

# Aktuelle Berechnungs- und Nachweisverfahren für Kranbahnträger

Christoph Seeßelberg, Fachhochschule München, Studiengang Stahlbau

## 1. Nach welchen Normen sind Kranbahnträger zu bemessen?

Der Tragsicherheitsnachweis von Kranbahnen (Bild 1) ist seit der Einführung der Anpassungsrichtlinie Stahlbau [1] im Jahr 1995 nach DIN 18800 [2] zu führen. Einzelne Abschnitte der unveränderten DIN 4132 "Kranbahnen" [3] werden nun durch Bestimmungen aus der Anpassungsrichtlinie überschrieben. So ist eine Normensituation entstanden, die durch das Nebeneinander von aktualisierten Regeln und Resten des alten Sicherheitskonzepts geprägt ist: während Spannungen und Stabilität mit Hilfe des neuen Konzepts nach DIN 18800 nachgewiesen werden, ist die Betriebsfestigkeitsuntersuchung wie bisher unverändert nach dem  $\sigma_{zul}$ -Prinzip durchzuführen. Auch der Nachweis der Kranbrücke erfolgt weiterhin gemäß DIN 15018 "Kranbau" [4] nach dem alten Sicherheitskonzept.

Auf eine Neuauflage der DIN 4132 wurde verzichtet, da mit den in den nächsten Jahren gültig werdenden Eurocodes ohnehin eine neue Generation von Normen auch für Kranbahnen entsteht. Die Lastannahmen für Kranbahnträger werden zukünftig im Eurocode 1-Teil 5 [5] geregelt, während die erforderlichen Nachweise der Kranbahnträger in Eurocode 3-Teil 6 [6] behandelt werden.

Im folgenden wird zuerst auf die jetzt gültige, neue Normenlage eingegangen. Was hat sich geändert? Welche Schwierigkeiten können auftreten, wenn die Nachweise nach der Anpassungsrichtlinie geführt werden und wie sind sie zu lösen? Was gilt es zu beachten, wenn Computerprogramme für den Nachweis eingesetzt werden sollen? Der Schwerpunkt der Betrachtungen liegt dabei auf dem Biegedrillknicknachweis.

In einem Ausblick wird dann auf die zukünftig gültigen europäischen Fachnormen für Kranbahnträger eingegangen. Mit welchen weiteren Änderungen ist im Rahmen ihrer Einführung zu rechnen?

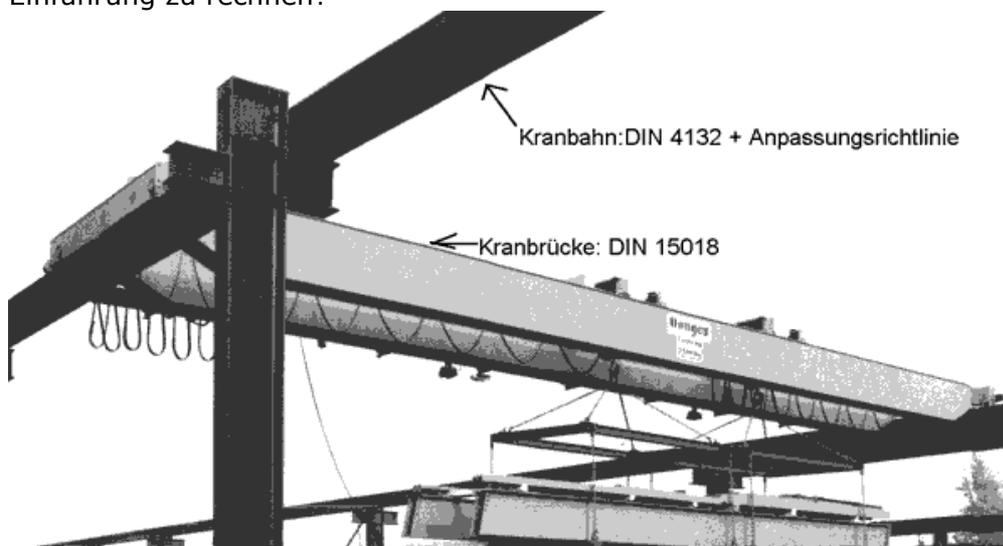


Bild 1: Zweiträger-Brückenlaufkran auf Kranbahnträgern

## 2. Einwirkungen und Nachweise

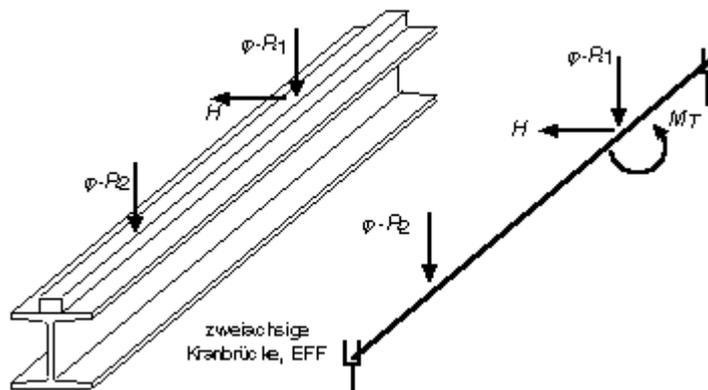
Mit der Anpassungsrichtlinie sind die alten Kranbahn-Lastfälle **H** (Eigenlasten  $G$  und vertikale Radlasten  $R$ ), **HZ** (hauptsächlich horizontale Radlasten  $H$  aus Spurführungs- und Massenkräften) und **HS** (z.B. Puffer-Anpralllasten) zugunsten einer Einteilung aller Lasten in ständige, veränderliche und außergewöhnliche Einwirkungen gemäß DIN 18800 abgeschafft worden.

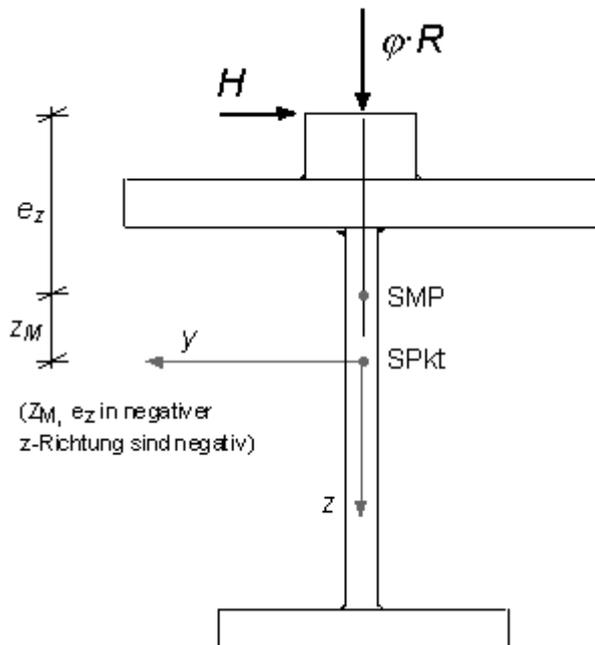
Als wesentliche Beanspruchungen sind neben der Hauptbiegung  $M_y$  (infolge vertikaler Radlast  $R$ ) und der Biegung um die schwache Achse  $M_z$  (inf. horizontaler Radlasten  $H$  aus Spurführungs- und Massenkräften der Kranbrücke) auch Torsionsmomente  $M_T = H \cdot e_z$  zu berücksichtigen, die sich aus dem exzentrischen Angriff von  $H$  ergeben (Bild 2). Die Längskräfte aus der Beschleunigung der Kranbrücke und den Lasten aus Pufferanprall können für den Nachweis des Kranbahnträgers i.d.R. vernachlässigt werden, für die Bemessung der Kranbahnstützen und ihrer Verbände sind sie jedoch zu berücksichtigen.

Aus den Einwirkungen werden die üblichen Grundkombinationen nach DIN 18800 T1 El.710 gebildet. Sämtliche vertikalen Radlasten nach DIN 4132, Kap. 3.1, die von bis zu zwei Kranbrücken pro Kranbahn verursacht werden, sind dabei als eine einzige veränderliche Einwirkung zu werten, gleichzeitig wirkende horizontale Lasten werden als weitere veränderliche Einwirkungen angesehen, auch wenn sie von denselben Kranbrücken verursacht werden. Treten ausnahmsweise maximale Vertikal- und Horizontallasten immer gemeinsam an einer Stelle der Kranbahn auf, so gelten beide zusammen als eine einzige Einwirkung.

Zur Exzentrizität der vertikalen Radlasten: Normgemäß sind in bestimmten Fällen Ausmittigkeiten von  $e_y = k/4$  ( $k$  = Schienenkopfbreite) zu berücksichtigen. Nach DIN 4132 Kap. 3.1.2 ist die Exzentrizität der vertikalen Radlast grundsätzlich bei der Betriebsfestigkeitsuntersuchung in den Beanspruchungsgruppen B4 bis B6 zu unterstellen. DIN 4132 enthält aber keine Aussage über die beim BDK-Nachweis und beim allgemeinen Spannungsnachweis in den Beanspruchungsgruppen B4 bis B6 anzunehmende Exzentrizität; d.h. es ist weder gesagt, daß eine solche Exzentrizität anzunehmen ist noch, daß eine solche Exzentrizität nicht angenommen werden muß (wie es für B1 – B3 ausdrücklich angegeben ist). Beim BDK-Nachweis erscheint es – insbesondere auch wegen der nach DIN 18800 T2 El. 201 ohnehin zu berücksichtigenden Ersatzimperfektionen - gerechtfertigt, keine zusätzliche Ausmitte der Last zu berücksichtigen. (Nach Eurocode 1-Teil 5 [5] wird übrigens demnächst für alle Nachweise und in allen Beanspruchungsgruppen eine Exzentrizität der vertikalen Radlast anzusetzen sein! )

Bild 2: Beanspruchungen eines Kranbahnträgers, statisches System, Querschnitt





Welche Nachweise sind i.d.R. für den Kranbahnträger zu führen ?

a) Tragsicherheitsnachweis

- Allgemeiner Spannungsnachweis gemäß DIN 18800 T1 nach dem Verfahren elastisch-elastisch oder evtl. auch elastisch-plastisch (zum Nachweis el.-pl. siehe Kap. 3.5).
- Biegedrillknicknachweis (BDK-Nachweis) nach DIN 18800 T2 (siehe Kap. 3)
- Beulnachweis des Stegblechs unter der Radlast nach DIN 18800 T3 (siehe Kap. 4)
- Betriebsfestigkeitsuntersuchung nach DIN 4132

b) Gebrauchstauglichkeitsnachweis (nach DIN 4132 nicht zwingend gefordert)

- Horizontale und vertikale Durchbiegung (siehe Kap. 5)
- niedrigste Eigenfrequenz der Krananlage

Da der Allgemeine Spannungsnachweis (AS) problemlos nach DIN 18800 T1 durchführbar ist, wird ihm kein gesondertes Kapitel gewidmet. Wird der Biegedrillknicknachweis (BDK-Nachweis) als Spannungsnachweis nach Theorie II.Ordnung geführt (siehe Kap. 3.2), so können beide Nachweise (AS und BDK) gemeinsam erledigt werden. Die zuweilen geübte Praxis, zunächst den AS mit den nach Th.I.O. errechneten Spannungen auszuführen, um dann in einem zweiten Schritt den BDK-Nachweis als Spannungsnachweis mit den nach Th.II.O. errechneten Beanspruchungen zu führen, erscheint nicht sinnvoll und bedeutet überflüssigen Zusatzaufwand. Wenn ohnehin Spannungen nach Theorie II.Ordnung berechnet werden, sollten sowohl der AS als auch der BDK-Nachweis damit geführt werden.

Die Betriebsfestigkeitsuntersuchung hat sich im Zuge der Einführung der Anpassungsrichtlinie nicht geändert, sie ist nach wie vor nach dem alten Sicherheitskonzept zu führen (d.h.  $\gamma_F = \gamma_M = 1,0$ ), weshalb ihr ebenfalls kein eigenes Kapitel gewidmet ist. Die vorhandenen Oberspannungen sind mit den zulässigen Beanspruchungen aus DIN 4132, Tab. 8 – Tab.18 zu vergleichen. Ausführliche Beispiele für die wichtigen, recht komplexen und bei Ingenieuren manchmal durchaus unbeliebten Betriebsfestigkeitsberechnungen und -nachweise sind [7], Kap. 5.3.5 zu entnehmen.

### 3. Der BDK-Nachweis von Kranbahnen nach DIN 18800 T2

#### 3.1 BDK-Nachweis nach dem Ersatzstabverfahren

##### 3.1.1 BDK-Nachweis als Biegeknicknachweis des gedrückten Obergurtes

Nach der mittlerweile nicht mehr gültigen DIN 4114 konnte der BDK-Nachweis vereinfacht als Nachweis gegen Ausknicken des als Stab angenommenen Kranbahnträgerdruckgurtes geführt werden [8]. Dieses Prinzip wurde zwar in DIN 18800 T2 El.310 übernommen, jedoch ist seine Anwendung auf einachsige Biegung beschränkt, die bei den stets zweiachsig belasteten Kranbahnen nicht gegeben ist. Lohse [7] zeigt eine aktualisierte Form des Nachweises des Obergurtes gegen Ausknicken, die nach Ansicht des Autors eine ausreichende Sicherheit gewährleistet. Dabei wird die Horizontallast – ersatzweise für die Berücksichtigung von Torsion - allein dem Obergurt (Flansch plus 1/5 Steg) zugeteilt. Der Obergurt stellt einen Stab mit Druckkraft und einachsiger Biegung dar, für den nun nach DIN 18800 T2 die Biegeknicksicherheit bei Druckkraft  $N$  und einachsiger Biegung  $M_z$  nachgewiesen wird. Die Gurtdruckkraft errechnet sich aus der Biegung der Radlasten:

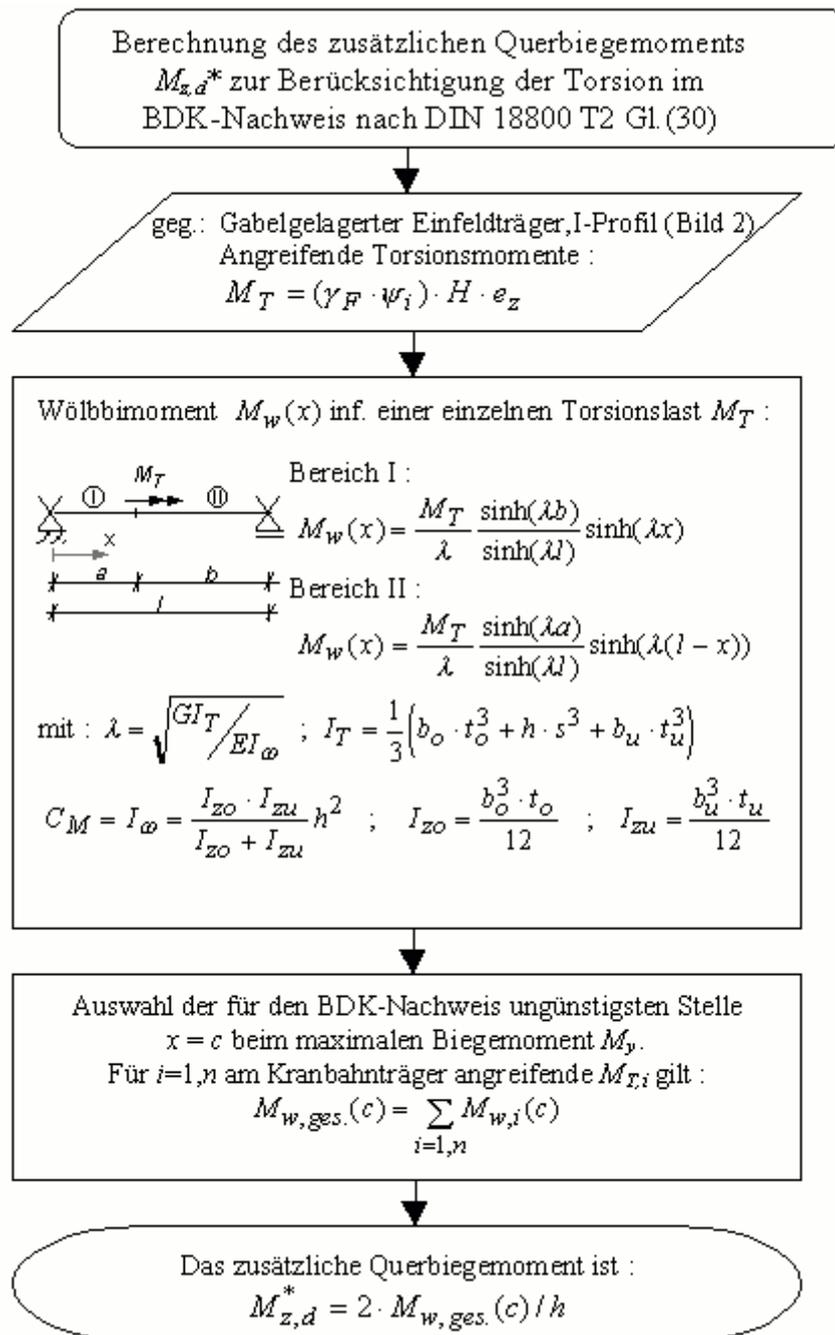
$N = M_y \cdot S_{y,Og} / I_y$ . Darin ist  $M_y$  das maximale Hauptbiegemoment,  $I_y$  das Flächenträgheitsmoment und  $S_{y,Og}$  das statische Moment des abgeschnittenen Obergurtes bezogen auf die y-Achse durch den Schwerpunkt des Gesamtquerschnitts (Näherungsweise läßt sich auch verwenden:  $N = M_y / h$ ). Das Querbiegemoment  $M_z$  des Obergurt-Druckstabes errechnet sich aus den horizontalen Lasten  $H$ .

Dieser Nachweis liegt i.d.R. auf der sicheren Seite, der Aufwand ist deutlich geringer als bei dem im folgenden beschriebenen Nachweis nach DIN 18800 T2 Gl.(30).

### 3.1.2 Ersatzstabverfahren nach DIN 18800T2 Gleichung (30)

Der BDK-Nachweis nach dem vereinfachten Verfahren (Ersatzstabverfahren) ist gemäß El. 323 Gleichung (30) führbar, wenn der Kranbahnträgerquerschnitt einfach- oder doppelsymmetrisch ist. Unsymmetrische Profile können nicht mit dem Ersatzstabverfahren nachgewiesen werden. Obwohl es in Anmerkung 1 zu Element 323 heißt: "Planmäßige Torsion ist in diesem Nachweis nicht erfaßt", läßt sich mit Hilfe eines in ein zusätzliches Querbiegemoment  $M_{z,d}^*$  umgerechnetes Torsionsmoment der Nachweis dennoch führen ([9] T2, Kap. 3.6 und Bsp. 8.12). Die Nachweisgleichung lautet (bei  $N=0$ ):

*Bild 3:*  
Bestimmung des  
zusätzlichen  
Biegemoments  
 $M_{z,d}^*$  als Ersatz  
für das  
Torsionsmoment



$$\frac{M_{y,d}}{\kappa_M \cdot M_{pl,y,d}} \cdot k_y + \frac{M_{z,d} + M_{z,d}^*}{M_{pl,z,d}} \cdot k_z \leq 1 \quad (1)$$

Bestimmung von  $M_{z,d}^*$ : Zunächst wird der Wölbanteil des bei Kranbahnen stets planmäßig auftretenden Torsionsmoments  $M_T$  in ein Wölbmoment  $M_w$  umgerechnet, das wiederum näherungsweise in ein zusätzliches Querbiegemoment  $M_{z,d}^*$  transformiert wird. Die einzelnen Berechnungsschritte für  $M_{z,d}^*$  sind für einen beidseitig gabelgelagerten Einfeldträger mit I - Querschnitt nach Bild 2 in Bild 3 dargestellt. Als auf der sicheren Seite liegende Abschätzung läßt sich – ausgehend von der Annahme, die Horizontallast

wird alleine dem Obergurt zugewiesen – angeben:  $M_x^* = M_x$ .

Wölbmomente  $M_w$  für viele andere Auflagerungssituationen können z.B. Cywinski [10] entnommen werden. Das Endfeld eines Mehrfeldträgers kann dabei näherungsweise (etwas auf der unsicheren Seite liegend) als Einfeldträger mit einseitiger Wölbeinspannung betrachtet werden, ein Mittelfeld als beidseitig wölbeingespannter Einfeldträger. Die weiteren Parameter aus der Nachweisgleichung (1) lassen sich wie folgt angeben :

- Für  $N = 0$  ergibt sich nach DIN 18800 T2 El.320  $k_y = 1,0$  und nach El.321  $k_z = 1,0$  .

-  $\kappa_M = \left( \frac{1}{1 + \bar{\lambda}_M^2} \right)^{1/n}$  für  $\bar{\lambda}_M > 0,4$  ; andernfalls ist  $\kappa_M = 1$  ; siehe El.311 (2)

- bezogener Schlankheitsgrad  $\bar{\lambda}_M = \sqrt{M_{pl,y,d} / M_{ki,y,d}}$  (3)

- Trägerbeiwert  $n = 2$  (geschweißter Kranbahnträger) bzw.  $n = 2,5$  (Walzprofil)

Das ideale Biegedrillknickmoment  $M_{ki,y,d}$  kann nach DIN 18800 T2 Gl.(19) bestimmt werden, wenn die Kranbahn einen doppelsymmetrischen Querschnitt aufweist. Da der in Gl.(19) eingehende Momentenbeiwert  $\zeta$  in der Norm nur für eine beidseitige Gabelagerung und nicht für alle vorkommenden Momentenverläufe angegeben ist, ist man zur Bestimmung von  $\zeta$  und  $M_{ki,y,d}$  in allen anderen Fällen auf die Literatur (z.B. [11], [12], [13], [14] Tafel 7.48, [15]) angewiesen. Für doppelsymmetrische Kranbahnträger mit einer Höhe kleiner 60 cm kann  $M_{ki,y,d}$  auf der sicheren Seite liegend nach DIN 18800 T2 Gl.(20) abgeschätzt werden, ohne daß der Beiwert  $\zeta$  benötigt wird. Mit geeigneter Software (z.B. BTII [16] ) kann das ideale Biegedrillknickmoment  $M_{kiy}$  (Verzweigungslast als kleinster Eigenwert der Steifigkeitsmatrix) ebenfalls berechnet werden.

Sind die oben aufgeführten Größen bestimmt, kann nun der BDK-Nachweis nach dem Ersatzstabverfahren mit Gleichung (1) geführt werden.

Computerprogramme, mit denen grundsätzlich komplette BDK-Nachweise gemäß DIN 18800 T2 nach dem Ersatzstabverfahren geführt werden können, sind für den Nachweis von Kranbahnen meist unbrauchbar, da Torsionsmomente i.d.R. nicht berücksichtigt werden können.

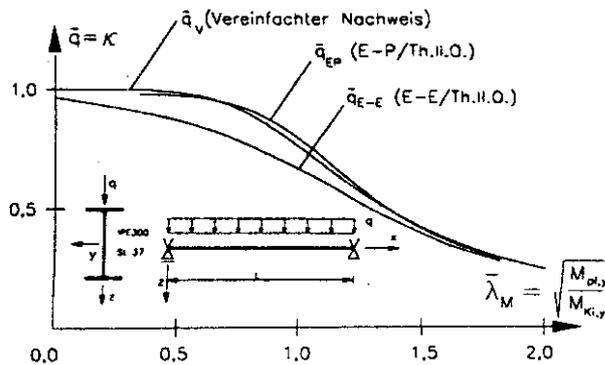


Bild 4a: Biegedrillknicktragfähigkeit eines Einfeldträgers bei unterschiedlichen Nachweisverfahren [21]

Interessant ist die Frage, welche Tragfähigkeiten sich mit dem Ersatzstabverfahren im Vergleich zu einem Spannungsnachweis nach Th.II.O. (Verfahren el.-el.) nachweisen lassen. Bild 4a (zitiert nach [21]) zeigt, daß sich mit dem Ersatzstabverfahren in bestimmten Fällen (geringe bis mittlere Schlankheiten  $\bar{\lambda}_{M}$ ) wegen der Nutzung plastischer Reserven höhere Tragfähigkeiten nachweisen lassen als mit einem Spannungsnachweis el.-el. .

### 3.2 BDK-Nachweis als Spannungsnachweis nach Th.II.O.

#### 3.2.1 Nachweisführung

Eine empfehlenswerte Alternative zum BDK-Nachweis von Kranbahnträgern nach dem Ersatzstabverfahren stellt die Spannungsberechnung nach Theorie II. Ordnung dar, die von Hand oder besser rechnergestützt z.B. mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) möglich ist [17]. Die Spannungsberechnung per Hand ist in [18] beschrieben und z.B. für Einfeldträger nach Petersen [12] Tafel 7.29 möglich. Ein Spannungsnachweis nach Th.II.O. ist – besonders wenn geeignete Software zur Verfügung steht - i.d.R. einfacher als die Anwendung des Ersatzstabverfahrens.

Die ungünstigsten Beanspruchungen werden meist durch die Einwirkungskombination  $1,35 \cdot (g + \varphi \cdot R + H)$  hervorgerufen ( $\varphi$  = Schwingbeiwert nach DIN 4132, Tab.1). Sind die Horizontallasten sehr gering, kann statt dessen auch die Grundkombination  $(1,35 \cdot g + 1,5 \cdot \varphi \cdot R)$  für das BDK-Problem maßgebend werden. Treten ausnahmsweise maximale Vertikal- und Horizontallasten immer gemeinsam an einer Stelle der Kranbahn auf, so ist die Kombination  $1,35 \cdot g + 1,5 \cdot (\varphi \cdot R + H)$  zu berücksichtigen.

Der Spannungsnachweis der Kranbahnen kann nach dem Verfahren elastisch-elastisch (DIN18800 T2, Tab.1) erfolgen. Das Verfahren elastisch-plastisch ist ebenfalls anwendbar (siehe Abschnitt 3.5), jedoch wird dann besonders bei den höheren Beanspruchungsgruppen öfter die Betriebsfestigkeitsuntersuchung oder auch die Durchbiegungsbeschränkung für die Querschnitte dimensionierend.

Gemäß DIN 18800 T2 El.201 ist eine Ersatzimperfektion zu berücksichtigen, wenn der BDK-Nachweis als Spannungsnachweis geführt wird. Die Größe der als Ersatzimperfektion zu berücksichtigenden Vorkrümmung ist nach DIN 18800 T2 Tab.3 zu wählen und gemäß El. 201 und 202 mit dem Faktor  $a \cdot b$  zu verkleinern ( $a=0,5$  für BDK-Nachweis; Faktor  $b=2/3$  für Nachweis nach dem Verfahren el.-el.;  $b=1,0$  für Verfahren el.-pl.).

Wie ist die Ersatzimperfektion anzusetzen? Es ist ausreichend, wenn die angenommene Vorverformung eine genügend große Komponente der zum kleinsten Eigenwert zugehörigen Verformungsfigur aufweist, sie muß nicht affin zu dieser sein. Das wird mit

der alleinigen Annahme einer Vorkrümmung erreicht (Bild 4b). Die Vorkrümmung ist idealerweise horizontal in y-Richtung (über das Vorzeichen muß die ungünstigste Richtung eingestellt werden!) anzusetzen oder aber - z.B. bei Handrechnung - ersatzweise als Ausmitte der vertikalen Radlast zu berücksichtigen. Eine Vorverdrehung der Stabachse braucht nicht vorgesehen zu werden ([9], T2, Kap.

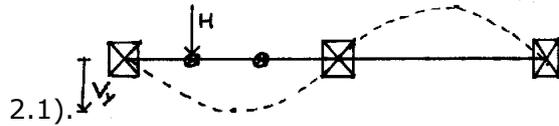


Bild 4b: Ansatz der Ersatzimperfektion bei einem zweifeldrigen Kranbahnträger; Darstellung im Grundriß

Nach DIN 18800 T2 El.121 ist der Tragsicherheitsnachweis el.-el. erfüllt, wenn für die Vergleichsspannung gilt:

$$\max \sigma_v \leq 1,1 \cdot f_{y,d} \quad (4)$$

In (4) ist durch den Faktor 1,1 ausgenutzt, daß örtlich begrenzte Plastizierungen zulässig sind. Die örtliche Begrenzung ist nach DIN18800 T1, El.749 gegeben, wenn (bei  $N=0$ ) die Spannungen aus Haupt- und Nebenbiegung jeweils für sich genommen  $\max 0,8 \cdot \sigma_{r,d}$  betragen. Da bei Kranbahnträgern i.d.R. die Spannung an einer seitlichen Kante des Oberflansches maßgebend wird (max. Druckspannung aus Haupt- und Nebenbiegung), wo alle anderen Spannungskomponenten zu Null werden, ist dort  $|\sigma_x| = \sigma_v$ . Gl. (4) vereinfacht sich für die Flanschecke in diesem Fall zu:

$$\max |\sigma_x| \leq 1,1 \cdot f_{y,d} \quad (5)$$

### 3.2.2 Berechnungen von Kranbahnträgern mit Finite-Element-Programmen

Die Verwendung geeigneter FEM-Programme zur Spannungsberechnung der Kranbahnträger ist i.d.R. wirtschaftlicher als eine Berechnung von Hand. Doch längst nicht alle Stabwerksprogramme sind für diese Aufgabe überhaupt geeignet. Welche zusätzlichen Forderungen sind an ein FEM-Programm zu stellen, damit es für die Berechnung von Kranbahnträgern eingesetzt werden kann?

- Das Programm muß für räumliche Beanspruchungszustände geeignet sein (Stabwerksprogramme für in der Ebene belastete Tragwerke sind also für die Berechnung von Kranbahnen unbrauchbar, da mit ihnen die Querbiegung und die Torsion des Kranbahnträgers nicht erfaßt wird.)
- In das zur Verfügung stehende Balkenelement muß die Wölbkrafttorsion implementiert sein, da sich sonst deutlich zu große Verformungen und Spannungen ergeben. Entsprechende Balkenelemente belegen an den Knoten einen zusätzlichen Freiheitsgrad, die Verdrillung  $\vartheta'$ .
- Die Einflüsse nach Theorie II.O., die aus der Querschnittsverdrehung  $\vartheta$  und der sich damit ergebenden Vergrößerung des Hebelarms  $e_y \approx \vartheta \cdot e_z$  der am Obergurt angreifenden Radlasten resultieren, müssen berücksichtigt werden (Bild 5). Einige "normale" Stabwerksprogramme rechnen nur mit denjenigen Anteilen aus Th.II.O., die sich aus der Wirkung der Längskräfte ergeben und vernachlässigen damit die bei Kranbahnträgern entscheidende Vergrößerung der Torsionslast  $M_T = H \cdot e_z + \varphi \cdot R \cdot e_y$  infolge der Querschnittsverdrehung  $\vartheta$ . Erfüllt ein Programm diese Forderung nicht, können sich viel zu geringe Spannungen aus der Rechnung ergeben.

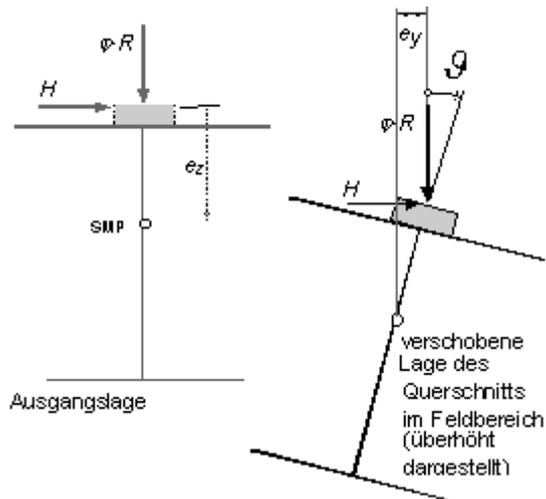


Bild 5: Hebelarm der Radlast  $e_y$ , verursacht durch die Querschnittsverdrehung  $\varphi$

d) Als Querschnittstypen sollten beliebige Walz- und Schweißprofile einbaubar sein. Die statische Berücksichtigung der angeschweißten Schiene, die bei kleinen Kranbahnquerschnitten einen nützlichen Beitrag zur Querschnittstragfähigkeit leistet, sollte möglich sein

e) Ersatzimperfektionen gemäß DIN 18800 T2, Tab.3 sollten zuschaltbar sein.

Auf dem Markt sind einige FEM-Programme verfügbar, die alle wichtigen Anforderungen erfüllen. Stellvertretend für weitere ebenfalls gut geeignete, aber dem Autor nicht bekannte Produkte seien die Programme "BT II" [16] der Friedrich + Lochner GmbH und "DLT II" von Frauendorfer Software [19] genannt, die für die Berechnung von Kranbahnträgern gut einsetzbar sind. BTII verfügt dabei auch über die Option, die ungünstigste Laststellung einer Lastengruppe zu bestimmen. Gerade bei mehrfeldrigen Kranbahnen stellt die automatisierte Berechnung der maßgebenden Lastposition eine erhebliche Arbeitsvereinfachung dar.

Es gibt natürlich vielfältige Fehlerquellen bei der Berechnung von Kranbahnträgern mit FE-Programmen. Die folgenden Anwendungsfehler treten häufiger auf:

- Die Reduktion der Biegesteifigkeit  $EI$  mit dem Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M=1.1$  wird vergessen. So errechnen sich zu kleine Verformungen nach Th.II.O..
- Das Torsionsmoment  $M_x$ , das aus dem Angriff der Horizontallast an der Schienenoberkante entsteht, wird nicht auf den richtigen Punkt bezogen ausgerechnet (je nach verwendeter Software ist  $M_x$  zumeist auf den Schubmittelpunkt (SMP) zu beziehen)
- Die Höhe  $e_z$  des Lastangriffs der vertikalen Radlast wird nicht richtig angegeben (falsches Vorzeichen oder falscher Bezugspunkt). Als Bezugspunkt ist oft der SMP zu verwenden, in manchen Programmen aber auch die Stegmitte.
- Es werden nicht alle Einwirkungen in ungünstigster Wirkungsrichtung kombiniert: Die Vorzeichen von Horizontalkräften, Torsionsmomenten, Koordinaten von Lastangriffspunkten und Vorverformungen sind so zu wählen, daß ein möglichst ungünstiger Beanspruchungszustand entsteht.

Neben der Vermeidung der genannten Anwendungsfehler muß natürlich sichergestellt sein, daß die in der Berechnung steckenden Annahmen – z.B. hinsichtlich der Gabellagerung – konstruktiv auch realisiert werden. Besonders ist dabei auf die Übertragung der Horizontalkräfte quer zur Fahrbahn und die Querschnittsaussteifung im Auflagerbereich zu achten.

### 3.3 Betrachtung des gekoppelten Systems "Zwei Kranbahnen mit Kranbrücke"

In den vorangegangenen Ausführungen und auch in den folgenden Beispielen wird eine einzelne Kranbahn isoliert betrachtet und nachgewiesen. Tatsächlich bilden aber beide Kranbahnträger zusammen mit der sie verbindenden Kranbrücke ein gekoppeltes System. Dieses gekoppelte System verhält sich aus verschiedenen Gründen günstiger als der einzeln betrachtete Kranbahnträger.

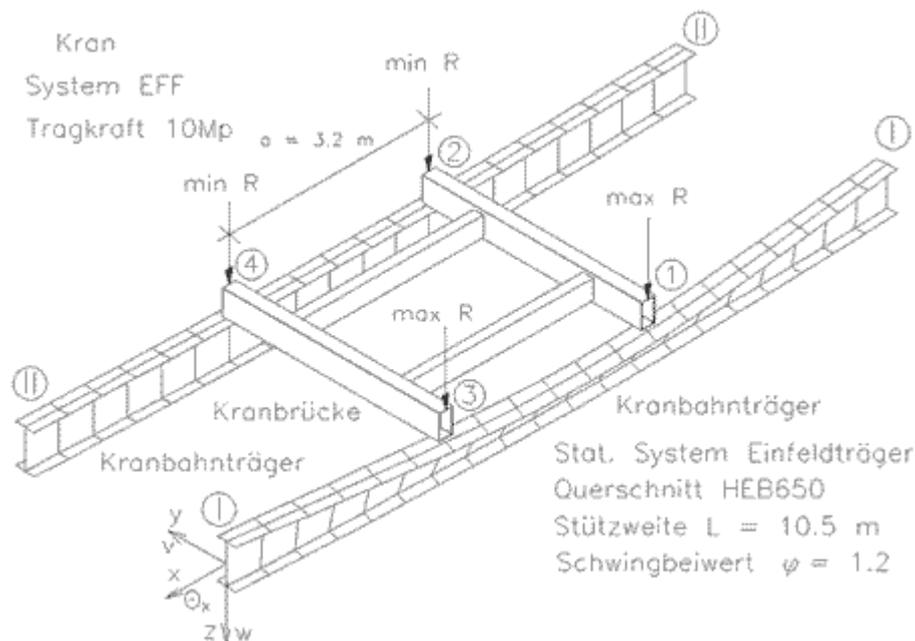


Bild 6: Stabilität des gekoppelten Systems Kranbahnträger - Kranbrücke [20]

Bild 6 zeigt den Sachverhalt: während der stärker belastete Kranbahnträger (rechts) sich bereits durch Torsion einer weiteren Lastaufnahme entziehen will, ist der weniger belastete Kranbahnträger (links) noch stabil. Über Reibung Rad/Schiene oder Kontaktkräfte der Spurkränze können horizontale Kräfte durch die Kranbrücke von einer Kranbahn auf die andere übertragen werden, was sich nun quasi als seitliche Obergurt - Halterung des kurz vor dem Versagen stehenden Kranbahnträgers auswirkt. Diese Sicherheitsreserve wird bei Kranbahnträgerberechnungen üblicherweise und sinnvollerweise nicht ausgenutzt. Ihre Berücksichtigung wäre rechnerisch auch sehr aufwendig und würde u.a. einen Nachweis erfordern, daß die Kräfte von der Kranbrücke übertragen werden können. In einer beispielhaften Berechnung des in Bild 6 dargestellten Krans hat Osterrieder [20] eine um 43 % höhere Tragfähigkeit des gekoppelten Systems gegenüber dem entkoppelt betrachteten einzelnen Kranbahnträger festgestellt.

Diese – und weitere hier nicht aufgezählte – Reserven dürfen und sollen rechnerisch nicht berücksichtigt werden. Sie sollen dem entwerfenden Ingenieur jedoch die Sicherheit geben, daß eine wirtschaftliche und knappe, aber normgerechte Auslegung des Kranbahnträgerquerschnitts ausreichend ist und zusätzliche "Sicherheitszuschläge" nicht erforderlich sind.

### 3.4 Beispiele

Als Beispiele werden eine einfeldrige und eine zweifeldrige Kranbahn gewählt. Vergleicht man bei jeweils gleichen Auflagerabständen  $l$  die maximalen Schnittgrößen von Ein- und Mehrfeldträgern miteinander, so ergeben sich beispielsweise für einen mit zwei gleichen Radlasten im Abstand von  $\alpha=0,6 \cdot l$  beanspruchten Kranbahnträger die in Tab.1 dargestellten Ergebnisse. Erkennbar lassen sich die Schnittgrößen kaum mehr reduzieren, wenn anstelle eines Zweifeldträgers ein Träger mit mehr als zwei Feldern verwendet wird. Da bei mehr als zwei Feldern i.d.R. biegesteife Stoßkonstruktionen

erforderlich werden, ist der Zweifeldträger als Kranbahnträger besonders wirtschaftlich. Der Einfeldträger wird hauptsächlich dann gewählt, wenn zur Vermeidung übermäßiger Ermüdung nur positive Spannungsverhältnisse  $\kappa$  gewünscht werden; dies kann bei Kranbahnen für schweren Betrieb der Fall sein. Würde wegen einer hohen Kranbahn-Spannweite bereits ein Zweifeldträger nicht mehr ohne Stoß über dem Mittelaufleger ausführbar sein, kann auch in diesem Fall der Einfeldträger trotz der größeren Querschnittsfläche die wirtschaftlichste Lösung sein. Neben der Einsparung eines biegesteifen Stoßes vermeidet man dadurch auch abhebende Auflagerkräfte.

Mehr als zweifeldrige Träger werden nur dann verwendet, wenn freie Schienenstöße, die einen Verschleiß der Radsätze fördern können, unter allen Umständen vermieden werden sollen.

Kranbahn als...	max. Feldmoment	max. Stützmoment
1-Feldträger	100 %	-
<b>2-Feldträger</b>	<b>82,4 %</b>	<b>-50,2 %</b>
3-Feldträger	81,8 %	-52,4 %
4-Feldträger	81,6 %	-52,9 %

Tab.1: Relative Beanspruchungen bei unterschiedlichen stat. Systemen (100% = Feldmoment beim Einfeldträger)

geg.: Charakteristische Lasten ohne alle Beiwerte:  $R_1 = 65 \text{ kN}$ ;  $R_2 = 55 \text{ kN}$ ;  $H = 6,5 \text{ kN}$

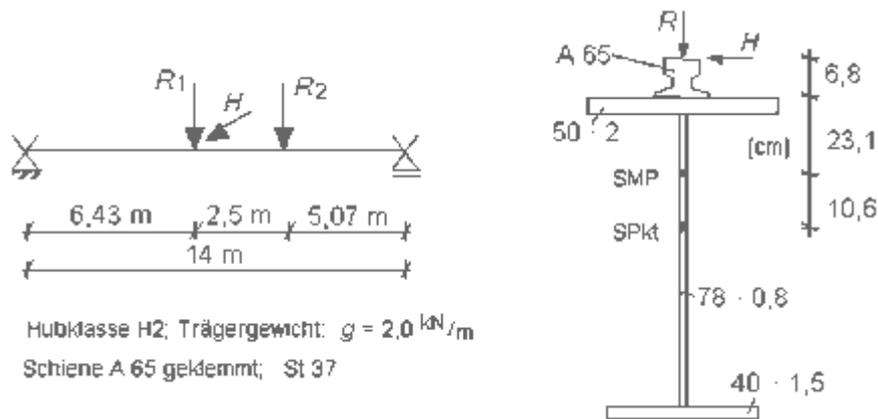


Bild 7: Beispiel 1 - einfeldriger Kranbahnträger, Culmannsche Laststellung

### 3.4.1 Beispiel 1: Einfeldrige Kranbahn

Als erstes Beispiel wird der in Bild 7 dargestellte, einfeldrige Kranbahnträger mit einfachsymmetrischem Querschnitt berechnet. An Hand dieses Beispiels sollen die Auswirkungen von Wölbkrafttorsion und Theorie II. Ordnung demonstriert werden. Außerdem sollen die Ergebnisse aus verschiedenen Berechnungs- und Nachweisverfahren gegenübergestellt und verglichen werden.

Die Bemessungslasten inklusive Teilsicherheitsbeiwerten und Schwingbeiwert sind :

- $F_1 = R \cdot \varphi \cdot \gamma_F = 65 \text{ kN} \cdot 1,2 \cdot 1,35 = +105,3 \text{ kN}$ ;  $F_2 = 55 \text{ kN} \cdot 1,2 \cdot 1,35 = +89,1 \text{ kN}$
- $H = 6,5 \text{ kN} \cdot 1,35 = +8,78 \text{ kN}$  ;  $g = 1,35 \cdot 2 = 2,7 \text{ kN/m}$
- $M_x = H \cdot (0,231 \text{ m} + 0,068 \text{ m}) = +2,625 \text{ kNm}$
- Ersatzimperfektion: Stich der Vorkrümmung in y-Richtung  $v = l/200 \cdot 2/3 \cdot 0,5 = 2,33 \text{ cm}$
- Grenzlaststellungen für  $F_2$  :  $250 \text{ cm} < x < 1400 \text{ cm}$

Die ungünstigste (Culmannsche-) Laststellung ist erreicht, wenn  $R_1$  bei ca.  $x=6,43 \text{ m}$  steht; die extremalen Spannungen für die Grundkombination  $1,35(g+\varphi \cdot R+H)$  sind an dieser Stelle  $x$ :

$\sigma_x = -18,4 \text{ kN/cm}^2$  an einer Oberflanschecke bzw.  $\sigma_x = 14,3 \text{ kN/cm}^2$  an einer Unterflanschecke.

Für die Grundkombination  $1,35g + 1,5 \varphi \cdot R$  ergibt sich nur  $\sigma_x = -13,4 \text{ kN/cm}^2$  bzw.  $\sigma_x = 14,9 \text{ kN/cm}^2$ .

	Spannungs- nachweis	Stabilitäts- nachweis	Als BDK- Nachweis nach DIN 18800 T2 zulässig	Berechnungs- / Nachweisverfahren	relative Grenzlastfaktoren Bsp. Bild 7 (1,0 entspricht den Bemessungslasten)
A	x		ja	Finite Elemente Methode, Programm BTII – Th.II.O.	<b>1,16</b>
B	x		ja	Handrechnung nach Petersen [12] Tafel 7.29	<b>1,14</b>
C		x	ja	DIN 18800 T2 Gl. (30), Ersatzstabverfahren	<b>1,26</b>
D		x		knickender Obergurt nach Lohse [7]	<b>1,16</b>
E	x		nein	zum Vergleich: Theorie I. Ordnung (mit Wölbkraft)	<b>2,08</b>
F	x		nein	zum Vergleich: Th.II.O. ohne Wölbkrafttorsion	<b>0,62</b>

Tab. 2 : Vergleich der Rechenverfahren (Beispiel aus Bild 7)

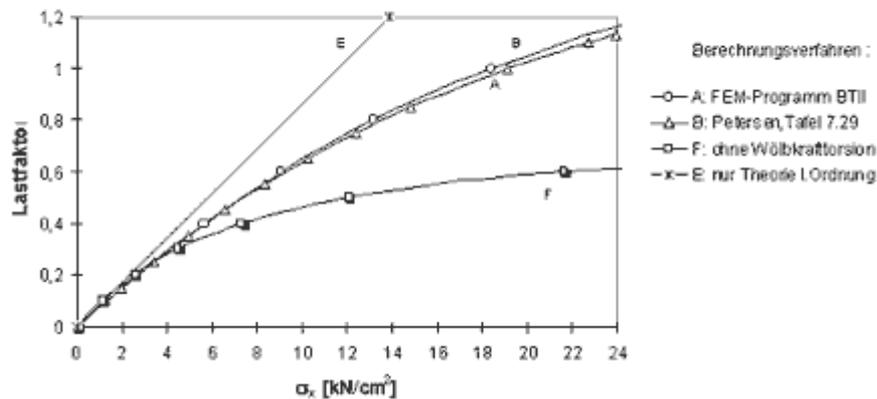


Bild 8: Last – Spannungskurven verschiedener Rechenverfahren für das Beispiel aus Bild 7

Die Ergebnisse aus verschiedenartigen Berechnungen sind in Tab. 2 und Bild 8 dargestellt. Bild 8 zeigt vier Last – Spannungskurven. Die zum Lastfaktor 1,0 gehörende Last entspricht dabei genau den Bemessungswerten der Einwirkungen auf die Kranbahn. Die letzte Spalte von Tabelle 2 zeigt die sich ergebenden relativen maximalen Tragfähigkeiten bezogen auf die Bemessungslasten. Der Grenzlastfaktor gibt an, wievielfach größer die gesamte Last sein dürfte, damit der BDK-Nachweis gerade noch erfüllt ist. Die Spannungsnachweise wurden dabei mit dem Verfahren el.-el. nach Gl.(5) geführt.

Die Ergebnisse der Handrechnung (B) und die FEM-Berechnung (A) stimmen mit Grenzlastfaktoren von 114 % und 116 % gut überein. Die mit dem Ersatzstabverfahren nachweisbare Tragfähigkeit liegt mit 126 % darüber (Ursache: siehe Bild 4a). Das Ergebnis aus dem Ersatzstabverfahren ist wesentlich beeinflusst durch die Qualität der Bestimmung des idealen Biegedrillknickmoments  $M_{kiy}$ : Das Programm BTII [16] liefert  $M_{kiy}=1343$  kNm (dieser Wert führt zu der in Tab.2 angegebenen Tragfähigkeit von 126%). Mit Petersen [12], T. 7.27 ist für eine Gleichstreckenlast  $M_{kiy}=1355$  kNm, nach Umrechnung auf die Einzellasten nach [12] Kap. 7.9.4 bleiben davon auf der sicheren Seite liegend nur noch 816 kNm übrig. Mit Roik, Carl, Linder [11], Kap. 5.4.1 errechnet sich  $M_{kiy}=1436$  kNm. Lohse ([7] Kap. 4.6) zeigt für ein anderes Beispiel ähnliche Schwankungsbreiten bei der Ermittlung von  $M_{kiy}$ .

Die Werte in Zeile D der Tab.2 enthalten den Nachweis des BDK-Problems als Knickproblem des Druckgurtes (siehe Kap. 3.1.1). Der ermittelte Grenzlastfaktor entspricht mit 1,16 in diesem Fall dem Ergebnis der Spannungsberechnung und liegt – verglichen mit dem Ergebnis des Ersatzstabverfahrens von 126% - auf der sicheren Seite. Aus Zeile E und der zugehörigen Kurve in Bild 8 wird deutlich, daß eine Berechnung nur nach Theorie I. Ordnung ungeeignet ist, da sie mit einer vorgeblichen Tragfähigkeit von 208 % stark auf der unsicheren Seite liegende Ergebnisse verursacht.

Die Berechnung (F) ohne Berücksichtigung der Wölbkrafttorsion liegt dagegen mit einer nachweisbaren Tragfähigkeit von 62 % stark auf der sicheren Seite und ist unbrauchbar, weil sie zu unwirtschaftlichen Dimensionierungen der Querschnitte führt. Wenn die Wölbkrafttorsion nicht berücksichtigt wird, erscheint der Träger in der Rechnung torsionsweicher, als er tatsächlich ist. Die sich so ergebenden überhöhten Werte für die Querschnittsverdrehung  $\vartheta$  führen zu einer höheren Torsionslast  $M_T=H \cdot e_z + \varphi \cdot R \cdot \vartheta \cdot e_z$  und zu einem höheren Querbiegemoment  $M_z + \vartheta \cdot M_y$ , woraus sich dann zu hohe Werte für die Spannungen  $\sigma_x$  ergeben.

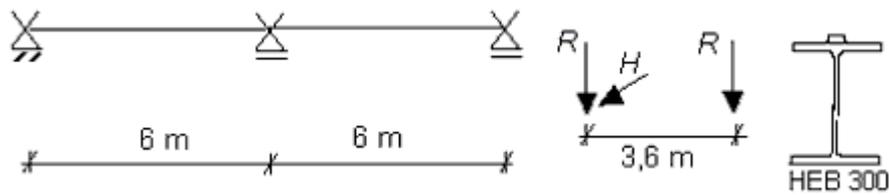


Bild 9 : Beispiel 2 - zweifeldriger Kranbahnträger mit Wanderlastengruppe

### 3.4.2 Zweifeldrige Kranbahn als Walzprofil

Als 2. Beispiel wurde eine sehr häufig vorkommende Konstellation gewählt. Der in Bild 9 dargestellte zweifeldrige Kranbahnträger wird als Walzprofil HEB 300 mit angehefteter Kranschiene 5cm · 4cm (Maße der abgenutzten Schiene: 5·3 cm<sup>2</sup>) ausgeführt. Die Schiene soll statisch nicht berücksichtigt werden, da sie nur angeheftet und nicht mit einer durchgehenden Naht auf dem Profil angeschweißt ist. Belastet ist der Träger durch eine zweiachsige Kranbrücke mit in Querrichtung gehaltenen Rädern und einem nicht drehzahlgekoppelten Antrieb (EFF). Hubklasse H2, Beanspruchungsgruppe B3. Die Radlasten betragen  $R = 75 \text{ kN}$  und  $H = 22,2 \text{ kN}$ . Die Lasten in der Einwirkungskombination  $1,35(g+\varphi\cdot R+H)$  sind:

- vertikal:  $F = R \cdot \varphi \cdot 1,35 = 75 \text{ kN} \cdot 1,2 \cdot 1,35 = 121,5 \text{ kN}$
- horizontal:  $H = 22,5 \text{ kN} \cdot 1,35 = 30,0 \text{ kN}$
- Torsionslast:  $M_T = H \cdot (15\text{cm} + 3\text{cm}) = 540 \text{ kNcm}$
- Eigengewicht des Trägers mit Schiene:  $g = 1,35 \text{ kN/m} \cdot 1,35 = 1,82 \text{ kN/m}$
- Ersatzimperfektion: Stich der Vorkrümmung in y-Richtung  $v = l/200 \cdot 2/3 \cdot 0,5 = +1 \text{ cm}$

Ergebnisse der Berechnung mit einem geeigneten Programm (z.B. [16],[19]):

- ungünstigste Laststellung: vorderstes (rechtes) Rad bei  $x = 5,7 \text{ m}$
- Die maximale Spannung nach Th.II.O. ergibt sich bei  $x = 2,1\text{m}$  an der Oberflanschkannte zu  $\sigma_v = |\sigma_x| = 22,38 \text{ kN/cm}^2$ ; Nachweis:  $22,38 \text{ kN/cm}^2 / 24 \text{ kN/cm}^2 = 0,93 < 1$
- vertikale Durchbiegung unter Gebrauchslasten ohne Schwingbeiwert:  $w = 0,48 \text{ cm} \cong l / 1200$
- horizontale Durchbiegung unter Gebrauchslasten ohne Schwingbeiwert:  $u = 0,40 \text{ cm} \cong l / 1500$

Die gerade noch nachweisbare Last (Grenzlast) errechnet sich zu 106% der Bemessungslast. Die berechneten Spannungen reduzieren sich in diesem Beispiel übrigens um ca. 10 %, wenn die Schiene statisch mitberücksichtigt wird.

Führt man eine Berechnung nach Th.I.O. durch, ergibt sich  $\sigma_v = 20,40 \text{ kN/cm}^2$  (also 8,5% weniger als nach Th.II.O.). Die Einflüsse aus Th.II.O. sind hier deutlich geringer als in Beispiel 1.

### 3.5 Spannungsnachweis elastisch-plastisch

Ein Spannungsnachweis unter Ausnutzung plastischer Querschnittstragfähigkeiten war im Kranbau bisher sehr unüblich, um Ermüdungsprobleme von vorne herein zu vermeiden. Man befürchtete einen überflüssig hohen Nachweisaufwand, wenn man zunächst einen Querschnitt unter Ausnutzung plastischer Reserven aufwendig optimiert, um ihn dann im Rahmen der Betriebsfestigkeitsuntersuchung wieder vergrößern zu müssen. Dabei können bei Kranbahnträgern mit zweiachsiger Biegung die vollplastischen Schnittgrößen mehr als 30% über dem elastischem Tragvermögen liegen, es ist also eine große Tragfähigkeitsreserve vorhanden, aus der grundsätzlich geschöpft werden kann (siehe auch [21]). DIN 4132 läßt in 4.1.1 die Ausnutzung plastischer Reserven ausdrücklich zu und fordert zusätzlich nur, daß die Spannungen im Gebrauchslastzustand die Streckgrenze nicht überschreiten dürfen. Mit dem in DIN 18800 T1 und T2 beschriebenen Verfahren el.-pl. steht nun zumindest für doppelsymmetrische Querschnitte ein einfach handhabbares Werkzeug zur Verfügung, mit dem sich plastische Querschnittsreserven bei nur geringem Zusatzaufwand nutzen lassen. In welchen Fällen lohnt es sich, davon Gebrauch zu machen, wann lohnt es sich nicht? An der Fortführung des Beispiels aus Kap. 3.4.2 soll dies gezeigt werden.

Mit den Bemessungslasten (s.o.) ergeben sich aus einer FE-Berechnung folgende maximale Schnittgrößen für den Kranbahnträger:  $M_y=155,9$  kNm ;  $M_z=41,2$  kNm ;  $M_w=4,799$  kNm<sup>2</sup>

Die Fließfunktion nach DIN 18800 T1 Gl.41 lautet mit  $C_1=0$  und  $C_2=1$  und nach Erweiterung um einen Ausdruck zur Berücksichtigung der Torsionsbeanspruchung nach [9], Kap. 8.12.5c für doppelsymmetrische I-Querschnitte:

$$f = \frac{M_z}{M_{pl,z,d}} + \left( \frac{M_y}{M_{pl,y,d}} \right)^{2,3} + \frac{M_w}{M_{w,pl,d}} \leq 1,0 \quad (6)$$

Voraussetzung für (6) ist nach Element 757:  $V_x \leq 0,33 \cdot V_{pl,x,d}$  und  $V_y \leq 0,25 \cdot V_{pl,y,d}$ .

Außerdem muß gemäß DIN 18800 T2 El. 119 für die druckbeanspruchten Querschnittsteile gelten:  $b/t \leq \text{grenz}(b/t)$  nach DIN 18800 T1, Tab.15. Für Walzprofile ist diese Forderung i.d.R. erfüllt. So auch hier:

$$\text{vorh.}(b/t) = 15/1,9 = 7,9 < \text{grenz}(b/t) = \frac{11}{\alpha} \cdot \sqrt{\frac{24 \text{ kN/cm}^2}{f_{yk}}} = 11 \quad (7)$$

Die plastischen Biegemomente dürfen maximal mit dem 1,25-fachen Wert des elastisch aufnehmbaren Moments  $M_{el,z,d}$  angesetzt werden (DIN 18800 T2 El.123), weil sonst die Annahme der Größe der Ersatzimperfektion nicht mehr angemessen wäre. Für das Wölbmoment  $M_{w,pl,d}$  gilt diese Einschränkung nach [9] Beispiel 8.12.5c (S. 241) nicht. Mit  $M_{pl,z,d} = 155,7$  kNm (=1,25  $M_{el,z,d}$ , anstelle von  $M_{pl,z,d} = 190$  kNm),  $M_{pl,y,d} = 418$  kNm und  $M_{w,pl,d} = 26,21$  kNm<sup>2</sup> (siehe Tabellenwerke) wird:

$$f = \frac{41,2}{155,7} + \left( \frac{155,9}{418} \right)^{2,3} + \frac{4,799}{26,21} = 0,551 < 1,0$$

Wegen  $f \leq 1,0$  und der Tatsache, daß die Spannungen im Gebrauchslastzustand (1,0-fache Lasten, keine Ersatzimperfektion) die Fließgrenze nicht erreichen, ist der Spannungsnachweis el.-pl. erfüllt.

Erst bei der 1,46-fachen Bemessungslast wird der Nachweis el.-pl. bei  $f = 0,95$  kritisch, weil die Spannungen im Gebrauchslastzustand die Streckgrenze erreicht haben. Mit dem

Verfahren el.-el. läßt sich dagegen nur eine Tragfähigkeit von 106% nachweisen. Der Nachweis el.-pl. erlaubt in diesem Fall eine Steigerung der Querschnittsbeanspruchbarkeit um 38%.

Fragt man nicht nach der möglichen Erhöhung der Last für den HEB 300, sondern nach einer möglichen Reduzierung der Profilgröße für die in Kap. 3.4.2 gegebene Bemessungslast, so sieht das Ergebnis wie folgt aus: Für die Kranbahn kann hinsichtlich der Spannungen ein HEB 280 anstelle eines HEB 300 gewählt werden, wenn das Verfahren el.-pl. angewandt wird!

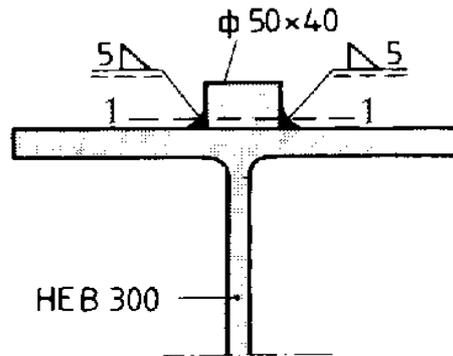


Bild 10: Oberer Teil des Kranbahnträgers mit Schweißnaht in Schnitt 1-1

BG	zul $\sigma_{Be}$ (K1)	$\sigma_x$	BFU	nachweisbare Tragfähigkeit		zul $\sigma_{Be}$ (K4)	nachweisbare Tragfähigkeit
-	kN/cm <sup>2</sup>	kN/cm <sup>2</sup>	-	%		kN/cm <sup>2</sup>	%
B1	16	10,2	erfüllt	146		16	146
B2	16	10,2	erfüllt	1,46		16	146
B3	16	10,2	erfüllt	146		13,1	146
B4	16	11,6	erfüllt	146		9,3	117
B5	16	11,6	erfüllt	146		6,6	83
B6	13,3	11,6	erfüllt	146		4,6	58

Tab.3: Betriebsfestigkeitsnachweis für die Schweißnaht zur Schienenbefestigung unter der Annahme unterschiedlicher Beanspruchungsgruppen und Kerbfälle

Wie sieht es aber mit der Sicherheit gegen Ermüdungsversagen aus? Für den HEB 300 unter 1,46-facher Bemessungslast (=Grenzlast beim Verfahren el.-pl.) soll die Betriebsfestigkeitsuntersuchung für die Normalspannungen  $\sigma_x$  an der kritischen Stelle (Normalspannungen in der Schweißnaht der Schiene an der Stelle  $x=2,1$ m beim Momentenmaximum im Feld) durchgeführt werden (Bild 10).

Für St37; Kerbgruppe K1; Spannungsspiel  $\kappa = - 0,165$  und der maßgebenden Einwirkungskombination  $1,00 \cdot (\text{Eigengewicht Kranbahn } g + \text{vertikale Radlasten } R \cdot \varphi)$  errechnen sich folgende Oberspannungen (Druck) :

$$\sigma_{x,o} = 10,2 \text{ kN/cm}^2 \text{ (für Beanspruchungsgruppen B1 bis B3)}$$

$$\sigma_{x,o} = 11,6 \text{ kN/cm}^2 \text{ (für B4 bis B6; höhere Spannung wg. Exz. Radlast } \frac{1}{4} \text{ Schienenkopfbreite)}$$

Tabelle 3 links zeigt für unterschiedlich angenommene Beanspruchungsgruppen (BG) die Ergebnisse. Die Spalte "nachweisbare Tragfähigkeit" berücksichtigt dabei sämtliche zu

führende Nachweise; 100% entspricht den in Kap. 3.4.2 angegebenen Bemessungslasten.

Die BFU wird also in diesem Beispiel selbst dann nicht kritisch, wenn die Kranbahn der Beanspruchungsgruppe B6 zugeordnet wäre. Wäre die zu unterstellende Kerbgruppe K4 anstelle K1 (Tabelle 3 rechts), so würde in den Beanspruchungsgruppen B1 bis B3 die BFU ebenfalls nicht querschnittsbestimmend. Erst ab der Beanspruchungsgruppe B4 ergäbe sich eine Reduzierung der mit dem Verfahren el.-pl. nachweisbaren Grenzbeanspruchung.

Ein weiterer zu beachtender Punkt ist die Überprüfung der Trägerdurchbiegung. Für unser Beispiel ergibt sich unter der gerade noch nachweisbaren Last von 146% im Gebrauchslastzustand eine Durchbiegung von  $w = 0,7 \text{ cm} = l / 860$ .

Was ist hinsichtlich der Anwendung des Verfahrens el.-pl. für den Kranbahnträgnachweis zu beachten?

- Besonders bei niedrigeren Beanspruchungsgruppen und bei gewalzten Kranbahnträgern mit weniger kritischen Kerbfällen kann es lohnend sein, einen Spannungsnachweis el.-pl. unter Ausnutzung der plastischen Querschnittstragfähigkeit zu führen. Die Schnittgrößen und Spannungen werden weiterhin nach der Elastizitätstheorie berechnet. Beim Ansatz der Vorverformung darf der Wert  $v_0$  nicht mehr gemäß DIN 18800 T2 El. 201 auf 2/3 reduziert werden.
- Zusätzlich sind folgende Nachweise zu führen :
  - + die Spannungen im Gebrauchslastzustand (1,0-fache Lasten, keine Ersatzimperfektionen) dürfen die Streckgrenze nicht überschreiten.
  - + die Werte  $g_{\text{renz}}(b/t)$  nach DIN 18800 T1 Tab. 15 müssen eingehalten werden
- die plastischen Formbeiwerte  $\alpha_{\text{pl},y}$  und  $\alpha_{\text{pl},z}$  sind auf 1,25 zu begrenzen (DIN 18800 T2 El.123). Für die Querbiegung des Kranbahnträgers wird diese Begrenzung meist wirksam.
- Wenn das Verfahrens el.-pl. bei nur einfachsymmetrischen Querschnitten (z.B. Walzprofil mit statisch berücksichtigter Schiene), angewendet werden soll, müssen Interaktionsformeln aus der Literatur herausgesucht werden, da (6) nur für doppeltsymmetrische I-Querschnitte gilt.
- Eine BFU ist für Kranbahnträger immer zu führen. Bei Anwendung des Spannungsnachweises el.-pl. ist eine sorgfältig geführte BFU besonders wichtig zur Vermeidung von Ermüdungsversagen.
- Die Kranbahnträgerdurchbiegung sollte stets überprüft werden, wenn mit dem Verfahren el.-pl. nachgewiesen wird.
- Keinen Vorteil in Form einer höheren nachweisbaren Tragfähigkeit bietet das Verfahren el.-pl bei Kranbahnträgern mit einer hohen Beanspruchungsgruppe und mit besonders kritischen Kerbfällen, da hier die BFU eine Spannungsreduzierung erzwingt.

#### 4. Beulnachweis des Stegblechs unter der Radlast

Die Forderung, eine ausreichende Beulsicherheit des Trägerstegs unter der Radlast (Bild 11) zu gewährleisten, kann besonders bei geschweißten Kranbahnträgern dimensionierend für die Stegblechdicke sein. Bedingt durch das Vorhandensein von Querspannungen  $\sigma_y$  aus der Radlast ist in jedem Fall der in Bild 12 beschriebene Beulnachweis erforderlich, der nicht durch einen Nachweis  $b/t < \text{grenz } b/t$  ersetzt werden kann. Maßgebend für den Beulnachweis ist i.d.R. die Grundkombination aus ständigen Einwirkungen und den vertikalen Radlasten als größte einzelne veränderliche Einwirkung ( $1,35g + 1,5 \cdot \varphi \cdot R$ ). Dabei ist die Radposition maßgebend, die zum maximalen Feldmoment führt.

Beim Beulnachweis ist folgendes zu beachten:

- Beulwerte  $k_{\sigma_y}$  können Petersen [23] Kap.21.5.4.5.4 Bild 86 entnommen werden, dessen Zahlen auf den Untersuchungen von Protte [24] beruhen; Beulwerte  $k_{\sigma_x}$  auch für die bei Kranbahnen häufig vorliegenden Spannungsverhältnisse  $\Psi = \sigma_{xu} / \sigma_{x0} < -1$  sind in [12] Tafel 8.5-I enthalten.

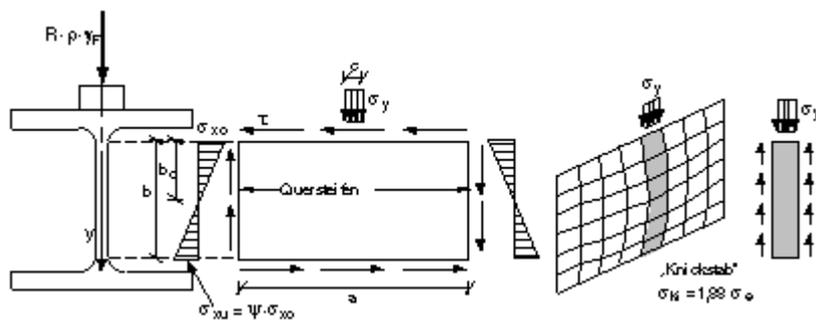
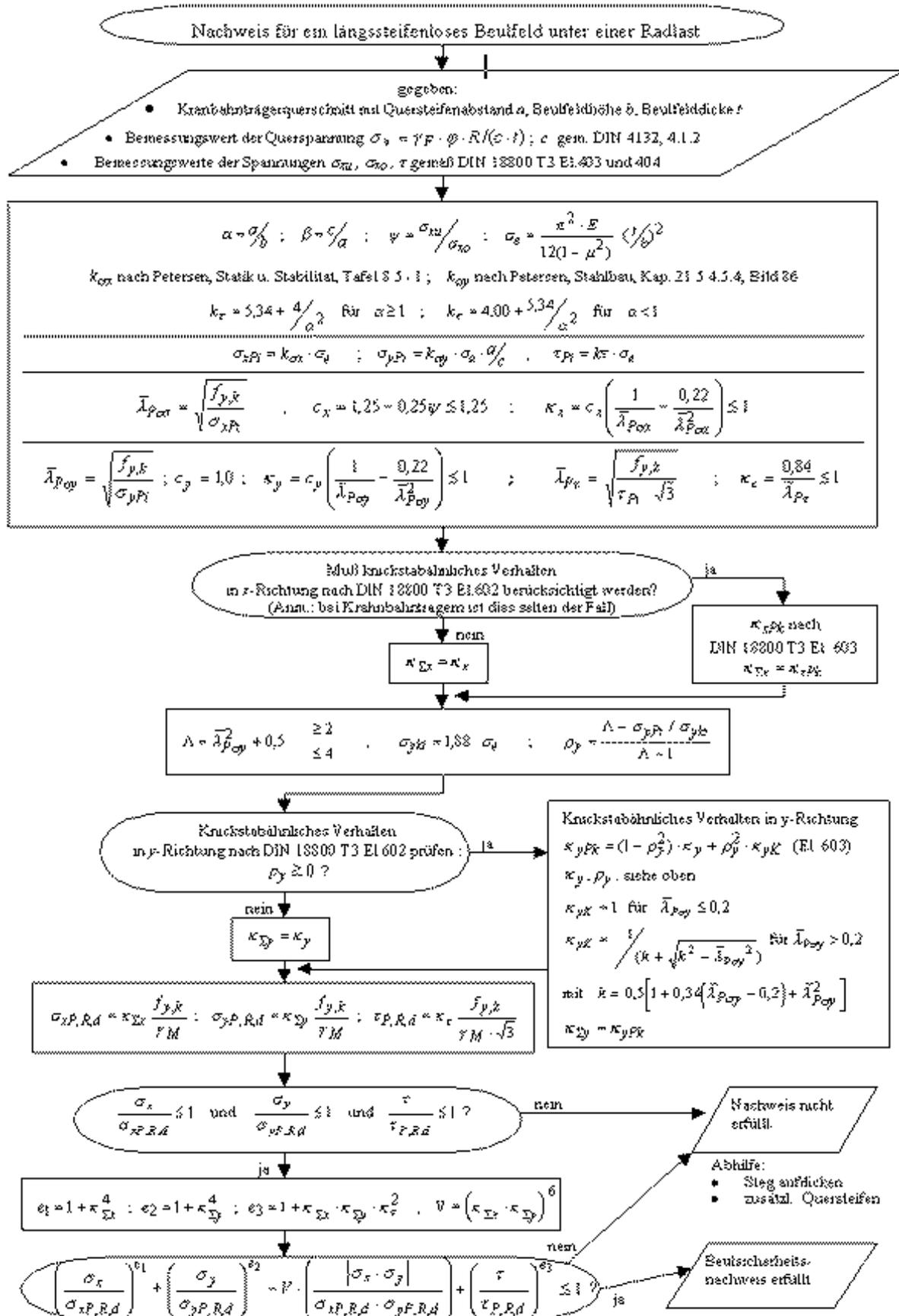


Bild 11: Beulfeld unter der Radlast, knickstabähnliches Verhalten



- Der Wert  $\sigma_{y,p_i}$  ist auf die gesamte Beulfeldbreite  $a$  (!) zu beziehen [24] und ergibt sich damit zu  $\sigma_{y,p_i} = k_{\sigma y} \cdot \sigma_e \cdot a/c$ .
- Knickstabähnliches Verhalten des Beulfelds ist besonders in Stegrichtung  $y$  zu überprüfen. Ggf. wird wegen der beim Knicken im Unterschied zum Beulen nicht vorhandenen überkritischen Tragreserven der Abminderungsfaktor  $k_{y,p_k}$  berücksichtigt. Die für die Bestimmung von  $k_{y,p_k}$  notwendige Eulersche Knickspannung kann mit  $\sigma_{K_i} = 1,88 \cdot \sigma_e$  (aus DIN 4114 T2, Tab.5, Gl.(6) ableitbar) berechnet werden (Bild 11 rechts, siehe auch [9] Beispiel 11.6).
- Das Nachweisdiagramm Bild 12 gilt nur für Kranbahnträger ohne Längssteifen. Ein Beispiel für den Nachweis eines längsausgesteiften Stegs eines Kranbahnträgers ist [7], S.162ff zu entnehmen.

## 5. Gebrauchstauglichkeitsnachweis

In Anpassungsrichtlinie und DIN 4132 wird zwar ein Gebrauchstauglichkeitsnachweis nicht ausdrücklich gefordert, häufig verlangt aber der Hersteller der Kranbrücke eine Begrenzung der Durchbiegungen der Kranbahn zur Sicherstellung einer einwandfreien Funktion der gesamten Krananlage und zur Verschleißbegrenzung der Radsätze und Schienen.

Die Einhaltung bestimmter Verformungsgrenzen zur Vermeidung von "Berg- und Talfahrten", zur Sicherstellung einer ausreichenden Tragwerkssteifigkeit (Schwingungsverhalten!) und zur Eingrenzung des Rad- und Schienenverschleißes ist stets sinnvoll. Dies gilt in besonderem Maße dann, wenn bei den Spannungsnachweisen plastische Querschnittstragreserven ausgeschöpft worden sind (siehe Kap. 3.5). Empfohlen wird entweder die Beachtung der in der entsprechenden Schweizer Norm festgelegten Grenzwerte (Tab. 4, zitiert nach [8]) oder die Einhaltung der Werte aus dem zukünftig gültigen EC 3 – Teil 6 (siehe Kap. 6)

Auch die Schwingungseigenschaften einer Krananlage – bestehend aus zwei Kranbahnträgern und der Kranbrücke - haben Einfluß auf ihre Gebrauchstauglichkeit. Zu niedrige Eigenfrequenzen deuten auf eine zu weiche Konstruktion hin. Sie sind wegen möglicher Resonanzprobleme beim Kranbetrieb besonders bei schwerem und schnellem Betrieb zu vermeiden. Die unterste Eigenfrequenz einer Kran-anlage läßt sich einfach und zweckmäßig nach den in [8], Kap. 19.3 angegebenen Formeln bestimmen. Für einen Brückenkrane ohne besondere Anforderungen an die Hub- und Senkbewegung beim Halt in Bezug auf das Schwingen sollte die unterste Eigenfrequenz höher als 2,5 Hz liegen.

Beanspruchungsgruppe	vertikale Durchbiegung	horizontale Durchbiegung
B1-B2	// 600	// 800
B3	// 700	// 800
B4	// 700	// 1000
B5-B6	// 800	// 1000

Tab.4: Empfohlene Grenzwerte der Durchbiegungen für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis bezogen auf die Feldlänge  $l$

## 6. Ausblick: Bemessung von Kranbahnträgern nach Eurocode

Die Lastannahmen für Kranbahnträger sind zukünftig Eurocode 1-Teil 5 [5] zu entnehmen, während die erforderlichen Nachweise der Kranbahnträger in Eurocode 3-Teil 6 [6] behandelt werden. Beide Normenteile liegen in von den jeweiligen Subkomitees CEN/TC250/SC1 und /SC3 verabschiedeten Fassungen vor [25]. Demnächst werden die englischen und deutschen Sprachfassungen veröffentlicht und die zugehörigen nationalen Anwendungsdokumente (NAD) erarbeitet, in denen noch einzelne Ergänzungen festgelegt werden können. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit werden im folgenden einige Regelungen aufgezeigt, die sich mit der Einführung der beiden Eurocode-Teile gegenüber der derzeitigen Normenlage ändern werden. Berechnungsbeispiele können [26] und [7], Kap.5.4 und [27] entnommen werden.

### 6.1 Lastannahmen, Grundlagen nach EC1 – Teil 5

- Aus den 6 Beanspruchungsgruppen B1 bis B6 werden nun 9 Klassen S1 bis S9. Die 4 Hubklassen bleiben unverändert.
- Für alle Beanspruchungsgruppen und bei allen Nachweisen ist künftig eine Exzentrizität der vertikalen Radlast von  $\frac{1}{4}$  der Schienenkopfbreite anzunehmen (bisher ist das nur bei BG4 - BG6 und nur bei der Betriebsfestigkeitsuntersuchung erforderlich).
- Ein System von 8 verschiedenen Schwingbeiwerten ersetzt den derzeitigen Schwingbeiwert; [5], Tab.2.1. Für die Ermittlung der Schwingbeiwerte müssen zusätzliche Krdaten bekannt sein, z.B. ist der dynamische Faktor für das Anheben der Last nicht mehr nur von der Hubklasse, sondern auch von der Hubgeschwindigkeit abhängig.
- Die Erhöhung der Seitenlasten aus Spurführungskräften um 10% ( $H = 1,1 \cdot H_S$ ) zur näherungsweise Berücksichtigung der Masselasten aus Anfahren/Beschleunigen gemäß DIN 4132, 3.2.1.1 führte bisher zur Verminderung des Rechenaufwandes. Diese Vereinfachung wird es in Zukunft nicht mehr geben, die Masselasten müssen also stets berechnet werden.
- Eine Tabelle ähnlich Tab.7 in DIN 15018 ersetzt die bisherigen Regeln für die Kombination einzelner Einwirkungen [5] Tab. 2.2

### 6.2 Spannungs- und Stabilitätsnachweise nach EC3 – Teil 6

- Für die allgemeinen stahlbaulichen Nachweise gelten natürlich alle – hier nicht referierten - neuen Regeln des Eurocode 3 – Teil 1-1 [28]; siehe auch [29] und [30]. Das Sicherheitskonzept entspricht dem der DIN 18800, Teilsicherheitsbeiwerte siehe [5] Tab. A.1 .
- Die Möglichkeit des Tragwirkungsplittings (Zuweisung des gesamten Querschnitts für die Vertikalbiegung; Zuweisung des Obergurts mit  $\frac{1}{5}$  Steg für die Horizontalbiegung) bleibt unverändert.
- Die lokalen Lasteinleitungsspannungen aus der Radlast werden auf ähnliche Weise bestimmt und nachgewiesen wie bisher.
- Der Nachweis gegen Biegedrillknicken des Kranbahnträgers kann als Knicknachweis des als Druckstab aufgefaßten Obergurts durchgeführt werden ([6] Anhang C).
- Ein Beulnachweis des Stegs unter der Radlast ist wie bisher auch zu führen.
- EC3 Teil 6 – Kap. 8.8 enthält den – bisher nicht in DIN 4132 enthaltenen - Nachweis der Kontaktspannungen zwischen Rad und Schiene.

### 6.3 Betriebsfestigkeitsuntersuchung (BFU)

- Die dynamischen Inkremente für die BFU sind halbiert worden. (z.B.  $\varphi = 1,05$  anstelle 1,10)
- Der Betriebsfestigkeitsnachweis selber wird auf das neue Sicherheitskonzept umgestellt und deshalb stark verändert; siehe [7], Kap. 5.4 und [30], Kap. 7. Der Einteilung in die Kerbklassen W0 bis W2 und K1 bis K4 entspricht jetzt die Zuordnung zu den Kerbklassen 36 bis 160. Der Nachweis erfolgt nicht mehr als Nachweis der Oberspannung, sondern als Begrenzung des Spannungsspiels  $\Delta\sigma_{\max}$ .

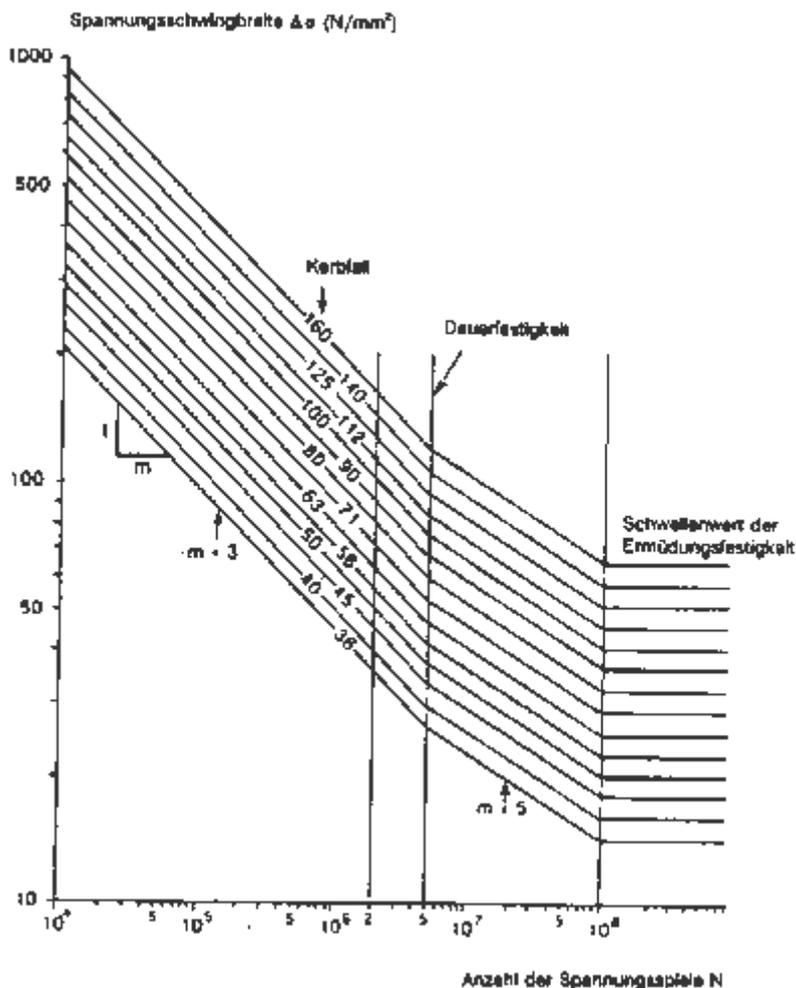
$$\gamma_{F,f} \cdot \varphi \cdot \lambda \cdot \Delta\sigma_{\max} \leq \Delta\sigma_c / \gamma_{M,f}$$

mit  $\lambda$  : Beiwert zur Berücksichtigung der Betriebsfestigkeitsgruppe

$\gamma_{F,f}$ ,  $\gamma_{M,f}$  : Teilsicherheitsbeiwerte

$\varphi$  : Schwingbeiwert

$\Delta\sigma_c$ : Grenzwert der Ermüdungsfestigkeit bei  $2 \cdot 10^6$  Lastwechseln (siehe Bild 13)



## 6.4 Gebrauchstauglichkeitsnachweise

Vertikale und horizontale Biegung werden auf jeweils  $l / 600$  begrenzt (Bild 14). In DIN 4132 ist ein Gebrauchstauglichkeitsnachweis nicht verlangt.

**Table 7.1: Limiting values of vertical deflections**

Description of the deflection (deformation or displacement)	Diagram
a) Vertical deformation $\delta_z$ of a crane runway beam: $\delta_z \leq L/600$ and $\delta_z \leq 25 \text{ mm}$ The vertical deformation $\delta_z$ should be taken as the total deformation due to vertical loads, less the possible pre-camber, as for $\delta_{\max}$ in figure 4.1 of ENV 1993-1-1.	
b) Difference $\Delta h_c$ between the vertical deformations of two beams forming a crane runway: $\Delta h_c \leq s/600$	
c) Vertical deformation $\delta_{\text{pay}}$ of a runway beam for a monorail hoist block, relative to its supports, due to the payload only, without any dynamic amplification factor: $\delta_{\text{pay}} \leq L/500$	

**Table 7.2: Limiting values of horizontal deflections**

Description of the deflection (deformation or displacement)	Diagram
a) Horizontal deformation $\delta_y$ of a crane runway beam, measured at the level of the top of the crane rail: $\delta_y \leq L/600$	

Bild 14: Gebrauchstauglichkeitsnachweis nach EC3 – Teil 6 (Ausschnitt)

## 7. Zusammenfassung

DIN 4132 beinhaltet in Verbindung mit der Anpassungsrichtlinie Stahlbau und DIN 18800 die seit 1995 aktuellen Verfahren für den Tragsicherheitsnachweis von Kranbahnträgern. Die erforderlichen Nachweise wurden unter Hervorhebung der für Kranbahnen geltenden Besonderheiten knapp skizziert. Gegenüber der alten Normenlage hat sich zwar der Aufwand für die neuen Nachweisverfahren deutlich erhöht, sie erlauben aber auch – z.B. über den Spannungsnachweis elastisch-plastisch – wirtschaftlichere Bemessungen. Der zweckmäßige und sachgerechte Einsatz von Computerprogrammen ist dabei allerdings für eine wirtschaftliche Nachweisführung nahezu unumgänglich.

Obwohl sich die jetzt gültige Normenlage in der Praxis durchaus noch nicht vollständig durchgesetzt hat, kommt schon die nächste einschneidende Änderung in Sicht: die Einführung der entsprechenden Eurocodes wird für die Nachweise von Kranbahnen – besonders auf der Einwirkungsseite und bei der Betriebsfestigkeitsuntersuchung – neue Regelungen bringen und diese endlich vollständig auf das neue Sicherheitskonzept umstellen.

## Literatur

- [1] Deutsches Institut für Bautechnik; Anpassungsrichtlinie Stahlbau, Ausgabe Mai 1996
- [2] DIN 18800 Stahlbauten T1, T2, T3; Ausgabe 11/90
- [3] DIN 4132 Kranbahnen; Ausgabe Februar 1981
- [4] DIN 15018 Krane; Ausgabe November 1984
- [5] ENV 1991-5 (Eurocode 1, Teil 5): Basis of design and actions on structures – Actions induced by cranes and other machinery; Fassung Oktober 1997
- [6] ENV 1993-6 (Eurocode 3, Teil 6): Design of steel structures – Crane supporting structures; Fassung 1998
- [7] Thiele, Lohse; Stahlbau 2; Teubner Verlag, 18. Auflage, Stuttgart 1997
- [8] von Berg, D.: Krane und Kranbahnen; Stuttgart 1989
- [9] Lindner, J. und Scheer, J. u.a. (Hrsg.): Stahlbauten - Erläuterungen zu DIN 18800 Teil 1 bis Teil 4; Berlin 1994
- [10] Cywinski, Z.: Drillträger-Formeln für die wichtigsten Belastungsfälle; in: Der Stahlbau 8/1983, S. 245-252
- [11] Roik, Carl, Lindner; Biegetorsionsprobleme gerader, dünnwandiger Stäbe; Berlin, München, Düsseldorf 1972
- [12] Petersen, C.: Statik und Stabilität der Baukonstruktionen; Wiesbaden 1980
- [13] Dickel, T., Klemens, H.-P., Rothert, H.: Ideale Biegedrillknickmomente; Braunschweig / Wiesbaden 1991
- [14] Verein Dt. Eisenhüttenleute (Hrsg): Stahl im Hochbau; Band I, Teil 2; 14. Auflage; Düsseldorf 1986
- [15] Kroll, K.-H.; Rechenbehelfe für ideale Biegedrillknickmomente doppelsymmetrischer I-Querschnitte; Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf 1998
- [16] Friedrich + Lochner, BTII, Version 08/98; Handbuch Stand Mai 1998
- [17] SeeBelberg, C.; Zum Biegedrillknicknachweis von Kranbahnträgern nach DIN 18800 T2; in: Festschrift zum 20-jährigen Jubiläum Friedrich+Lochner GmbH, S.39-49; Stuttgart 1998
- [18] SeeBelberg, C.: Zum neuen Tragsicherheitsnachweis von Kranbahnträgern nach Anpassungsrichtlinie Stahlbau und DIN 18800; in: Stahlbau 12/1997, S. 830-839 und: Nachträgliche Anmerkungen; Stahlbau 4/1998, S. 329f
- [19] Frauendorfer, H.-J.; Programm DLT II – Biegetorsion Theorie II. Ordnung; Version 01/98
- [20] Berechnungen Prof. Dr. P. Osterrieder, BTU Cottbus; nicht veröffentlicht
- [21] Osterrieder, P.; Werner, F.; Kretzschmar, J; Biegedrillknicknachweis Elastisch-Plastisch für gewalzte I-Querschnitte; in: Stahlbau 10/1998, S.794ff
- [22] Kindmann, R, Ding, K.; Alternativer Biegedrillknicknachweis für Träger aus I-Querschnitten; in: Stahlbau 8/1997, S. 488ff
- [23] Petersen, C.: Stahlbau; Braunschweig, korr. Nachdruck der 3. Auflage; Wiesbaden 1994
- [24] Protte, W.: Zum Scheiben- und Beulproblem längsversteifter Stegblechfelder bei örtlicher Lasteinleitung und bei Belastung aus Haupttragwirkung; in: Der Stahlbau 8/1976, S. 251
- [25] Hartz, U.: Eurocodes – Gegenwärtiger Stand, weitere Entwicklung und ihr Wechselspiel mit der nationalen Normung; in: Bautechnik 11/1998, S. 845 - 858
- [26] Sedlacek, G., Schneider, R., e.a.; Design example for the application of EC1-Part 5 and EC3 – Part 6; 2<sup>nd</sup> draft; Aachen 1997; (nicht veröffentlicht)
- [27] Turko, C.; Vergleichende Berechnungen von Kranbahnträgern nach aktueller Normenlage und nach Eurocode-Normen; Diplomarbeit FH München, Studiengang Stahlbau (in Vorbereitung)
- [28] DIN V ENV 1993-1-1 (Eurocode 1, Teil 1-1): Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Allgemeine Bemessungsregeln, Bemessungsregeln für den Hochbau; Ausgabe 4.1993
- [29] Sedlacek, G.; Bemessung nach dem endgültigen Eurocode; 19. Stahlbauseminar der Bauakademie Biberach, 1997; S. 116
- [30] Falke, J.; Tragwerke aus Stahl nach Eurocode 3; Werner Verlag, 1. Auflage 1996

## Autor:

Prof. Dr.-Ing. Christoph SeeBelberg, Fachhochschule München, FB 02 - Studiengang Stahlbau, Karlstraße 6, 80333 München, Email: chr.seesselberg@t-online.de