

Bauingenieur

Die richtungweisende Zeitschrift im Bauingenieurwesen



HUESKER

Sonderteil Geotechnik/Tunnelbau

Baumanagement

- Leitbild Bau
- Innovative öffentliche Ausschreibung
- Optimierung von Immobilieninvestitionen

Konstruktiver Ingenieurbau

- Erstellung von Nomogrammen für Praktiker
- Durchstanzen von Fundamenten
- Verbundkräfte in CFK-Lamellen

Nomogramme im Bauingenieurwesen – Zur Konstruktion von Fluchtlinientafeln

M. Schwitzke, V. Bachmann, T. Freyer

Zusammenfassung Die Verwendung von Nomogrammen ist trotz leistungsstarker Rechentechniken im Bauingenieurwesen weit verbreitet. So finden sich im Stahlbau Nomogramme für Abminderungsfaktoren für Biegeknicken und Biegedrillknicken, und im Massivbau sind die Interaktionsdiagramme der Querschnittsbemessung bekannt. Häufig findet sich ein Lösungsverfahren mit drei oder mehreren Variablen, um z. B. eine Vorbemessung durchführen zu können. In diesem Aufsatz werden Verfahren für die Konstruktion solcher Nomogramme vorgestellt, um dem praktisch tätigen Ingenieur die Möglichkeit zu geben, sich ohne große Literaturrecherche einfache Hilfsmittel zu erstellen.

Nomograms at civil engineering – The construction of nomograms

Abstract Despite powerful computers the application of nomograms is very popular in civil engineering. In steel construction nomograms of reduction factors of flexural buckling and torsional flexural buckling can be found. In solid construction there are interaction diagrams. Very often it is a solution algorithm with three or more variables, e. g. for the structural pre-analysis of a corbel. In this article construction procedures for nomograms are shown. The engineer should be able to construct simple supports without comprehensive literature research.

1 Einleitung

Nomogramme nennt man die geometrische Darstellung funktionaler Abhängigkeiten. Ein Nomogramm stellt eine Beziehung zwischen mehreren veränderlichen Größen dar.

$$F(x, y) = 0 \text{ oder } F(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (1)$$

Das Wort Nomographie setzt sich aus den zwei griechischen Wörtern für „Gesetz“ (νόμος) und „schreiben“ (γραφω) zusammen. Es gibt verschiedene Grundsätze, nach denen man

Dipl.-Ing. Marko Schwitzke

Lehrstuhl für Massivbau, BTU Cottbus
Konrad-Wachsmann-Allee 2
03046 Cottbus

www.tu-cottbus.de/massivbau/
Marko.Schwitzke@TU-Cottbus.de

Thomas Freyer

Lehrstuhl für Massivbau, BTU Cottbus
www.tu-cottbus.de/massivbau/
Thomas.Freyer@TU-Cottbus.de

Dipl.-Ing. Volkmar Bachmann

Lehrstuhl für Stahl- und Holzbau
BTU Cottbus
www.tu-cottbus.de/stahlbau/
Volkmar.Bachmann@TU-Cottbus.de

Nomogramme konstruiert. Sie unterscheiden sich darin, wie man die Variablen und die funktionalen Abhängigkeiten zwischen den Variablen definiert.

Die Werte der Variablen, die in die Gleichung eingehen, werden auf einem Nomogramm durch Punkte dargestellt, die die Skalen dieser Variablen bilden. Die durch die Gleichung gegebene funktionale Abhängigkeit zwischen den Variablen geht im Nomogramm in die geometrische Abhängigkeit ihrer Skalen über. Die Abhängigkeit besteht darin, dass Punkte, die die Werte der Variablen bilden und die Gleichung erfüllen, immer auf einer Geraden liegen (Fluchtlinientafeln). Skalen sind das Hauptmittel, um die Variablen darzustellen. Jedes Nomogramm stellt die funktionale Abhängigkeit nur in dem Bereich dar, wie die Grenzen der Skalen bestimmt sind. Die Unterteilung (Graduierung) auf den Skalen der gegebenen Größen muss eine lineare Interpolation zulassen. Die Lösungsskala soll sich zwischen den Skalen der gegebenen Größen befinden. Der Schnittwinkel der Lösungsgeraden mit dem Träger der Lösungsskala soll nicht kleiner als 20–30° sein. Nomogramme sind in sich kein Bemessungsverfahren sondern lediglich ein Speichermittel der Ergebnisse zeitaufwendiger Berechnungen. Parameter werden mit den Lösungen zusammen dargestellt, so dass dadurch eine direkte Bemessung möglich ist [1]. In [2] und [3] werden Algorithmen zur Konstruktion von Nomogrammen bereitgestellt. Ihre Anwendung ist auch dem noch ungeübten „Konstrukteur“ leicht möglich und zugänglich. Zunächst soll aber die Frage diskutiert werden, warum es heute überhaupt noch Sinn macht, Nomogramme zu entwickeln.

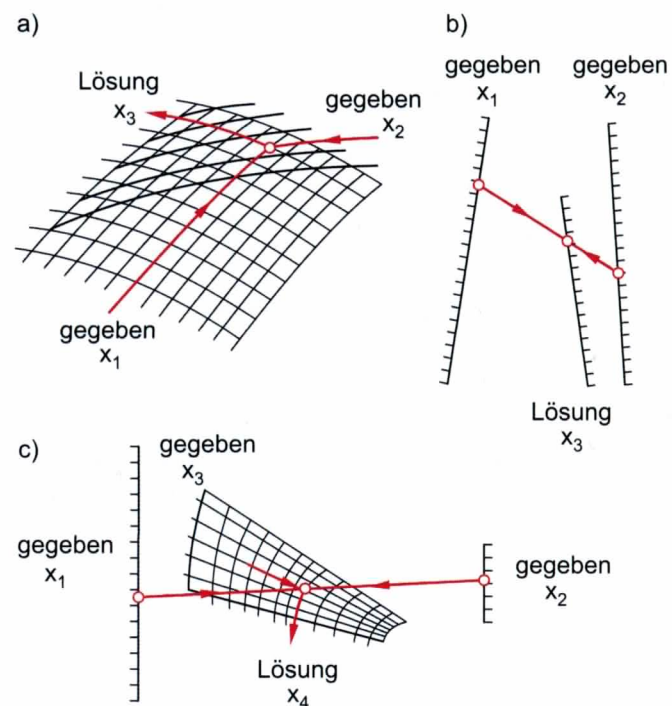


Bild 1. Arten von Nomogrammen
Fig. 1. Different types of nomograms

2 Warum heute noch Nomogramme?

Durch die Verfügbarkeit von leistungsstarker Rechentechnik ist es heute möglich, alle ingenieurtechnischen Fragestellungen zu lösen. Die vorhandenen Softwarelösungen bedienen ein weites Spektrum von Berechnungsaufgaben. Es ergibt sich somit die Frage, ob es heute noch sinnvoll ist, vereinfachte Verfahren mit grafischen Hilfsmitteln zu entwickeln. Die Antwort lautet: Ja. Grafische Hilfsmittel können eine große Hilfe sein, wenn es um die Überprüfung programmgesteuerter Berechnungen geht oder eine rasche Vorbemessung erforderlich ist. Die Argumente in [4] können in Bezug auf den heutigen Stand der Rechentechnik nicht mehr vertreten werden. Es ist deshalb von Bedeutung, die Einsatzgebiete beider Rechenmöglichkeiten zu sondieren, damit jede Aufgabe auf optimale Weise gelöst wird. Es ergibt sich ein gegenseitiges ergänzendes Nebeneinander beider Lösungswege. Ziel ist es, dem Ingenieur zeitraubende Rechenarbeit bei Standardaufgaben zu ersparen, ohne dabei das Verständnis für die jeweilige Aufgabe zu behindern. Als Begründung für die noch heute notwendige Weiterentwicklung der Nomographie im Bauwesen sollen folgende Aspekte aufgezeigt werden [1]:

Praxistauglichkeit: Dem Ingenieur sind Rechner in der baupraktischen Tätigkeit nicht immer verfügbar. Um dennoch (z. B. auf einer Baustelle) auf eine konkrete Aufgabenstellung antworten zu können, bieten sich grafische Hilfsmittel an.

Qualifikation des Anwenders: Bei einer Softwareanwendung sind i.d.R. fundierte Kenntnisse des Anwenders erforderlich. Die Anwendung von Nomogrammen setzt im Allgemeinen eine niedrigere Qualifikation (in Bezug auf die Softwareanwendung) voraus. Die Entlastung von der reinen rechnergestützten Tätigkeit schafft dabei Platz für kreative Aufgaben, wie z. B. die Untersuchung alternativer Möglichkeiten für die Formulierung des Tragwerksmodells.

Darstellung von Zusammenhängen: Dem Ingenieur entsteht ein „Bild“ des Problems. Nicht nur die Lösung, sondern auch eine qualitative Aussage wird bereitgestellt, z. B., wie empfindlich ist ein Ergebnis bezüglich der Eingangsdaten. **Unterschiedliche Ergebnisse:** Werden für dieselbe Aufgabe verschiedene Programme verwendet, können durchaus unterschiedliche Ergebnisse gewonnen werden. Bei der Verwendung von Nomogrammen ist dies weitgehend ausgeschlossen.

Dauerhaftigkeit: Im Gegensatz zu den sich permanent weiterentwickelnden Softwareprogrammen sind Nomogramme meist über einen längeren Zeitraum anwendbar.

Als Beispiel seien die weit verbreiteten Interaktionsdiagramme im Massivbau genannt (Bild 2). Mit ihnen kann auf einfache Weise eine Stützenbemessung durchgeführt werden.

3 Arten von Nomogrammen

3.1 Fluchtlinientafeln

Die Formenvielfalt von Fluchtlinientafeln ist groß (Bild 1 b). Ihre Form wird sowohl von der Gleichung, für die eine Fluchtlinientafel hergestellt werden soll, als auch vom Konstruktionsverfahren bestimmt. Fluchtlinientafeln können einer Umformung unterzogen werden. Die neue Form erleichtert die praktische Anwendung. Bei der Konstruktion einer Fluchtlinientafel werden für die Skalen Parametergleichungen in kartesischen Koordinaten vorgegeben [2].

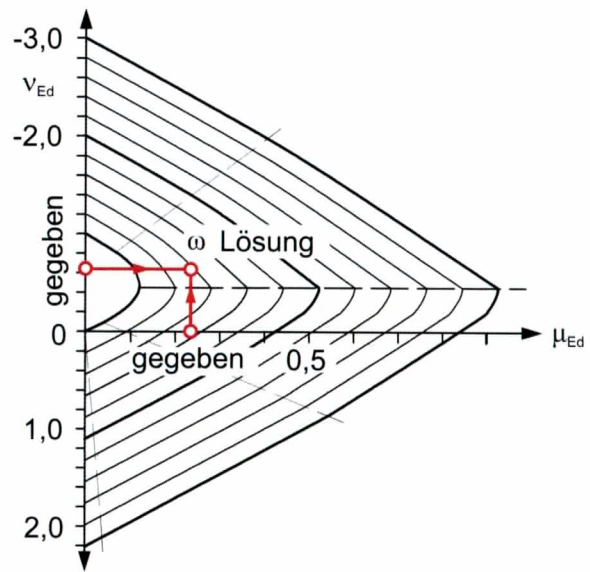


Bild 2. Interaktionsdiagramm zur Stützenbemessung
Fig. 2. Interaction diagram for design of concrete columns

3.2 Netztafeln

Die weite Verbreitung von Netztafeln (Bild 1 a) erklärt sich dadurch, dass eine Gleichung mit mindestens drei Veränderlichen immer leicht durch eine Netztafel dargestellt werden kann. Die Netztafeln bleiben in der Qualität deutlich hinter den Fluchtlinientafeln zurück. Die Genauigkeit der Berechnung ist beim selben Ausmaß der Zeichnung gewöhnlich geringer. Die scheinbare Einfachheit ihrer Konstruktion führt oft zu einem hohen Zeichenaufwand. Netztafeln eignen sich ggf. zur Darstellung einer größeren funktionalen Abhängigkeit. In diesem Aufsatz wird auf allgemeine Konstruktionsprinzipien nicht eingegangen.

3.3 Zusammengesetzte Nomogramme

Ein Verfahren für Gleichungen, die mehr als drei Variablen enthalten, ist die Konstruktion von zusammengesetzten Nomogrammen (Bild 1 c). Die zu konstruierende Gleichung wird in Teilgleichungen mit Hilfsvariablen zerlegt. Diese Grundnomogramme werden anschließend vereinigt, wobei die Hilfsvariablen herausfallen. Die einzelnen Nomogramme können sowohl Fluchtlinien- als auch Netztafeln sein. Die Netztafeln, die zusammen mit Fluchtlinientafeln in das zusammengesetzte Nomogramm eingehen, werden als Binarskalen bezeichnet.

4 Anwendungsbeispiele

4.1 Stahlbau: Berechnung von Hauptspannungen

Als Hauptspannungen σ_I und σ_{II} werden diejenigen Normalspannungen bezeichnet, die bei der Drehung des Koordinatensystems extreme Werte annehmen. Die Bestimmungsgleichung kann anschaulich aus dem Mohrschen Spannungskreis abgelesen werden:

$$\sigma_{II} = \frac{\sigma_z + \sigma_x}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_z)^2 + 4 \cdot \tau_{xy}^2} \quad (2)$$

Wird die Spannung in z-Richtung vernachlässigt, kann Gleichung (2) zusammengefasst werden zu:

$$\sigma_I = \frac{\sigma_x}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_x^2 + 4 \cdot \tau_{xy}^2} \quad (3)$$

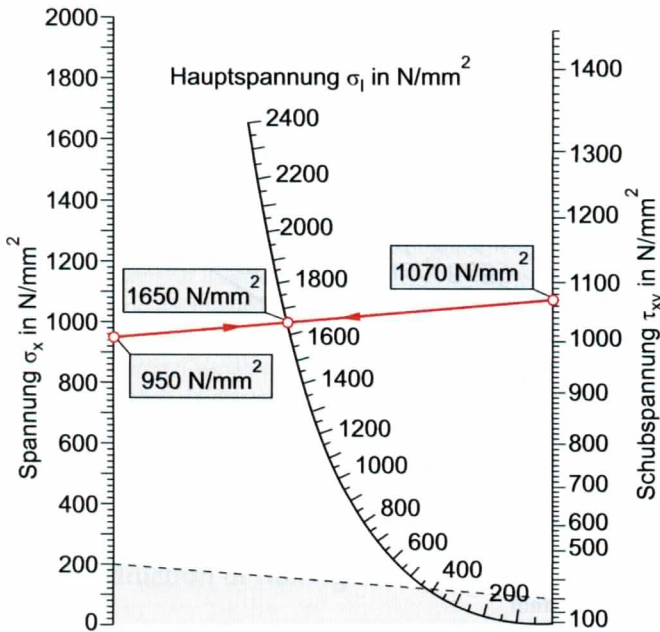


Bild 3. Nomogramm zur Berechnung der Hauptspannung
Fig. 3. Nomogram for calculation of principal stress

In Bild 5 wurde Gleichung (5) als Nomogramm vom Typ Fluchtlinientafel mit parallelen Skalen entwickelt. Die Grundfunktion lautet:

$$\sigma_x \cdot \sigma_1 + \tau_{xy}^2 - \sigma_1^2 = 0 \quad (4)$$

Die Grenzen der Skalen werden mit $f_1(x_1)=0...2800 \text{ N/mm}^2$ ($=\sigma_x$), $f_2(x_2)=0...2400 \text{ N/mm}^2$ ($=\sigma_1$) und $f_3(x_3)=0...1400 \text{ N/mm}^2$ ($=\tau_{xy}$) angenommen. Damit die Skale für x_2 zwischen den Skalen x_1 und x_3 zu liegen kommt, muss $f_1(x_1)$ und $f_3(x_3)$ so gewählt werden, dass ihr Verhältnis stets positiv ist.

Als Beispiel soll die Hauptspannung bei $\sigma_x=950 \text{ N/mm}^2$ und $\tau_{xy}=1070 \text{ N/mm}^2$ bestimmt werden. In Bild 3 kann ein Wert für σ_1 von 1650 N/mm^2 abgelesen werden. Die genaue Bestimmung der Hauptspannung durch Gleichung (3) liefert 1646 N/mm^2 . Dies entspricht einem Ablesefehler von 0,24%. Allerdings kann diese Ablesungenauigkeit im unteren Bereich des Nomogramms (grau schraffiert) nicht mehr gewährleistet werden.

4.2 Stahlbau: Stabkräfte am Fachwerkknoten

Sollen im Stahlbau große Spannweiten überbrückt werden, kommen oft Fachwerkträger zum Einsatz. Die Belastungen werden dabei in Form von Einzellasten auf Knoten im Obergurt eines solchen Trägers aufgebracht. An einem Knoten schließen i.d.R. mehrere Fachwerkstäbe an. Wird ein sog. W-Fachwerk ausgebildet, treffen zwei Fachwerkstäbe unter dem Winkel α aufeinander. Am Knoten kann die Summe der vertikalen Kräfte gebildet werden:

$$P + S_1 \cdot \cos(\alpha) + S_2 \cdot \cos(\alpha) = 0 \quad (5)$$

Es ist ersichtlich, dass beide Stabkräfte gleich groß sein müssen ($S_1=S_2$). Gleichung (5) vereinfacht sich damit zu:

$$P + 2 \cdot S \cdot \cos(\alpha) = 0 \text{ bzw. } 2 \cdot S = \frac{-P}{\cos(\alpha)} \quad (6)$$

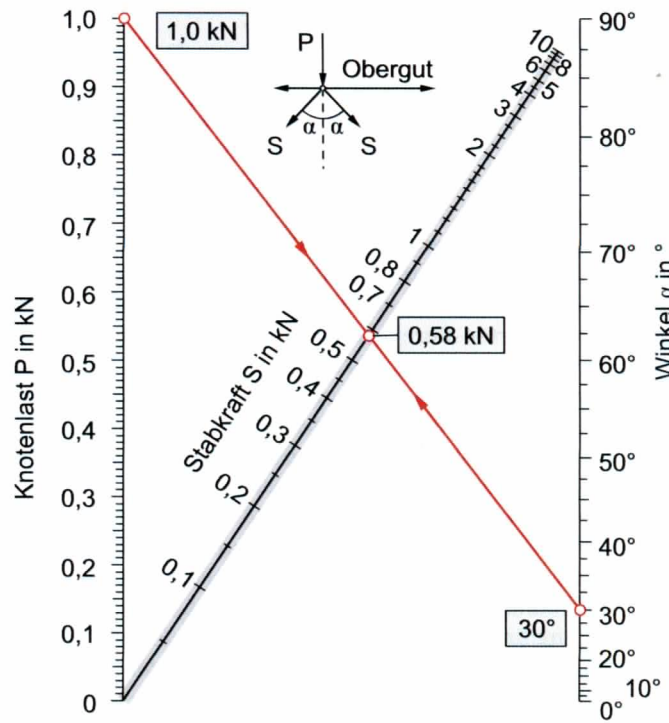


Bild 4. Nomogramm zur Berechnung eines Fachwerkknotens
Fig. 4. Nomogram for calculation of a node

Die Funktionen der Skalen des Nomogramms und die jeweiligen Grenzen werden gewählt: $f_1(x_1)=P$ ($0...1$), $f_2(x_2)=\cos(\alpha)$ ($0^\circ...90^\circ$) und $f_3(x_3)=2 \cdot S$ ($1...10$). Als in der Praxis übliche Werte können Winkel von 20° bis 60° angesehen werden. Soll die Ablesegenauigkeit des Nomogramms verbessert werden, kann Gleichung (6) durch Logarithmieren umgeschrieben werden. Man erhält die folgende Grundgleichung:

$$\log(2) + \log(S) = \log(P) - \log(\cos(\alpha)) \quad (7)$$

Die Funktionen der Skalen ergeben sich zu: $f_1(x_1)=\log(P)$, $f_2(x_2)=-\log(\cos(\alpha))$ und $f_3(x_3)=\log(2)+\log(S)$.

Im Anwendungsbeispiel mit einer Knotenlast von 1 kN und einem Winkel der Druckstreben von $\alpha=30^\circ$ kann für die Stablast S ein Wert von 0,58 kN (Druck) abgelesen werden. Es ist zu beachten, dass S eine Druckkraft (Vorzeichen -) ist.

4.3 Stahlbau: Vergleichsschlankheitsgrad

Bei der Bestimmung der kritischen Biegedrillknicklast muss der ideale Vergleichsschlankheitsgrad bestimmt werden:

$$\lambda_{VI} = \frac{\beta \cdot l}{i_z} \cdot \sqrt{\frac{c^2 + i_M^2}{2 \cdot c^2} \cdot \left[1 + \sqrt{1 - \frac{4 \cdot c^2 \cdot i_P^2}{(c^2 + i_M^2)^2}} \right]} \quad (8)$$

Gleichung (8) stellt eine vereinfachte Form dar. Wird zusätzlich der Einspanngrad des Profils berücksichtigt, ergibt sich [5]:

$$\lambda_{VI} = \frac{\beta \cdot l}{i_z} \cdot \sqrt{\frac{c^2 + i_M^2}{2 \cdot c^2} \cdot \left[1 + \sqrt{1 - \frac{4 \cdot c^2 \cdot [i_P^2 + 0,093 \cdot (\beta^2/\beta_0^2 - 1) \cdot y_M^2]}{(c^2 + i_M^2)^2}} \right]} \quad (9)$$

Diese Gleichung soll für ein C-Profil ausgewertet werden. Allein für dieses Profil sind sechs Systemwerte erforderlich: die Stablänge l, die Flanschbreite b, die Steghöhe h, die

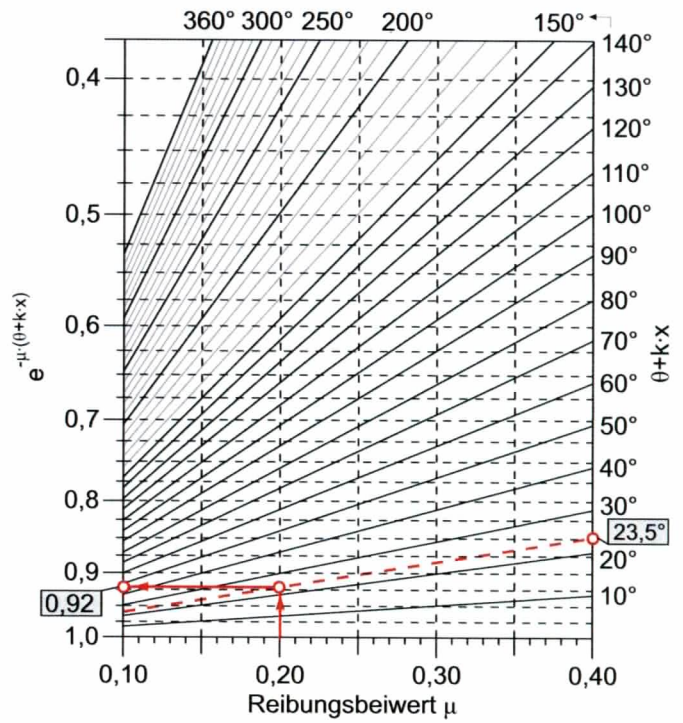
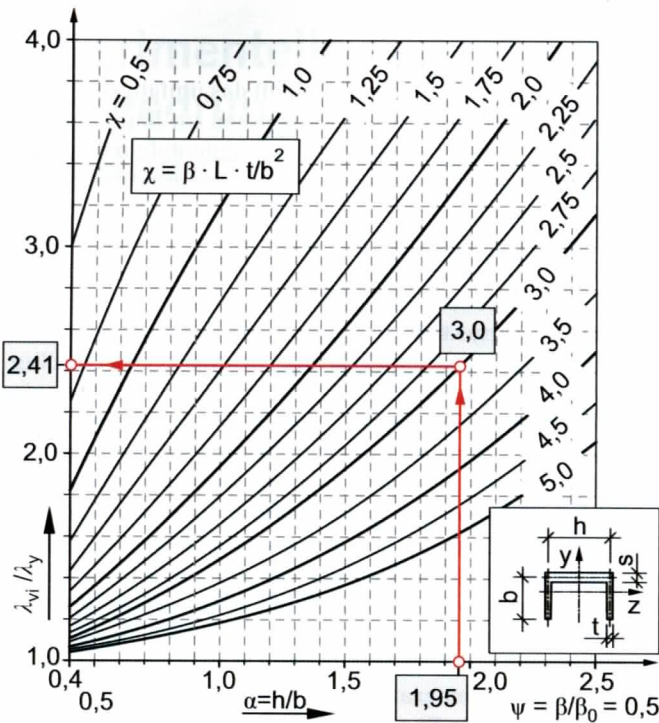


Bild 5. Nomogramm für den ideellen Vergleichsschlankheitsgrad
Fig. 5. Nomogram for slenderness ratio

Bild 6. Nomogramm zur Ermittlung von Spannkraftverlusten
Fig. 6. Nomogram for calculation of prestressing force losses

Blechdicke t , der Einspanngrad für Biegung β und der Einspanngrad β_0 für Verwölbung. Die Auswertung der Gleichung (9) erfolgt in den Grenzen von $0,4 \leq \alpha \leq 2,5$, $0 \leq \chi \leq 5,0$ und $0,5 \leq \psi \leq 2,0$. Eine mögliche Lösung zeigt Bild 5.

Als Beispiel soll ein Profil UPE 120 mit einer Stablänge von 1,25 m ($\beta = 1,0$ und $\beta_0 = 2,0$) untersucht werden. Als Eingangsparameter ergeben sich: $\alpha = 112/58 = 1,95$, $\chi = 1,0 \cdot 125 / 0,8/5,8^2 = 3,0$ und $\psi = 0,5$. Aus Bild 5 lässt sich ablesen: $\lambda_{vi}/\lambda_y = 2,41$. Mit $\lambda_y = 125/4,86 = 25,7$ und $\lambda_z = 125/1,90 = 65,8$ erhält man den ideellen Vergleichsschlankheitsgrad zu $25,7 \cdot 2,41 = 62$.

Für andere Querschnitte bzw. Einspanngrade muss Gleichung (9) erneut ausgewertet werden. So können Tafeln für die Einspanngrade $\psi = 0,5 / 1,0 / 1,5$ etc. bereitgestellt werden.

4.4 Massivbau: Spannkraftverlust aus Reibung

Bei der Vorspannung mit nachträglichem Verbund tritt Reibung zwischen Spannstahl und Hüllrohr auf. Die Dehnung des Spanngliedes führt bei Vorspannung zu einer Relativverschiebung zwischen Spannstahl und Hüllrohr. Weil bei gekrümmten oder umgelenkten Spanngliedern an der Kontaktstelle Hüllrohr und Spannstahl eine Umlenkkraft übertragen wird, führt diese bei einer Verschiebung zu Reibungskräften. Die Spannkraft P an der Stelle x eines Trägers ergibt sich zu:

$$P(x) = P_0 \cdot e^{-\mu \cdot (\theta + k \cdot x)} \tag{10}$$

Mit Gleichung (10) kann der Spannkraftverlust an jeder Stelle berechnet werden. Dabei ist θ die Summe des planmäßigen Umlenkwinkels über die Länge x , k der ungewollte Umlenkwinkel und μ der Reibungsbeiwert zwischen Spannglied und Hüllrohr. P_0 ist die am Spannglied aufgebraachte Höchstkraft.

Die nomografische Behandlung der Gleichung (10) erfolgt auf die Weise, dass sie auf eine lineare Gleichung zurückgeführt wird. Durch Logarithmieren erhält man eine Schlüsselgleichung zur Entwicklung der Strahlentafel nach Bild 6. In Gleichung (10) ist $(\theta + k \cdot x)$ subsumiert durch α :

$$\log(m) = -0,43429 \cdot \mu \cdot \alpha \tag{11}$$

Die Spannkraft P soll für eine maximale Spannkraft von $P_0 = 1971$ kN an der Stelle $x = 18,08$ m ermittelt werden (Beispiel aus [6]). Mit einem Umlenkwinkel von $(\theta + k \cdot x) = (0,52 + 0,005 \cdot 18,08) = 0,41$ ($= 23,5^\circ$) und einem Reibkennwert von $\mu = 0,20$ kann $e^{-\mu \cdot (\theta + k \cdot x)} = 0,92$ abgelesen werden. Die Spannkraft an der Stelle 18,08 m ergibt sich damit zu $P(18,08 \text{ m}) = 1971 \cdot 0,92 = 1813$ kN.

4.5 Massivbau: Vorbemessung einer Konsole

Der Tragfähigkeitsnachweis von Konsolen mit $a_c \leq h_c$ kann gemäß [7] geführt werden. Dabei ist ein Nachweis für die einwirkende Querkraft V_{Ed} erforderlich:

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,max} = 0,5 \cdot v \cdot b_w \cdot z_c \cdot f_{cd} \tag{12}$$

Mit Gleichung (12) kann die erforderliche statische Nutzhöhe d_c direkt aus der einwirkenden Konsolenquerkraft V_{Ed} ermittelt werden. Dabei ist b_w die Konsolenbreite und z_c der Hebelarm der inneren Kräfte, wobei $z_c = 0,9 \cdot d_c$ ist. Je nach Fertigungsart ist für f_{cd} der Teilsicherheitsbeiwert mit $\gamma_c = 1,50$ (Ortbeton) und $\gamma_c = 1,35$ (Fertigteil) anzusetzen. Gegenüber [8] konnte das Nomogramm bis auf den Beton C100/115 erweitert werden. Bei Festigkeitsklassen $\geq C55/67$ ist γ_c mit γ_c' zu vergrößern. Der Abminderungsfaktor v ist zu beachten. Er ist dimensionsgebunden und ergibt sich zu $v \geq (0,7 - f_{ck}/200) \geq 0,5$. Die Gleichung (12) wird in die folgende Grundgleichung für eine Fluchtlinientafel überführt:

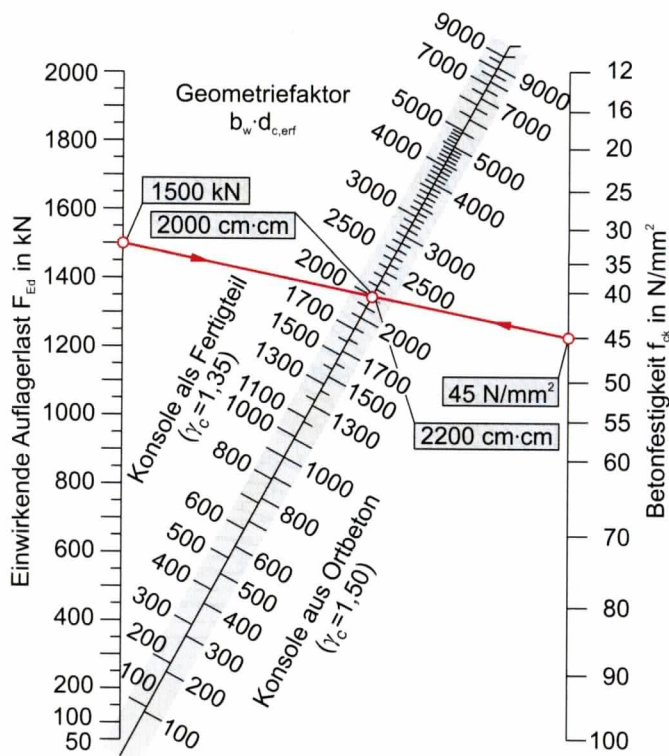


Bild 7. Nomogramm zur Vorbemessung einer Konsole
Fig. 7. Nomogram for structural pre-analysis of a corbel

$$\frac{45}{1000} \cdot \frac{1}{\gamma_c} \cdot b_w \cdot d_{c,erf} = \frac{V_{Ed}}{\left(\frac{7}{10} - \frac{1}{200} \cdot f_{ck}\right) \cdot f_{ck}} \quad (13)$$

Die Funktion $f_1(u_1)$ entspricht V_{Ed} , $f_2(u_2)$ ist $(7/10 - 1/200 \cdot f_{ck}) \cdot f_{ck}$ und $f_3(u_3)$ ist der sog. Geometriefaktor $b_w \cdot d_{c,erf}$.

Als Beispiel soll die erforderliche Nutzhöhe einer Konsole mit $V_{Ed}=1\,500\text{ kN}$ ermittelt werden. Die vorhandene Stützenbreite soll $b_w=40\text{ cm}$ sein. Es kommt ein Beton der Festigkeit C45/55 zur Anwendung. Aus **Bild 7** kann ein Geometriefaktor $b_w \cdot d_{c,erf}$ von $2000\text{ cm}\cdot\text{cm}$ und $2220\text{ cm}\cdot\text{cm}$ abgelesen werden. Die erforderliche Nutzhöhe ergibt sich damit zu: $d_{c,erf}=50,0\text{ cm}$ (Fertigteil) und $d_{c,erf}=55,5\text{ cm}$ (Ortbeton). Ein weiteres Nomogramm zur Vordimensionierung von Konsolen findet sich in [8].

5 Fazit und Ausblick

In diesem Aufsatz wurde beispielhaft das umfangreiche Anwendungsspektrum von Nomogrammen im Bauingenieurwesen aufgezeigt. Für einfache Fluchtlinientafeln sind Konstruktionsverfahren vorgestellt, die es dem praktisch tätigen Ingenieur ermöglichen, einfach und schnell robuste Nomogramme aufzustellen. Im Focus steht dabei, die in der Literatur anspruchsvollen Verfahren aufzuschlüsseln und auf praktische Anwendungsformeln [2] und [3] zu verweisen. Anhand der vorgestellten Beispiele aus den Bereichen Stahlbau und Massivbau konnte gezeigt werden, dass dem Einsatz von Nomogrammen im Bauingenieurwesen trotz der allgegenwärtigen Rechentechnik nichts entgegensteht. Dem entwerfenden Ingenieur werden so praktische Hilfsmittel (Arbeitsblätter) in die Hand gegeben, um ohne großen Aufwand fundierte Aussagen zu erhalten. Beim Entwurf eines Tragwerkes werden primär die Bauteilabmessungen gefordert. Als Beispiel dient hier das Nomogramm aus Bild 7 zur Bestimmung der erforderlichen Nutzhöhe von Konsolen in Massivbauweise.

In einem folgenden Aufsatz sollen Verfahren zur Berechnung von Netznomogrammen vorgestellt werden. Mit ihnen können Problemstellungen mit wesentlich mehr Variablen gelöst werden.

Literatur

- [1] Haro, C. E.: Ein linearisiertes Bemessungsverfahren für Stahlbetonstützen – Vergleich mit dem Modellstützenverfahren nach EC2. Dissertation, TU Hamburg-Harburg, 1994
- [2] Newski, B. A.: Praktikum der Nomogrammkonstruktionen. Akademie-Verlag, Berlin, 1955
- [3] Pentkowski, M.W.: Nomographie. Akademie-Verlag, Berlin, 1953
- [4] Zühlke, M.: Hat die Nomographie im Zeitalter der elektronischen Rechenmaschinen noch Daseinsberechtigung? Zeitschrift für wissenschaftliche Fertigung (München), J. 54, Heft 4, S. 104–111, 1959
- [5] Klöppel, K.; Schardt, R.: Beitrag zur praktischen Ermittlung der Vergleichsschlankheit IV_i von mittig gedrückten Stäben mit einfachsymmetrischem offenem dünnwandigem Querschnitt. Der Stahlbau, J. 27, Heft 2, S. 35–42, 1958
- [6] Avak, R.; Glaser, R.: Spannbetonbau. 2. Auflage, Bauwerk-Verlag, Berlin, 2007
- [7] Deutscher Ausschuss für Stahlbetonbau. Heft 525, Beuth-Verlag, Berlin, 2003
- [8] Schwitzke, M.: Hilfsmittel für die Vorbemessung von Stahlbetonkonsolen. Bautechnik 86 (2009), Heft 6, S. 339–341, 2009.