden Hälften der Stablänge verschieden große Druckkräfte S_1 und S_2 ($S_2 < S_1$) (Bild 5g), so ist der Stab bei der Untersuchung

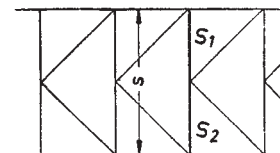


Bild 5 g

auf Knicken rechtwinklig zur Fachwerkebene für die Druckkraft S_1 und die Knicklänge

$s_K = s \cdot \left(0,75 + 0,25 \cdot \frac{S_2}{S_1} \right)$ zu berechnen. Ist S_2 eine Zugkraft, so ist in dieser Formel das Pluszeichen durch ein Minuszeichen zu ersetzen, doch darf s_K nicht kleiner sein als $0,5 s$.

Ri 6.48 Bei Gittermasten von Starkstromfreileitungen darf für die Bemessung von Diagonalen ausnahmsweise eine Knicklänge $s_K = 0,9 s$ angenommen werden.

Ri 6.49 Besteht der Stab aus einem einzelnen Winkelstahl und wird die Außermitteigkeit des Kraftangriffes bei der Bemessung nicht berücksichtigt (Vorschriften Abschnitt 10.08), so ist für den Schlankheitsgrad das Verhältnis der nach Ri 6.42 bis Ri 6.48 bestimmten Knicklängen zum kleinsten Trägheitshalbmesser $i_{\min}$ des Winkelquerschnittes einzuführen.

Richtlinien 7 zu Abschnitt 7 der Vorschriften

Ri 7.1 Allgemeines

Ri 7.11 Das Tragverhalten planmäßig mittig gedrückter Stäbe kann durch verschiedene Ausweicherscheinungen (vgl. Ri 1.1) gekennzeichnet sein. Zu diesen Ausweicherscheinungen gehört die Biegeknickung, die Drillknickung, die Biegedrillknickung und schließlich auch das Ausbeulen dünnwandiger Teile (vgl. Vorschriften Abschnitt 3 und 16, Richtlinien Ri 1.1 und Ri 3).

Ri 7.12 Bei den planmäßig mittig gedrückten Stäben und bei den planmäßig nur durch Axialkräfte beanspruchten Stabwerken (vgl. dazu die Vorschriften Abschnitt 10.09), die der Biegeknickung unterliegen, sind je nach den Voraussetzungen, die der Rechnung zugrunde gelegt werden, drei verschiedene stabilitätstheoretische Sonderwerte der Druckkraft zu unterscheiden: Die ideale (Eulersche) Knicklast P_{Ki} , die an die Voraussetzung eines unbeschränkt gültigen Hookeschen Formänderungsgesetzes sowie an weitere idealisierende Voraussetzungen (ideal gerade Stabachse, ideal mittiger Kraftangriff, ideal isotroper Werkstoff) gebunden ist⁶⁾. Dann die gewöhnliche (Engesersche) Knicklast P_{Kr} , bei deren Bestimmung auf die Annahme eines unbeschränkt gültigen Hookeschen Formänderungsgesetzes verzichtet wird, die aber nach wie vor an die übrigen idealisierenden Voraussetzungen (ideal gerade Stabachse, ideal mittiger Kraftangriff, ideal isotroper Werkstoff) gebunden ist. Schließlich die Traglast P_{Kr} , bei deren Berechnung⁷⁾ zusätzlich auch auf die idealisierenden Voraussetzungen geometrischer Art (ideal gerade Stabachse, ideal mittiger Kraftangriff) verzichtet wird. Die Schwierigkeit der theoretischen Bestimmung und der Umfang der erforderlichen Rechenarbeit wächst in der genannten Reihenfolge; demgemäß steht im Stahlbau nur in einfacheren Fällen die Traglast, in der Regel die gewöhnliche (Engesersche) Knicklast und in schwierigeren Fällen die ideale Knicklast als Bemessungsgrundlage zur Verfügung.

Ri 7.13 Wird bei der Bemessung eines planmäßig mittig gedrückten Stabes oder eines planmäßig biegemomentenfrei beanspruchten Stabwerkes von der Traglast P_{Kr} ausgegangen, so ist der Nachweis $P \leq P_{Kr}/\nu_{Kr}$ zu erbringen, wobei P die größte einwirkende Last und ν_{Kr} die Tragsicherheitszahl ist. Wird von der gewöhnlichen (Engeserschen) Knicklast P_K oder

von der idealen Knicklast P_{Ki} ausgegangen, so ist der Nachweis $P \leq P_K/\nu_K$ bzw. $P \leq P_{Ki}/\nu_{Ki}$ zu erbringen, wobei ν_K die gewöhnliche (Engesersche) und ν_{Ki} die ideale Knicksicherheitszahl ist.

Ri 7.14 Die Sicherheitszahlen ν_{Kr} , ν_K und ν_{Ki} sind innerhalb der Grenzen, die durch die Gebote der Sicherheit und der Wirtschaftlichkeit sowie durch die praktische Erfahrung und die wissenschaftlichen Erkenntnisse gezogen werden, um so größer festzusetzen, je mehr sich die der Rechnung zugrunde liegenden idealisierenden und vereinfachenden Annahmen von der Wirklichkeit entfernen können. Für die Tragsicherheitszahl ist in der Regel, wenn bei der Bestimmung der Traglast die größtmöglichen „praktisch unvermeidbaren“ Außermitteigkeiten des Kraftangriffes berücksichtigt werden, im Belastungsfall 1 (Hauptkräfte) $\nu_{Kr} = 1,71$ und im Belastungsfall 2 (Haupt- und Zusatzkräfte) $\nu_{Kr} = 1,5$ zu wählen. Die Engesersche Knicksicherheitszahl ν_K hängt von der unter P_K auftretenden größten Druckspannung ab; bei schlanken Stäben und Stabwerken, deren Knicklast so klein ist, daß unter ihrer Einwirkung die Proportionalitätsgrenze σ_P des Baustahls nicht überschritten wird, stimmt P_K mit der idealen Knicklast P_{Ki} und daher ν_K mit der idealen Knicksicherheitszahl ν_{Ki} überein. Die ideale Knicksicherheitszahl darf im Belastungsfall 1 (Hauptkräfte) nicht kleiner als $\nu_{Ki} = 2,5$ und im Belastungsfall 2 (Haupt- und Zusatzkräfte) nicht kleiner als $\nu_{Ki} = 2,19$ angenommen werden. Da diese Werte erheblich größer sind als die Tragsicherheitszahlen ν_{Kr} , kann die Forderung $P \leq P_{Ki}/\nu_{Ki}$ bei den schlank gebauten Stäben und Stabwerken zu einer kleineren zulässigen Last führen als die Forderung $P \leq P_{Kr}/\nu_{Kr}$. Daher muß, wenn bei der Bemessung von der Traglast ausgegangen wird, immer der Doppelnachweis $P \leq P_{Kr}/\nu_{Kr}$ und $P \leq P_{Ki}/\nu_{Ki}$ erbracht werden.

Ri 7.2 Die Knickzahlen

Ri 7.21 Viele Knickprobleme lassen sich nach Einführung der Knicklänge s_K (Abschnitt 6 der Vorschriften und Richtlinien 6) mit mehr oder minder guter Annäherung auf die Bestimmung der Knicklast eines an beiden Enden gelenkig gelagerten, planmäßig mittig gedrückten, geraden Stabes von gleichbleibendem Querschnitt und gleichbleibender Normalkraft (der „Stabkraft S “) zurückführen. Es ist daher zweckmäßig, die Knickberechnung der Stäbe für diesen Normalfall einheitlich festzulegen (Vorschriften Abschnitt 7). An Stelle der im Abschnitt Ri 7.13 angegebenen Nachweise kann hier wegen der Unveränderlichkeit der Querschnittsfläche und der Normalkraft einfach $\frac{S}{F} \leq \sigma_{dzul}$ gefordert werden, wobei σ_{dzul} die zulässige Druckspannung ist. Um bei der Vorschreibung der Werte σ_{dzul} keine besonderen Tafeln für die Belastungsfälle 1 und 2 (Haupt- bzw. Haupt- und Zusatzkräfte) aufstellen zu müssen, ferner, um die Zahlenrechnung zu erleichtern, und schließlich, um einfache Näherungsformeln zur Berechnung der planmäßig außermitteig gedrückten Stäbe (Vorschriften Abschnitt 10) festsetzen zu können, wird die Forderung $\frac{S}{F} \leq \sigma_{dzul}$ in der Form $\omega \cdot \frac{S}{F} \leq \sigma_{zul}$ geschrieben, wobei σ_{zul} die dem untersuchten Belastungsfall und der gewählten Baustahlsorte zugeordnete zulässige Zugspannung und $\omega = \sigma_{zul}/\sigma_{dzul}$ die Knickzahl ist. Die Knickzahlen hängen von der Baustahlsorte und dem Schlankheitsgrad λ des Stabes ab und sind in den Tafeln 1 und 2 der Vorschriften angegeben.

⁶⁾ Allgemein handelt es sich hier um idealisierende Voraussetzungen geometrischer oder statischer Art, deren Erfüllung zur Folge hat, daß die Untersuchung des Tragverhaltens zu einer „Verzweigungsstelle“ der Lösung führt. Das Kriterium für das Auftreten solcher Verzweigungstellen wurde von K. Klöppel und K. H. Lie (Stahlbau 1943, S. 17) allgemeingültig formuliert; vgl. dazu auch das dort angeführte Schrifttum sowie H. Zimmermann, Bautechn. 1923, S. 10; F. Schleicher, Forschungshefte a. d. Geb. d. Stahlbaues, Heft 6, S. 146; W. Cornelius, Diss. Darmstadt 1944.

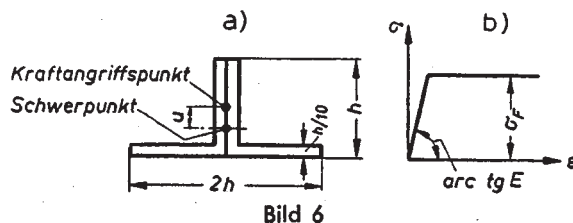
⁷⁾ Vgl. F. Hartmann, Stahlbrücken, 1. Teil, Wien 1946; K. Jäger (Ježek), Die Festigkeit von Druckstäben aus Stahl, Wien 1937; J. Fritzsche, Stahlbau 1936, S. 90; C. F. Kollbrunner, Stahlbau 1938, S. 25.

Ri 7.22 Bei der Aufstellung dieser Tafeln wurde, um die Werte σ_{dzul} und damit auch die Knickzahlen ω an eine rationale Gesetzmäßigkeit zu binden, der im Abschnitt Ri 7.14 angeführte Doppelnachweis $\frac{S}{F} \leq \frac{\sigma_{Kr}}{\nu_{Kr}}$ und $\frac{S}{F} \leq \frac{\sigma_{Ki}}{\nu_{Ki}}$ als maßgebend angesehen, die ideale Knickspannung $\sigma_{Ki} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}$ mit $E = 2100000$ kg/cm² berechnet und die Tragspannung σ_{Kr} auf Grund folgender Annahmen ermittelt:

I. Der gleichbleibende Stabquerschnitt hat die in Bild 6a dargestellte Form, die bei der eingezeichneten Lage des Kraftangriffspunktes für das Tragvermögen sehr ungünstig ist.

II. Die Druckkraft greift an den Enden des gelenkig gelagerten Stabes an und behält ihre Richtung während der Ausknickung des Stabes bei. Der Angriffspunkt der Druckkraft liegt auf der Symmetrieachse des Querschnittes in der Entfernung u vom Schwerpunkt. Die Größe u stellt den planmäßig nicht vorgesehenen, praktisch jedoch „unvermeidbaren“ Angriffshebel der Druckkraft vor, der sich im allgemeinen aus einem von der Stablänge unabhängigen und einem mit der Stablänge anwachsenden Anteil zusammensetzt. Es wird willkürlich angenommen, daß u mit dem Trägheitshalbmesser i des Stabquerschnittes und der Netzlänge s des Stabes nach dem Gesetz $u = \frac{i}{20} + \frac{s}{500}$ anwächst, so daß man die Beziehung $\frac{u}{i} = 0,05 + \frac{\lambda}{500}$ erhält.

III. Die Voraussetzungen der technischen Biegelehre gelten auch außerhalb des Hookeschen Formänderungsbereiches. Der Baustahl gehorcht hierbei einem idealelastisch-idealplastischen Spannungs-Dehnungs-Gesetz⁹⁾ (Bild 6b), wobei $E = 2100000$ kg/cm² gesetzt und folgende tiefliegende, für größere



Querschnittsbereiche geltende Mittelwerte der Fließspannung angenommen werden: Für den St 00, den Handelsbaustahl und den Baustahl St 37 der Wert $\sigma_F = 2300$ kg/cm² und für den Baustahl St 52 der Wert $\sigma_F = 3400$ kg/cm². Bei der Beurteilung dieser Zahlen ist zu beachten, daß beim St 00 die Möglichkeit eines noch stärkeren Absinkens von σ_F durch die Vorschreibung eines kleineren Wertes σ_{zul} ausgewogen wird. Die Biegelinien (Gleichgewichtsfiguren der Stabachse) werden näherungsweise durch Sinus-Halbwellen ersetzt.

IV. Die unter I bis III genannten, für das Tragvermögen des Stabes ungünstigen Einflüsse werden gleichzeitig wirksam gedacht; alle günstigen Einflüsse bleiben demgegenüber unberücksichtigt. Im Hinblick auf diese vom untersuchten Einzelfall unabhängige, sehr ungünstige Voraussetzung wird die Tragsicherheitszahl im Belastungsfall 1 von $\nu_{Kr} = 1,71$ ausnahmsweise auf $\nu_{Kr} = 1,5$ herabgesetzt.

⁹⁾ K. Jäger (Ježek), Die Festigkeit von Druckstäben aus Stahl, Wien 1937; J. Fritsche, Stahlbau 1941, S. 37 u. 96.

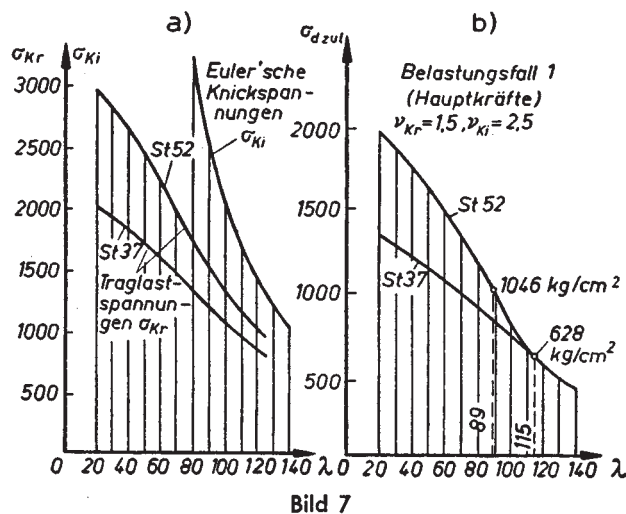
Bei Zugrundelegung der Annahmen I bis IV können die den Schlankheitsgraden λ zugeordneten, in kg/cm² ausgedrückten Tragspannungen $\sigma_{Kr} = S_{Kr}/F$ für die angeführten Fließspannungswerte σ_F aus der Gleichung

$$\lambda^2 = \frac{\pi^2 \cdot E}{\sigma_{Kr}} \left[1 - \frac{m \cdot \sigma_{Kr}}{\sigma_F - \sigma_{Kr}} + 0,25 \left(\frac{m \cdot \sigma_{Kr}}{\sigma_F - \sigma_{Kr}} \right)^2 - 0,005 \left(\frac{m \cdot \sigma_{Kr}}{\sigma_F - \sigma_{Kr}} \right)^3 \right]$$

berechnet werden, wobei

$$m = 2,317 \left(0,05 + \frac{\lambda}{500} \right).$$

In Bild 7a und in der Tafel 1 sind sowohl die idealen Knickspannungen $\sigma_{Ki} = \frac{S_{Ki}}{F}$ (Eulersche Knickspannungen) als auch die aus obiger Gleichung ermittelten Tragspannungen $\sigma_{Kr} = \frac{S_{Kr}}{F}$ für verschiedene Schlankheitsgrade λ angegeben. Teilt man σ_{Ki} durch $\nu_{Ki} = 2,5$ und σ_{Kr} durch $\nu_{Kr} = 1,5$, so stellt



der jeweils kleinere der erhaltenen beiden Spannungswerte die im Belastungsfall 1 (Hauptkräfte) zulässige Druckspannung σ_{dzul} dar (Bild 7b und Tafel 1); im Belastungsfall 2 (Haupt- und Zusatzkräfte) ist dieser Wert im Verhältnis der zulässigen Zugspannungen zu erhöhen. Aus σ_{dzul} ergeben sich die Knickzahlen mit Hilfe der Beziehung $\omega = \sigma_{zul}/\sigma_{dzul}$; für die zwei Baustahlsorten gilt hierbei $\sigma_{zul} = 1400$ bzw. 2100 kg/cm².

Ri 7.3 Direkte Bemessung von Druckstäben

Soll für einen Druckstab von gegebener Querschnittsform die erforderliche Querschnittsfläche F auf direktem Wege bestimmt werden, so ist mit Hilfe der gegebenen Werte S , s_K , σ_{zul} und der Querschnittszahl Z die „Stabkennzahl“

$$\zeta = \sqrt{\frac{Z \cdot s_K^2 \cdot \sigma_{zul}}{S}}$$

zu berechnen und die zugeordnete Knickzahl ω aus der Tafel 2 zu entnehmen, wobei Zwischenwerte geradlinig eingeschaltet werden dürfen. Die erforderliche Querschnittsfläche beträgt dann $F = \omega \cdot \frac{S}{\sigma_{zul}}$ und der Schlankheitsgrad λ des Stabes hat die in der Tafel 2 angegebene Größe. Bei geometrisch ähnlichen Querschnitten ist Z von der Querschnittsfläche

Tafel 1

λ	σ_{Kr}		σ_{Ki}	σ_{dzul} (Belastungsfall I)	
	St 37	St 52		St 37	St 52
20	2023	2975	—	1349	1983
30	1941	2832	—	1294	1888
40	1845	2659	—	1230	1773
50	1737	2456	—	1158	1637
60	1617	2231	—	1078	1487
70	1489	1995	4230	993	1330
80	1358	1762	3238	905	1175
90	1229	1546	2559	819	1024
100	1107	1354	2073	738	829
110	994	1186	1713	663	685
120	892	1043	1439	576	576
130	—	—	1226	490	490
140	—	—	1057	423	423
150	—	—	921	368	368

F unabhängig und kann mit Hilfe der Beziehung $Z = \frac{F}{i^2} = \frac{F^2}{J}$ für die gegebene Querschnittsform

berechnet werden. Sind die bei der Bemessung in Betracht gezogenen Profile (etwa die Walzprofile einer Reihe) nicht genau geometrisch ähnlich, so ist das geschilderte Rechenverfahren nur ein Näherungsverfahren, dessen Brauchbarkeit von der richtigen Schätzung der Querschnittszahl Z abhängt. Statt die Querschnittszahl Z zu schätzen, kann auch unmittelbar die Knickzahl geschätzt werden und auf

Grund des Schätzwertes ω^* eine Fläche $F^* = \omega^* \cdot \frac{S}{\sigma_{zul}}$ berechnet werden. Zu dieser Fläche ist aus einer Profiltabelle der Trägheitshalbmesser i^* zu entnehmen

und die Stabkennzahl $\zeta = \frac{s_K}{i^*} \sqrt{\omega^*}$ zu berechnen.

Für ζ ergibt sich aus der Tafel 2 ein Wert ω , der, falls er von ω^* stark abweicht, als verbesserter, neuer Schätzwert dient, ansonsten aber schon zur Berechnung der gesuchten Querschnittsfläche $F = \omega \cdot \frac{S}{\sigma_{zul}}$ verwendet werden darf. Die in der Tafel 2 neben ω stehende Zahl gibt dann wieder den Schlankheitsgrad λ des Stabes an.

Bei beiden Verfahren⁹⁾ wird die Erkenntnis verwertet, daß der Zahlenwert $\lambda \cdot \sqrt{\omega}$ bei geometrisch ähnlichen Querschnitten vom Flächeninhalt F unabhängig ist. Beachtet muß werden, daß der im Abschnitt 7.1 der Vorschriften geforderte Nachweis

$\omega \cdot \frac{S}{F} \leq \sigma_{zul}$ auch dann erbracht werden muß, wenn der Stab in der geschilderten Weise „direkt“ bemessen worden ist.

Ri 7.4 Die Engeßersche Knicklast S_K und die Engeßersche Knicksicherheitszahl ν_K

Ri 7.41 Wird bei der Bestimmung der Knickspannung auf die Voraussetzung eines unbeschränkt geltenden Hooke'schen Formänderungsgesetzes verzichtet und an Stelle dieses Gesetzes — unter Beibehaltung aller übrigen idealisierenden Voraussetzungen — die Spannungs-Dehnungs-Linie des Baustahls zugrunde gelegt, so erhält man an Stelle der Euler-

Tafel 2

ζ	St 00, Handelsbaustahl und St 37		St 52	
	ω	λ	ω	λ
21	1,04	20,6	1,06	20,4
25	1,05	24,4	1,08	24,1
30	1,07	29,0	1,10	28,6
35	1,10	33,4	1,13	32,9
40	1,12	37,8	1,16	37,1
45	1,15	42,0	1,19	41,2
50	1,18	46,0	1,23	45,1
55	1,21	50,0	1,27	48,8
60	1,24	53,8	1,31	52,5
65	1,27	57,6	1,35	55,9
70	1,31	61,2	1,40	59,2
75	1,35	64,6	1,45	62,4
80	1,38	68,1	1,50	65,4
85	1,42	71,3	1,55	68,3
90	1,46	74,4	1,60	71,1
95	1,51	77,4	1,65	73,8
100	1,55	80,3	1,71	76,5
105	1,59	83,2	1,77	79,0
110	1,64	85,9	1,82	81,5
115	1,68	88,6	1,88	83,9
120	1,73	91,3	1,94	86,2
125	1,77	93,8	2,00	88,4
130	1,82	96,3	2,07	90,4
135	1,87	98,7	$\frac{\zeta}{62,83}$	$7,93 \sqrt{\zeta}$
140	1,92	101,1		
145	1,97	103,4		
150	2,02	105,6		
160	2,12	110,0		
170	2,22	114,1		
180	2,34	117,6		
>180	$\frac{\zeta}{76,95}$	$8,77 \sqrt{\zeta}$		

schen Knickspannung σ_{Ki} die vom Knickmodul T abhängige Engeßersche Knickspannung $\sigma_K = \frac{\pi^2 \cdot T}{\lambda^2}$.

Bedeutet σ_P die Proportionalitäts- und Elastizitätsgrenze des Baustahls, so gilt im Bereich $\sigma_K \leq \sigma_P$ (dem „elastischen“ Bereich) $T = E$ und daher $\sigma_K = \sigma_{Ki}$, während im „unelastischen“ Bereich $\sigma_P < \sigma_K \leq \sigma_F$ der Knickmodul T kleiner als der Elastizitätsmodul E und daher die Engeßersche Knickspannung σ_K kleiner ist als die Eulersche Knickspannung σ_{Ki} . Teilt man σ_K durch die Engeßersche Knicksicherheitszahl ν_K , so erhält man die zulässige Druckspannung σ_{dzul} . Da die aus den Vorschriften Abschnitt 7 abgeleiteten Werte $\sigma_{dzul} = \sigma_{zul}/\omega$ als verbindlich anzusehen sind,

muß ν_K durch die Beziehung $\nu_K = \omega \cdot \frac{\sigma_K}{\sigma_{zul}}$ an diese Vorschriften gebunden werden; hierbei ist ω die dem Schlankheitsgrad λ zugeordnete, aus Tafel 1 oder 2 der Vorschriften zu entnehmende Knickzahl und σ_{zul} die dem untersuchten Belastungsfall entsprechende zulässige Zugspannung.

Ri 7.42 Bei Stabilitätsuntersuchungen werden oft Abminderungszahlen $\kappa = T/E$ verwendet (vgl. Vorschriften, Abschnitt 17.3 und Richtlinien Ri 17.1). Um eine gemeinsame Grundlage zu ihrer Festsetzung zu finden, legt man der Berechnung der Engeßerschen Knickspannung σ_K für alle Baustahlsorten die Proportionalitätsgrenze $\sigma_P = 0,8 \sigma_F$ zugrunde und wählt das Druckspannungs-Stauchungsgesetz ($\sigma - \varepsilon$ -Gesetz) (Bild 8):

$$\frac{\sigma - \sigma_P}{\sigma_F - \sigma_P} = \Im g \frac{\varepsilon \cdot E - \sigma_P}{\sigma_F - \sigma_P}$$

oder in expliziter Form:

$$\sigma = \sigma_F \left(0,8 + 0,2 \Im g \frac{\varepsilon \cdot \frac{E}{\sigma_F} - 0,8}{0,2} \right)$$

⁹⁾ Vgl. W. Gehler, Baunormung 1923, S. 45; G. U n o l d, Knicknomogramm, NBW-Verlag 1928; O. D o m k e, Bauing. 1938, S. 661; K. K a m m ü l l e r, Beton u. Eisen 1942, S. 220.

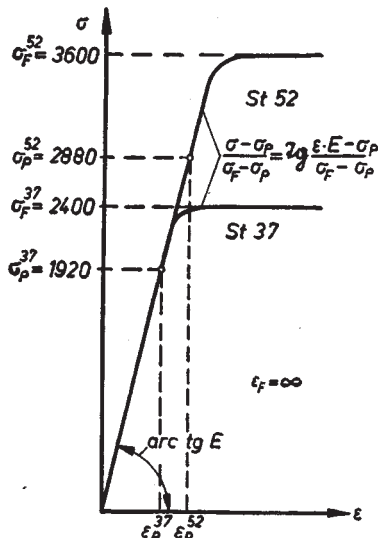


Bild 8

Damit ist sowohl den Versuchswerten als auch den Übergangsbedingungen weitgehend entsprochen. In diesen Formeln ist $\varepsilon \geq \frac{0,8 \sigma_F}{E}$. Für $\varepsilon = \frac{0,8 \sigma_F}{E}$ ergibt sich $\sigma = 0,8 \sigma_F$, und für $\varepsilon = \infty$ beträgt $\sigma = \sigma_F$. Für den Elastizitätsmodul ist $E = 2100000 \text{ kg/cm}^2$ und für σ_F sind Mittelwerte einzusetzen, und zwar für den St 37 der Wert $\sigma_F = 2400 \text{ kg/cm}^2$ und für den St 52 der Wert $\sigma_F = 1,5 \cdot 2400 = 3600 \text{ kg/cm}^2$. Dem Spannungswert σ_K sind zugeordnet der „Belastungsmodul“ $E_1 = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$, der „Entlastungsmodul“ $E_2 = E$ und bei Annahme einer rechteckigen Querschnittsform der Engeßersche „Knickmodul“

$$T = \frac{4 E_1 \cdot E}{(\sqrt{E_1} + \sqrt{E})^2}$$

Aus dem σ - ε -Gesetz erhält man:

$$E_1 = E \left[1 - \left(\frac{\sigma - \sigma_P}{\sigma_F - \sigma_P} \right)^2 \right]$$

Die Grenze zwischen dem elastischen und dem unelastischen Bereich liegt beim St 37 bei $\lambda = 103,898$ und beim St 52 bei $\lambda = 84,833$. Diese Werte ergeben sich aus der Eulerformel

$$\sigma_{Ki} = \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda^2} \text{ für } \sigma_{Ki} = 0,8 \sigma_F$$

Das Verhältnis $\frac{1}{\kappa}$ ist festgelegt mit

$$\frac{1}{\kappa} = \frac{E}{T} = \frac{(\sqrt{E_1} + \sqrt{E})^2}{4 \cdot E_1} = \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{E}{E_1}} \right)^2$$

Mit dem obigen Ausdruck für E_1 und unter Berücksichtigung dessen, daß $\frac{1}{\kappa} = \frac{\sigma_{Ki}}{\sigma_K}$ ist, erhält man

$$\frac{1}{\kappa} = \frac{\sigma_{Ki}}{\sigma_K} = \left[0,5 + \frac{0,5 (\sigma_F - \sigma_P)}{\sqrt{(\sigma_F - \sigma_P)^2 - (\sigma_K - \sigma_P)^2}} \right]^2$$

Für den beiderseits einspannungsfrei gelagerten Druckstab (Normalfall) gilt

$$\sigma_K = \kappa \cdot \sigma_{Ki} = \kappa \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda^2}$$

Nach Einsetzen von κ ergibt sich dann für das σ_K - λ -Diagramm

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_K}{E}} \left[0,5 + \frac{0,5 (\sigma_F - \sigma_P)}{\sqrt{(\sigma_F - \sigma_P)^2 - (\sigma_K - \sigma_P)^2}} \right]$$

und mit $\sigma_P = 0,8 \sigma_F$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_K}{E}} \left[0,5 + \frac{0,1 \sigma_F}{\sqrt{(0,2 \sigma_F)^2 - (\sigma_K - 0,8 \sigma_F)^2}} \right]$$

Die Sicherheitszahl ist $\nu_K = \frac{\sigma_K}{\sigma_{d zul}} = \frac{\sigma_K \cdot \omega}{\sigma_{zul}}$

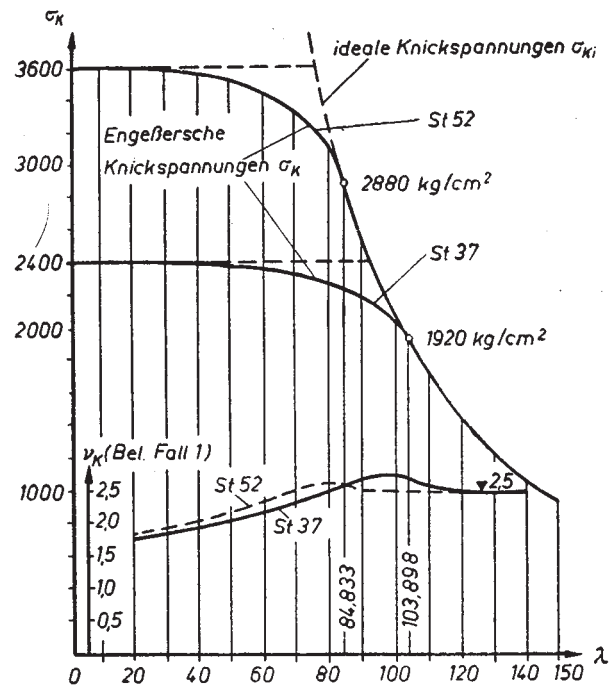


Bild 9

Tafel 3 und Bild 9 enthalten σ_K und ν_K in Abhängigkeit von λ . Für den Belastungsfall 2 (Haupt- und Zusatzkräfte) sind die ν_K -Werte des Belastungsfalles 1 durch das Verhältnis der σ_{zul} -Werte, also bei St 37 durch $1600 : 1400 = 1,143$ und bei St 52 durch $2400 : 2100 = 1,143$ zu dividieren.

Tafel 3

λ	σ_{Ki}	St 37					
		σ_{K^*}	κ	$\sigma_{d zul_1}$	ν_{K_1}	$\sigma_{d zul_2}$	ν_{K_2}
20	51 815	2397	0,046	1349	1,77	1542	1,55
30	23 029	2391	0,104	1294	1,85	1479	1,62
40	12 954	2382	0,184	1230	1,94	1406	1,69
50	8 290	2367	0,285	1158	2,04	1324	1,79
60	5 757	2344	0,407	1078	2,18	1232	1,90
70	4 230	2309	0,548	993	2,33	1135	2,03
80	3 238	2255	0,696	905	2,49	1034	2,18
90	2 559	2170	0,848	819	2,65	936	2,32
100	2 073	2024	0,976	738	2,74	843	2,40
103,898	1 920	$\sigma_P = 1920$	1,000	707	2,72	808	2,38
110	1 713	—	—	663	2,59	758	2,26
120	1 439	—	—	576	2,50	658	2,19
130	1 226	—	—	490	2,50	560	2,19
140	1 057	—	—	423	2,50	483	2,19
150	921	—	—	368	2,50	421	2,19

λ	σ_{Ki}	St 52					
		σ_{K^*}	κ	$\sigma_{d zul_1}$	ν_{K_1}	$\sigma_{d zul_2}$	ν_{K_2}
20	51 815	3592	0,069	1983	1,81	2267	1,58
30	23 029	3578	0,155	1888	1,90	2158	1,66
40	12 954	3553	0,274	1773	2,01	2027	1,75
50	8 290	3511	0,424	1637	2,14	1871	1,88
60	5 757	3439	0,597	1487	2,31	1699	2,02
70	4 230	3317	0,784	1330	2,50	1520	2,18
80	3 238	3093	0,955	1175	2,63	1343	2,30
84,833	2 880	$\sigma_P = 2880$	1,000	1099	2,62	1257	2,28
90	2 559	—	—	1024	2,50	1170	2,19
100	2 073	—	—	829	2,50	947	2,19
110	1 713	—	—	685	2,50	783	2,19
120	1 439	—	—	576	2,50	658	2,19
130	1 226	—	—	490	2,50	560	2,19
140	1 057	—	—	423	2,50	483	2,19
150	921	—	—	368	2,50	421	2,19

*) Die σ_K -Werte sind hier auf ganze Zahlen aufgerundet.