



Auswirkungen der Torsionssteifigkeit auf das Tragverhalten von Betonbrücken mit Plattenbalkenquerschnitt

Saskia Meyer, Joachim Göhlmann, Marco Wichers, Vincent Oettel

Auswirkungen der Torsionssteifigkeit auf das Tragverhalten von Betonbrücken mit Plattenbalkenquerschnitt

Für eine nachhaltige Bemessung von Stahlbeton- und Spannbetonbrücken in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit ist eine realitätsgetreue Abschätzung der Torsionssteifigkeit in Abhängigkeit von der Höhe der Beanspruchung notwendig. Unter anderem aufgrund des aktuell begrenzten Kenntnisstands sind normative Grundlagen für die Nachrechnung von Brückenbauwerken lediglich eingeschränkt vorhanden und für die Brückenneubemessung nicht vorgesehen. Der vorliegende Beitrag gibt eine Übersicht über das Torsionstragverhalten und insbesondere die Torsionssteifigkeit von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen mit Plattenbalkenquerschnitt. Der Fokus liegt hierbei auf der mit der Reduzierung der Torsionssteifigkeit einhergehenden Schnittgrößenumlagerung im Gesamtsystem, was u. a. zu geringeren Bemessungstorsionsmomenten und folglich zu einer kleineren erforderlichen Bewehrungsmenge für die Torsionsbeanspruchung führt. Dieses wird anschaulich anhand einer Parameterstudie mit dem Modell nach Bieger sowie am Beispiel einer Brückennachrechnung und der Bemessung eines Brückenneubaus in Spannbetonbauweise erläutert.

Stichworte Torsionssteifigkeit; Torsion; Steifigkeit; Brückenbau; Brückennachrechnung; Nachhaltigkeit; Berechnungsmodelle; Umlagerungseffekte

1 Einführung

Bei statisch unbestimmten Systemen von Stahlbeton- und Spannbetonbrücken werden die Schnittgrößenverteilung und die rechnerisch erforderliche Bewehrungsmenge von den Steifigkeitsverhältnissen bestimmt. Die Torsionssteifigkeit nimmt durch die ausgeprägte Nichtlinearität des Betons mit zunehmender Rissbildung sehr stark ab. Die rechnerisch angenommene Torsionssteifigkeit der Hauptträger hat besonders bei langen Brücken ohne Querträger, vielstegigen Plattenbalkenbrücken und schiefwinkligen Balkenbrücken einen großen Einfluss auf die Schnittgrößenumlagerungen im System und folglich auf das Ergebnis der Bemessung. Bei der Nachrechnung von bestehenden Straßenbrücken treten nach den derzeit gültigen Richtlinien oft enorme rechnerische Defizite bezüglich der erforderlichen Bügelbewehrung für Querkraft und Torsion sowie der Längsbewehrung für Torsion auf. Oftmals kommt es auch zu Problemen beim Nachweis der Druckstreben­tragfähigkeit [1]. Grund dafür sind gestiegene Verkehrslasten, Anpassungen der Bemessungsmodelle für Querkraft und Torsion sowie verbaute Bewehrungsformen, die von den heute gültigen Konstruktionsregeln abweichen [2–4]. Bei Brückenneubauwerken

Effects of torsional stiffness on the load-bearing behaviour of concrete bridges with T-beam cross section

For a sustainable design of reinforced and prestressed concrete bridges in the ultimate limit state and serviceability limit state, a realistic estimation of the torsional stiffness as a function of the load level is necessary. Due to the current limited number of studies, normative bases for the recalculation of bridge structures are only available to a limited extent and are not intended for the design of new bridge constructions. The present article gives an overview of the torsional load-bearing behavior and, in particular, the torsional stiffness of reinforced and prestressed concrete structures with T-beam cross sections. The focus is on the redistribution of internal forces in the overall system associated with the reduction of torsional stiffness, which leads, among other things, to lower design torsional moments and consequently to a smaller amount of reinforcement required for torsional loading. This is explained clearly using a parameter study with the Bieger model and the example of a bridge recalculation as well as the design of a new bridge in prestressed concrete construction.

Keywords torsional stiffness; torsion; stiffness; bridge construction; bridge recalculation; sustainability; calculation models; effects of redistribution

sollten unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit Bemessungsmodelle angewandt werden, welche das reale Tragverhalten bestmöglich wiedergeben und so zur Schonung von Ressourcen beitragen. In beiden Fällen wirkt sich eine realitätsnahe Abminderung der Torsionssteifigkeit positiv auf die Torsionsnachweise aus.

Obwohl die beschriebenen Effekte der Torsionssteifigkeit auf das Tragverhalten bekannt sind, treten in der Praxis diesbezüglich immer wieder Fragen und Schwierigkeiten auf. Oft besteht Unsicherheit insbesondere bezüglich der Größe der anzusetzenden Torsionssteifigkeit, vor allem beim Brückenneubau, da hier normative Regelungen fehlen. In vielen Fällen ist auch nicht bekannt, wie groß der Einfluss der Torsionssteifigkeit auf die Schnittgrößenverteilung und letztendlich auf das Bemessungsergebnis ist. Aus diesem Grund erfolgt nachfolgend – nach einer kurzen Zusammenstellung von Grundlagen zur Torsionssteifigkeit – eine Parameterstudie an einem einfachen Beispiel einer einfeldrigen Brücke mit zweistegigem Plattenbalkenquerschnitt. Bei diesem wurden unterschiedliche Steifigkeiten angesetzt und die Schnittgrößen ermittelt. Die Ergebnisse in Form von Einflusslinien zeigen anschaulich die Effekte unterschiedlicher Torsionssteifigkei-

ten. Da es sich hierbei zum einen um ein theoretisches Beispiel handelt und zum anderen im Brückenbau sehr unterschiedliche Brückentypen auftreten, werden anschließend Beispiele aus der Praxis – und zwar eine Brückennachrechnung und ein Brückenneubau – aufgeführt, bei denen die Torsionssteifigkeit variiert wurde und die daraus resultierenden Effekte anschaulich am Auslastungsgrad der erforderlichen Bügelbewehrung aufgezeigt werden können.

2 Grundlagen zur Torsionssteifigkeit

2.1 Gleichgewichts- und Verträglichkeitstorsion

Nach der Elastizitätstheorie kann die Torsionssteifigkeit GI_T^E unter Ansatz des Torsionsträgheitsmoments I_T des reinen Betonquerschnitts und eines konstanten Schubmoduls G ermittelt werden. Der Schubmodul kann hierbei aus dem Elastizitätsmodul des Betons E_c und der Querdehnzahl des Betons μ bestimmt werden:

$$G = E_c / (2 \cdot (1 + \mu)) \quad (1)$$

Des Weiteren kann im Allgemeinen die Torsionssteifigkeit GI_T aus dem Verhältnis des Torsionsmoments T zur Verdrillung v' ermittelt werden:

$$GI_T = T / v' \quad (2)$$

Gewährleistet das im Bauteil auftretende Torsionsmoment die Herstellung eines Systemgleichgewichts, liegt der Zustand einer Gleichgewichtstorsion vor (Bild 1a)). Die Verträglichkeitstorsion bei statisch unbestimmt gelagerten Systemen ist hingegen für die Verträglichkeit der Verformungen erforderlich, wobei die Schnittgrößenverteilung vom Verhältnis der Torsionssteifigkeit zur Biegesteifigkeit abhängt (Bild 1b)).

Untersuchungen zur Übertragung von Kräften in Rissen von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen zeigen, dass sich die Rissflanken bei Torsionsbeanspruchung nicht maßgeblich gegeneinander verschieben und so die Rissreibung vernachlässigt werden kann [5, 6]. Aus diesem Grund erfährt die Torsionssteifigkeit im Vergleich zur Biegesteifigkeit einen deutlich stärkeren Abfall ab Beginn der Rissbildung beim Übergang zum Zustand II. Hieraus folgt, dass sich vor und nach der Rissbildung stark unterschiedliche Schnittgrößenverteilungen ergeben können [7].

2.2 Erkenntnisse zur Torsionssteifigkeit aus Versuchen

Versuche zur Torsionssteifigkeit wurden meist unter reiner Torsionsbeanspruchung und vereinzelt unter kombinierter (realitätsnaher) Beanspruchung mit nur geringer Biegebelastung durchgeführt. Die Erkenntnisse zu den Einflussparametern wie bspw. Querschnittsgeometrie, Bewehrungsgrad, Betonfestigkeit oder Beanspruchungs-

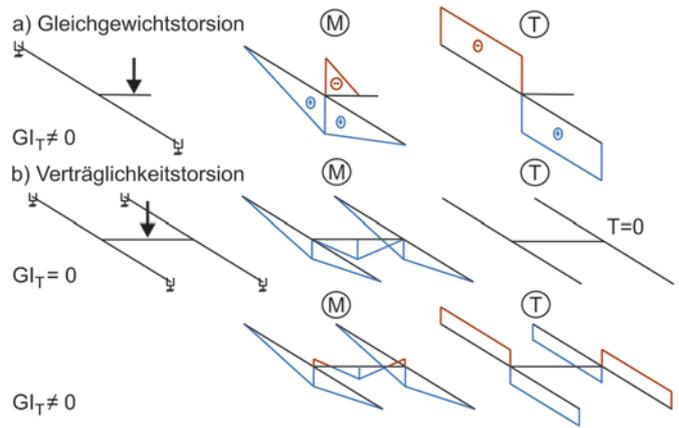


Bild 1 Biegemoment M und Torsionsmoment T unter Einzellast bei a) Gleichgewichtstorsion und b) Verträglichkeitstorsion
 Bending moment M and torsional moment T under single load
 in a) equilibrium torsion and b) compatibility torsion

kombination (vgl. [5, 8, 9]) sind derzeit unvollständig. Insbesondere Untersuchungen zur Auswirkung von dynamischen Beanspruchungen auf die Torsionssteifigkeit von Brücken fehlen nach Kenntnisstand der Autoren.

Vorliegende Untersuchungen zeigen einen ersten Abfall der Torsionssteifigkeit bereits ohne Auftreten sichtbarer Risse [5, 10–12], welche sich unter Lastzuwachs zum Fließmoment der Bewehrung sowie weiter zum Bruchzustand sehr stark reduziert [8, 11, 13, 14]. Bei von Kordina und Teutsch [15] untersuchten Spannbetonplattenbalkenträgern STQ 1 bis 5 wurden das maximale Verhältnis des Biegemoments zum Torsionsmoment M/T sowie der Durchmesser der Spannstähle \varnothing variiert (Bild 2a)). Aus der Torsionsmomenten-Verdrillungs-Kurve (Bild 2b)) lässt sich die Torsionssteifigkeit GI_T (vgl. Gl. (2)) bezogen auf die rechnerische Steifigkeit nach Elastizitätstheorie GI_T^E in Abhängigkeit von der Belastungsgeschichte T/T_U darstellen, wobei T_U das Torsionsbruchmoment darstellt (Bild 2c)). Bei sichtbarem Rissbeginn reduziert sich die Torsionssteifigkeit der Querschnitte STQ1, STQ3, STQ4 und STQ5 mit einem M/T -Verhältnis von 2,0 bzw. 1,0 bereits auf 37–66%. Bei einsetzender Makrorissbildung im Zustand II erfolgte unter Vergrößerung der Rissbildung ein kontinuierlich zunehmender Abfall der Torsionssteifigkeit auf 12–37% bis zum Fließbeginn der Bewehrung und auf 4–7% bis zum Bruchzustand. Die Steifigkeit des Querschnitts STQ2 mit einem M/T -Verhältnis von 10,0 lag im Vergleich dazu deutlich höher und reduzierte sich im Versagenszustand auf 21%. Die entsprechenden Angaben zu „Erste sichtbare Risse“ und „Fließbeginn der Bewehrung“ in Bild 2c) wurden [15] entnommen.

2.3 Berechnungsansätze zur Torsionssteifigkeit

Für orthogonal bewehrte Träger kann die Torsionssteifigkeit GI_T^I im Zustand I näherungsweise nach der Elastizitätstheorie angenommen werden ($GI_T^I = GI_T^E$, vgl. Abschn. 2.1). Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass

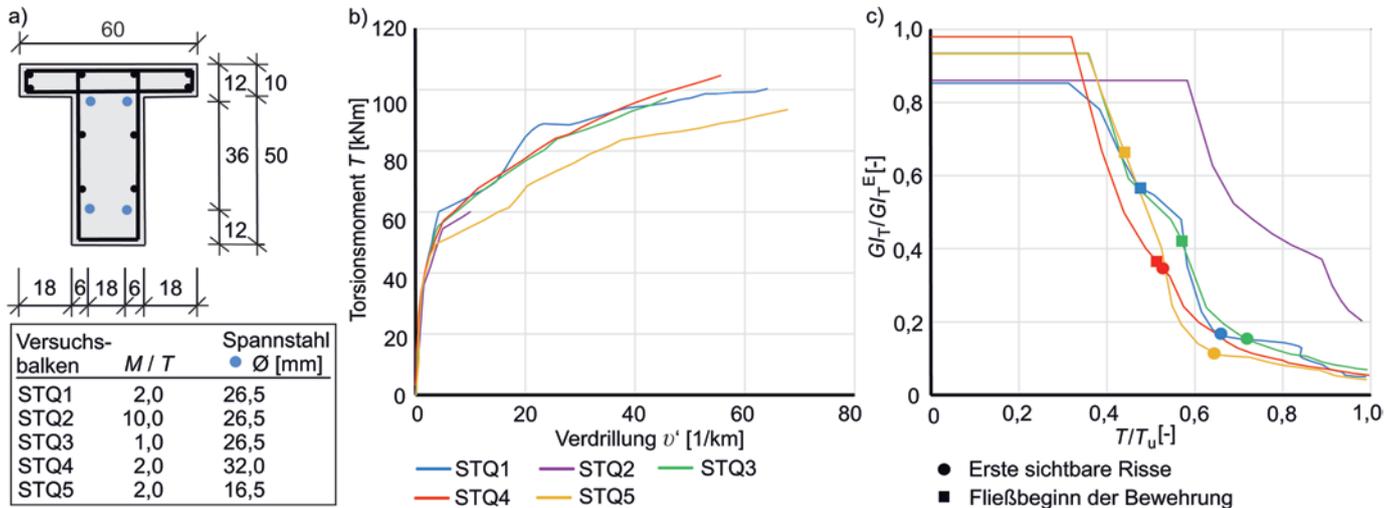


Bild 2 Versuche STQ1 bis 5 nach [15]: a) Querschnittsdarstellung sowie Angaben zum Beanspruchungsverhältnis M/T und Spannstahldurchmesser \varnothing ; b) Torsionsmomenten-Verdrillungs-Kurve; c) Torsionssteifigkeit G_{I_T} bezogen auf die rechnerische Steifigkeit nach Elastizitätstheorie $G_{I_T}^E$ in Abhängigkeit von der Belastung T/T_u für die Querschnittsbereiche III bis VII
 Test specimen STQ1 to 5 according to [15]: a) Cross section as well as load ratio M/T and prestressing steel diameter \varnothing ; b) Torque-twist curve; c) Torsional stiffness G_{I_T} related to the calculated stiffness according to elasticity theory $G_{I_T}^E$ as a function of load T/T_u in the cross sections area III to VII

sich bereits in Zustand I aufgrund von Mikrorissbildung und zweiachsiger Beanspruchung ein nichtlineares Verhalten des Betons einstellt und die reale Torsionssteifigkeit geringer als die rechnerische Torsionssteifigkeit im Zustand I ist (vgl. Abschn. 2.2). Die Torsionssteifigkeit $G_{I_T}^{II}$ im Zustand II kann u. a. durch die Ermittlung einer charakteristischen mittleren Sekantensteifigkeit erfolgen (z. B. [16, 17]), welche einem Punkt der Torsionsmomenten-Verdrillungs-Kurve entspricht. Auf Basis von Torsionsversuchen wurde dieser Ansatz sowohl für die Bestimmung der Torsionssteifigkeit im Zustand II als auch im Zustand I in verschiedensten Regelwerken aufgenommen, indem die Torsionssteifigkeit $G_{I_T}^E$ nach Elastizitätstheorie mit einem pauschalen Beiwert – der das Verhältnis zwischen $G_{I_T}^{II}$ bzw. $G_{I_T}^I$ und $G_{I_T}^E$ beschreibt – abgemindert wird [11, 18–20], vgl. Tab. 1.

Auf Basis von Untersuchungen nach [2, 3] kann gemäß der Nachrechnungsrichtlinie (NRR) die Torsionssteifigkeit der Hauptträger von mehrstegigen Plattenbalkenbrücken bei der Schnittgrößenermittlung für die Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) in Stufe 2 auf 40% bzw. 70% abgemindert werden [21] (vgl. Tab. 1). Eine Abminderung auf 70% erfolgt bei Anwendung des Hauptzugspannungskriteriums für den Nachweis der Querkrafttragfähigkeit, wobei in entsprechenden Abschnitten das Verbleiben der Hauptträger in Zustand I vorausgesetzt wird [3]. Die Steifigkeit der übrigen Tragwerksteile, u. a. der Fahrbahnplatte, wird zur Ermittlung der Schnittgrößen in der Regel nicht abgemindert.

Eine weitere Möglichkeit zur Herleitung der Torsionssteifigkeit eines Bauteils ist deren Modellierung mit numerischen Methoden oder nichtlinearen analytischen Modellen, welche die gesamte Torsionsmomenten-Verdrillungs-Kurve abbilden, z. B. [9, 14, 22–29]. Anwendung findet das Modell nach [22, 23] für die Querkraft- und Torsionsbemessung in der kanadischen Norm [30, 31] und in Stufe 4

Tab. 1 Berechnung der Torsionssteifigkeit gemäß verschiedener Regelwerke
 Calculation of torsional stiffness according to various regulations

Regelwerk	Anmerkung	Zustand I - $G_{I_T}^I$	Zustand II - $G_{I_T}^{II}$
DAfStb-Heft 239 [11]	Dauerlast < 60%	0,80 $G_{I_T}^E$	0,15 $G_{I_T}^E$
	Dauerlast ≥ 60%	0,60 $G_{I_T}^E$	0,10 $G_{I_T}^E$
DAfStb-Heft 240 [20]		0,80 $G_{I_T}^E$	0,24 $G_{I_T}^E$
Model Code 1990 [19]		0,70 $G_{I_T}^E$	0,24 $G_{I_T}^E$
	bei erwarteten Torsions-/Schubrisse		0,12 $G_{I_T}^E$
DIN 1075 [18]	mit Biegesteifigkeit nach Zustand I	0,50 $G_{I_T}^E$	0,50 $G_{I_T}^E$
NRR [21]	in Stufe 2		0,40 $G_{I_T}^E$
	in Stufe 2, bei Anwendung des Hauptzugspannungskriteriums		0,70 $G_{I_T}^E$

der NRR. Bezüglich der Bemessung von Neubauten enthält der aktuelle Eurocode keine Angaben hinsichtlich der Abminderung der Torsionssteifigkeit [32, 33].

3 Parameterstudie zum Einfluss der Torsionssteifigkeit

3.1 Allgemeines

Um die Effekte der Torsionssteifigkeitsansätze bei Brückenüberbauten mit Plattenbalkenquerschnitt aufzuzeigen, wurde eine Parameterstudie durchgeführt (vgl. Abschn. 1). Hierzu wurde ein von Bieger [34] entwickelter Ansatz verwendet, der eine näherungsweise Bestimmung der Schnittgrößen der Längs- und Querträger einer

einfeldrigen Brücke mit zweistegigem Plattenbalkenquerschnitt (Bild 3) ermöglicht. Das Modell wurde für diesen Beitrag hinsichtlich der Berücksichtigung variabler Steifigkeiten und variabler Auswertstellen in Längsrichtung erweitert.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass es sich beim modifizierten Bieger-Ansatz um einen vereinfachten Näherungsansatz handelt und dieser aufgrund der Komplexität der mathematisch aufwendigen Auswertung keine Bemessungshilfe für die Praxis darstellt. Der Ansatz eignet sich jedoch hervorragend für analytische Untersuchungen, da verschiedenste Parameter relativ einfach variiert werden können und somit qualitative und nachvollziehbare Aussagen am Gesamtmodell (Längs- und Quertragrichtung), z. B. zu Umlagerungseffekten aus unterschiedlichen Torsionssteifigkeiten, aufgezeigt werden können.

3.2 Modifiziertes Modell nach Bieger

Bild 3 zeigt die System- und Querschnittsparameter des betrachteten Brückenüberbaubeispiels (= Beispiel 1 nach [34]). Der Parameter e bezeichnet die halbe Länge der Streckenlast $p(y)$ und der Parameter u die Lage des Mittelpunkts der Streckenlast, welche in diesem Beispiel über die gesamte Brückenlänge angesetzt wurde. Die Dicke der Platte wird mit d_{pl} beschrieben. Der Einfeldträger ist an den Auflagern für Biegemomente gelenkig und für Torsionsmomente fest eingespannt gelagert.

Die Untersuchung der Auswirkungen der rechnerisch angesetzten Torsionssteifigkeit am Gesamtsystem kann über die Ermittlung von Einflusslinien erfolgen, welche sich aus der Lage der Streckenlast $p(y)$ in Querrichtung ergeben. Die Einflusslinien der Querkraft und des Feld- und Einspannmoments der lastverteilenden Platte sowie der Querkraft und des Biege- und Torsionsmoments des Hauptträgers können in Abhängigkeit von den Steifigkeitsverhältnissen berechnet werden, welche nach [34] mittels folgender Koeffizienten beschrieben werden können:

$$K_{Pl} = \frac{\pi^4 \bar{a}^3 I_B}{3 L^4 I_{Pl}} \quad (3)$$

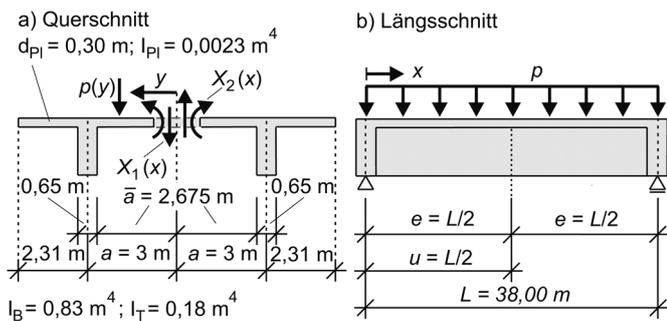


Bild 3 Geometrische System- und Querschnittsparameter sowie Linienlast des Beispiels 1 nach [34]
Geometrical system and cross section parameters as well as the line load of the example 1 according to [34]

$$K_T = \pi^2 \frac{a^2 I_B E_C}{L^2 I_T G} \quad (4)$$

$$K_B = \frac{1}{\pi^2} \frac{L^2 I_{Pl} E_C}{\bar{a} I_T G} \quad (5)$$

mit:

- I_B Torsionsträgheitsmoment des Hauptträgers [m⁴]
- I_{Pl} Torsionsträgheitsmoment der Platte [m⁴]
- a Abstand der Feldmitte bis zur Achse des Hauptträgers (Bild 3) [m]
- \bar{a} Abstand der Feldmitte bis zum Plattenanschnitt des Hauptträgers (Bild 3) [m]
- L Länge des Einfeldträgers [m]

Die statisch unbestimmten Plattenschnittgrößen X_1 (Querkraft) und X_2 (Biegemoment) können nach [34] über Fourierreihen berechnet werden:

$$X_1(x) = \frac{-\frac{2p}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{n\pi u}{L}\right) \sin\left(\frac{n\pi e}{L}\right) \left(1 + n^2 K_T \left(1 - \frac{y}{a}\right) + n^4 K_{Pl} \left(1 - 1,5 \frac{y}{\bar{a}} + 0,5 \frac{y^3}{\bar{a}^3}\right)\right)}{1 + n^2 K_T + n^4 K_{Pl}} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) = p k_q \quad (6)$$

$$X_2(x) = \frac{+\frac{2pa}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{n\pi u}{L}\right) \sin\left(\frac{n\pi e}{L}\right) \left(\frac{K_B}{n^2} \left(1 - \frac{y}{a}\right) + 0,5 \frac{\bar{a}}{a} \left(1 - \frac{y}{\bar{a}}\right)^2\right)}{\frac{K_B}{n^2} + 1} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) = p a k_m \quad (7)$$

Die Variable x entspricht der Lage des betrachteten Schnitts in Brückenlängsrichtung. Der Wert für y ergibt sich aus der jeweils untersuchten Position der Streckenlast in Brückenquerrichtung (vgl. Bild 3). Der letzte Summand des Zählers der Quotienten des jeweils dritten Terms in den Gleichungen $X_1(x)$ und $X_2(x)$ ergibt sich aus der Verbiegung der lastverteilenden Platte infolge äußerer Last und wird somit für die Belastung bei $y \geq \bar{a}$ und $y \leq -\bar{a}$ zu null. Die Einflusslinie der Querkraft $q(0)$ bei $y = 0$ wird durch den Faktor k_q (Gln. (6) und (8); Bild 4a)) beschrieben, die Einflusslinie des Feldmoments $m(0)$ bei $y = 0$ wird durch den Faktor k_m (Gln. (7) und (9); Bild 4b)) beschrieben.

$$q(0) = \int p(y) k_q dy \quad (8)$$

$$m(0) = a \int p(y) k_m dy \quad (9)$$

Das Einspannmoment $m(\bar{a})$ der lastverteilenden Platte an der Stelle $y = \bar{a}$ ergibt sich aus dem Faktor η_m der Einflusslinie:

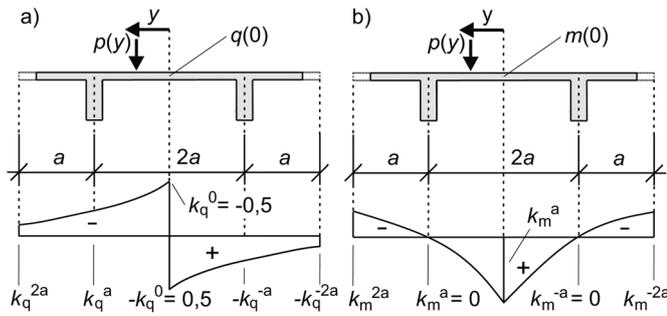


Bild 4 Schematische Darstellung der Einflusslinien der lastverteilenden Platte: a) $1/p$ -fache Ordinaten der Querkraft und b) $1/pa$ -fache Ordinaten des Feldmoments im Schnitt $y=0$ nach [34]
Schematic representation of the influence lines for a) $1/p$ -fold ordinates of the shear force and b) $1/pa$ -fold ordinates of the field moment of the load-distributing plate in the section $y=0$ according to [34]

$$m(\bar{a}) = a \int p(y) \eta_m dy \quad (10)$$

Dabei gilt für $y \geq \bar{a}$

$$\eta_m = k_m - k_q \frac{\bar{a}}{a} \quad (11)$$

und für $y \leq 0$

$$\eta_m = k_m + k_q \frac{\bar{a}}{a} \quad (12)$$

Das Einspannmoment $m(\bar{a})$ für den Bereich $\bar{a} > y > 0$ kann mittels linearer Interpolation bestimmt werden.

Die von Bieger entwickelten Gleichungen zur Bestimmung der Hauptträger-Schnittgrößen wurden im Zuge dieses Beitrags erweitert, sodass sie an jeder beliebigen Stelle x in Längsrichtung bestimmt werden können. Das Biegemoment M , die Querkraft Q und das Torsionsmoment T ermitteln sich für $y \geq 0$ jeweils aus dem statisch bestimmten Anteil, resultierend aus der Integration der Funktion der Streckenlast $p(x)$ in Brückenlängsrichtung, und den statisch unbestimmten Anteilen $k_{M,u}$, $k_{Q,u}$ und $k_{T,u}$, resultierend aus der Integration der Plattenschnittgrößen $X_1(x)$ und $X_2(x)$. Die Einflusslinie des Moments wird durch den Faktor k_M beschrieben, die Einflusslinie der Querkraft durch den Faktor k_Q und die Einflusslinie des Torsionsmoments durch den Faktor η_T . Es ergeben sich die Schnittgrößen der Hauptträger aus Gln. (13) bis (15) wie folgt:

$$M(x) = - \iint (p(x) + X_1(x)) dx dx \quad (13)$$

$$= \frac{pL^2}{8} \left(\left(-\frac{4x^2}{L^2} + \frac{4x}{L} \right) - k_{M,u} \right) = \frac{pL^2}{8} k_M$$

$$Q(x) = - \int (p(x) + X_1(x)) dx \quad (14)$$

$$= \frac{pL}{2} \left(\left(-\frac{2x}{L} + 1 \right) - k_{Q,u} \right) = \frac{pL}{2} k_Q$$

$$T(x) = \int (p(x)(a-y) + aX_1(x) - X_2(x)) dx \quad (15)$$

$$= \frac{pLa}{2} \left(\left(\frac{2x}{L} - 1 \right) \left(1 - \frac{y}{a} \right) + k_{Q,u} - k_{T,u} \right) = \frac{pLa}{2} \eta_T$$

Die Aufleitung der Funktion der Streckenlast ergibt sich aus Gln. (16) bis (18):

$$p(x) = p \quad (16)$$

$$\int p(x) dx = px - \frac{1}{2} pL = \frac{pL}{2} \left(\frac{2x}{L} - 1 \right) \quad (17)$$

$$\iint p(x) dx = \frac{1}{2} px^2 - \frac{1}{2} pLx = \frac{pL^2}{8} \left(\frac{4x^2}{L^2} - \frac{4x}{L} \right) \quad (18)$$

Für die Integrale der Funktionen $X_1(x)$ und $X_2(x)$ gelten Gln. (19) bis (21):

$$\iint X_1(x) dx dx = \frac{pL^2}{8} k_{M,u} \quad (19)$$

$$\int X_1(x) dx = \frac{pL}{2} k_{Q,u} \quad (20)$$

$$\int X_2(x) dx = \frac{pLa}{2} k_{T,u} \quad (21)$$

Die Schnittgrößen für den Bereich $y < 0$ können über die statisch unbestimmten Größen nach Gln. (22) bis (24) bestimmt werden:

$$M(x) = \iint X_1(x) dx dx = \frac{pL^2}{8} k_M \quad (22)$$

$$Q(x) = \int X_1(x) dx = \frac{pL}{2} k_Q \quad (23)$$

$$T(x) = \int (-aX_1(x) - X_2(x)) dx \quad (24)$$

$$= \frac{pLa}{2} (-k_{Q,u} - k_{T,u}) = \frac{pLa}{2} \eta_T$$

Um die Umlagerungseffekte zwischen dem Längs- und Querträgersystem zu untersuchen, wurde das Torsionsträgheitsmoment des Hauptträgers I_T in Gln. (3) bis (5) mit jeweils 100%, 80%, 50%, 40% und 20% angesetzt und die Einflusslinien an den Stellen $x=0$, $x=L/4$ und $x=L/2$ ausgewertet.

3.3 Auswertung der Plattenschnittgrößen

In Bild 5 sind die ermittelten Einflusslinien der Querkraft k_q , des Feldmoments k_m und des Einspannmoments η_m der lastverteilenden Platte in Brückenquerrichtung dargestellt. Auf der x -Achse ist die Position der Streckenlast $p(y)$ aufgetragen und auf der y -Achse lässt sich der zugehörige Faktor der Einflusslinie ablesen. Hieraus ergeben sich folgende Erkenntnisse:

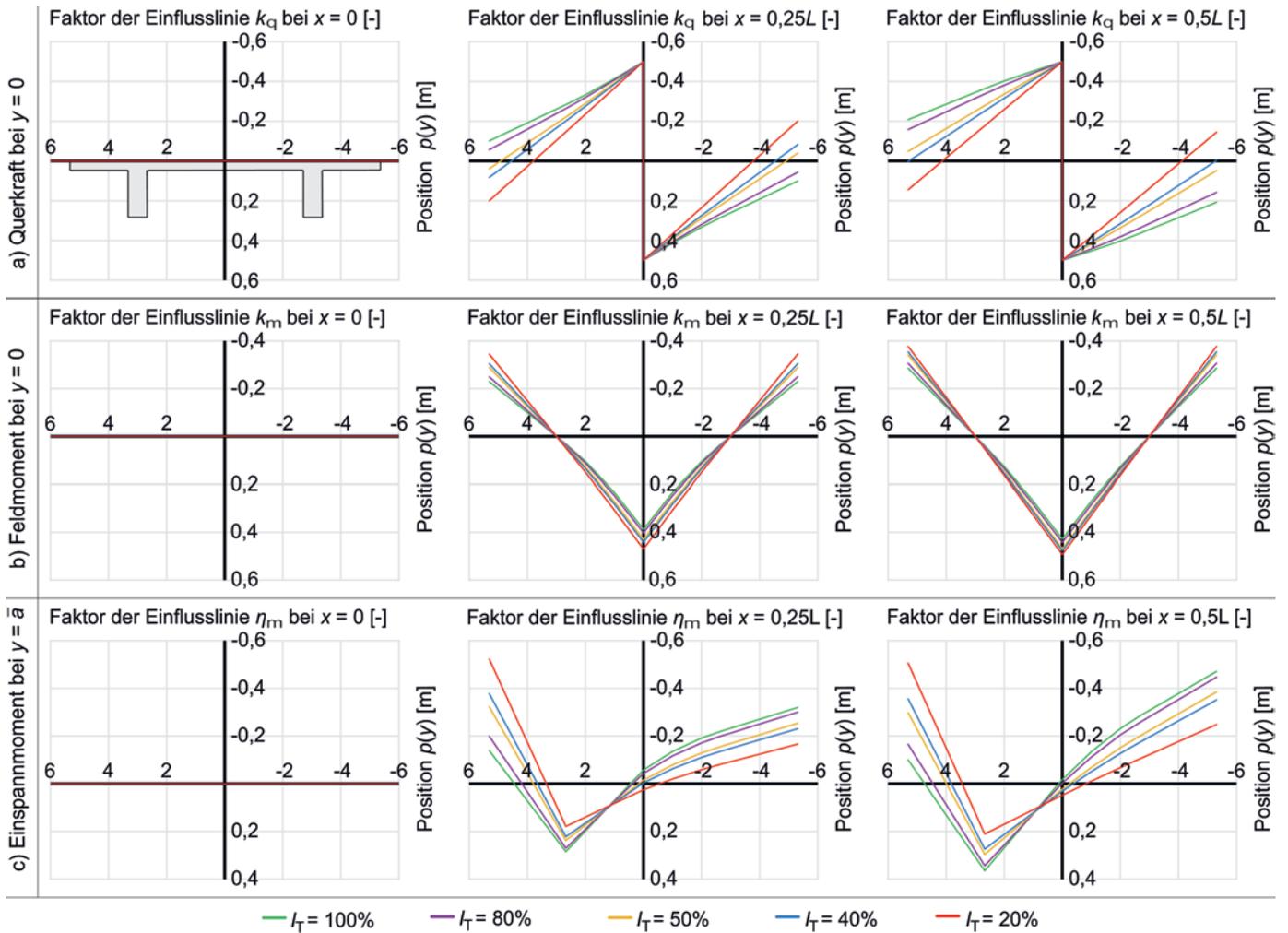


Bild 5 Einflusslinien der lastverteilenden Platte in Abhängigkeit von der Torsionssteifigkeit ($I_T = 20\% - 100\%$): a) $1/p$ -fache Ordinaten der Querkraft bei $y=0$, b) $1/pa$ -fache Ordinaten des Feldmoments bei $y=0$ und c) $1/pa$ -fache Ordinaten des Einspannmoments bei $y=\bar{a}$
 Influence lines of the load-distributing plate as a function of torsional stiffness ($I_T = 20\% - 100\%$): a) $1/p$ -fold ordinates of the shear force, b) $1/pa$ -fold ordinates of the field moment at $y=0$ and c) $1/pa$ -fold ordinates of the fixing moment at $y=\bar{a}$

- Die Einflusslinien werden am Endquerträger ($x = 0$) null.
- Mit abnehmender Torsionssteifigkeit erhöht sich das Feldmoment der Platte, das Feldmoment ergibt sich zu $m(0) = 0$ mit Belastung auf dem Hauptträger ($y = a$).
- Mit abnehmender Torsionssteifigkeit reduziert sich die Querkraft der Platte und das Maximum liegt konstant bei $k_q = 0,5$.

Reduziert sich die Torsionssteifigkeit von $I_T = 100\%$ auf $I_T = 40\%$, ergeben sich folgende wesentliche Erkenntnisse ($x = L/2$):

- Das maximale positive Feldmoment erhöht sich um den Faktor 1,11 bei Belastung in Feldmitte und das maximale negative Feldmoment erhöht sich um den Faktor 1,24 bei Belastung auf dem linken oder rechten Kragarm.
- Das negative Einspannmoment erhöht sich um den Faktor 3,57 mit Belastung auf dem linken Kragarm ($y = 5,31$ m) und das negative Einspannmoment reduziert sich um den Faktor 0,75 mit Belastung auf dem rechten Kragarm ($y = -5,31$ m).

- Das maximale positive Einspannmoment reduziert sich um den Faktor 0,75 bei Belastung am Plattenanschnitt ($y = \bar{a}$).

3.4 Auswertung der Hauptträgerschnittgrößen

In Bild 6 sind die ermittelten Einflusslinien der Querkraft k_Q , des Biegemoments k_M und des Torsionsmoments η_T des linken Hauptträgers dargestellt. Hieraus ergeben sich folgende Erkenntnisse:

- Das Torsionsmoment reduziert sich mit abnehmender Torsionssteifigkeit.
- Die Querkraft und das Torsionsmoment werden maximal am Endquerträger ($x = 0$) und null bei $x = L/2$.
- Das Biegemoment wird maximal bei $x = L/2$ und null bei $x = 0$.
- Mit abnehmender Torsionssteifigkeit erhöhen sich das Biegemoment und die Querkraft mit Position der Streckenlast bei $y > 0$ und reduzieren sich bei $y < 0$.

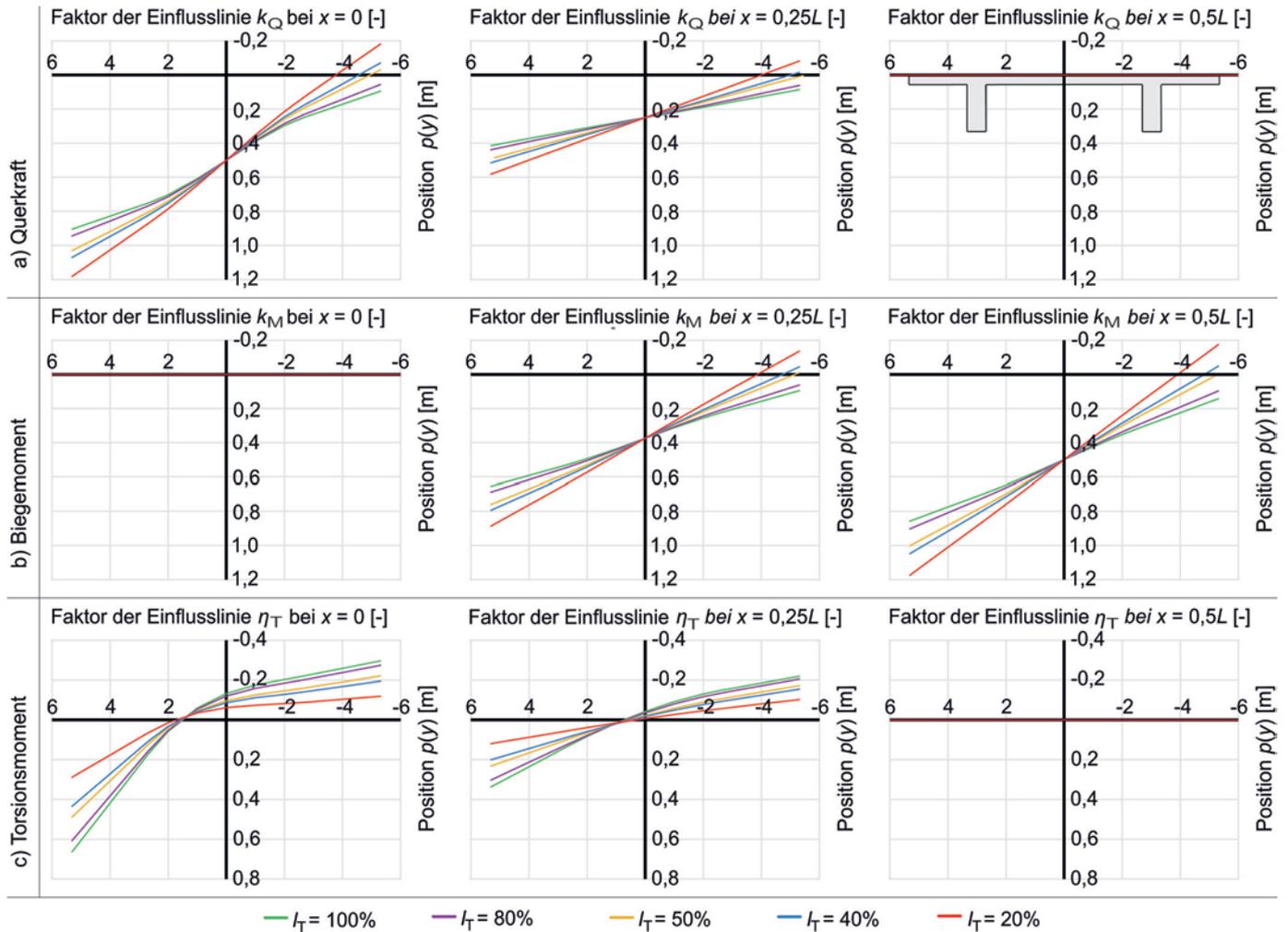


Bild 6 Einflusslinien des linken Hauptträgers in Abhängigkeit von der Torsionssteifigkeit ($I_T = 20\% - 100\%$): a) $2/pL$ -fache Ordinaten der Querkraft, b) $8/pL^2$ -fache Ordinaten des Biegemoments und c) $2/pLa$ -fache Ordinaten des Torsionsmoments
Influence lines of the left main girder as a function of torsional stiffness ($I_T = 20\% - 100\%$): a) $2/pL$ -fold ordinates of the shear force, b) $8/pL^2$ -fold ordinates of the bending moment and c) $2/pLa$ -fold ordinates of the torsional moment

Reduziert sich die Torsionssteifigkeit von $I_T = 100\%$ auf $I_T = 40\%$, ergeben sich folgende Erkenntnisse für die Schnittgrößen des linken Hauptträgers:

- Die maximalen positiven und negativen Torsionschnittgrößen reduzieren sich ca. um den Faktor 0,65.
- Das maximale Biegemoment erhöht sich um den Faktor 1,22 sowie die maximale Querkraft um den Faktor 1,18.

3.5 Einfluss der Biegesteifigkeit der Platte

Aus den vorherigen Auswertungen wird deutlich, dass die Schnittgrößenumlagerung zu einer Erhöhung der Plattenschnittgrößen führt. Durch diese Erhöhung kann es jedoch zu einer Rissbildung in der Platte und damit zu einer Reduktion der Biegesteifigkeit der Platte kommen. Hierbei stellt sich die Frage, ob durch die reduzierte Biegesteifigkeit Schnittgrößen wieder zurück in den Hauptträger umgelagert werden. Aus diesem Grund wurden weitere Auswertungen mit unterschiedlichen Kombinationen der Torsionssteifigkeit der Hauptträger und der

Biegesteifigkeit der Querträger durchgeführt. Hierbei zeigte sich, dass der Einfluss der Plattensteifigkeit auf die vorgestellten Ergebnisse gering ist. Durch die reduzierte Plattensteifigkeit ergibt sich eine Verringerung der maßgeblichen Plattenschnittgrößen, was mit einer geringfügigen Erhöhung des Hauptträgertorsionsmoments einhergeht. Reduziert sich die Plattensteifigkeit I_{Pl} bspw. von 100% auf 60%, steigt das Torsionsmoment um den Faktor 1,09 bei Ansatz einer konstanten Torsionssteifigkeit von $I_T = 40\%$.

3.6 Fazit

Die Ergebnisse der Parameterstudie belegen anschaulich den Einfluss der Torsionssteifigkeit der Hauptträger auf die Querverteilung im System und die hierdurch auftretenden Umlagerungseffekte, die die absolute Größe der auftretenden Torsionsmomente beeinflussen. Gleichzeitig steigen hierdurch die Biegebeanspruchungen im Quertragsystem, die durch die Fahrbahnplatte aufgenommen werden müssen.

4 Praxisbeispiele

4.1 Allgemeines

Da im Brückenbau sehr unterschiedliche Brückenüberbauten verwendet werden und sich die im vorherigen Abschnitt aufgeführten Auswertungen und qualitativen Aussagen auf ein einfaches Beispiel einer einfeldrigen Stahlbetonbrücke mit zweistegigem Plattenbalkenquerschnitt beziehen, werden nachfolgend die Effekte der Torsionssteifigkeit anhand von zwei Brückenbaubeispielen aus der Praxis aufgezeigt. Hierbei handelt es sich um eine Nachrechnung (Abschn. 4.2) und um einen Neubau einer Brücke (Abschn. 4.3). Auch bei diesen Brücken wird die Torsionssteifigkeit variiert, sodass für diese Brücken quantitative Aussagen (in Form des Auslastungsgrads der Bügelbewehrung) hinsichtlich des Ansatzes unterschiedlicher Torsionssteifigkeiten getätigt werden können.

4.2 Nachrechnung einer Bestandsbrücke

4.2.1 Allgemeines

Die Auswirkungen verschiedener Ansätze der Hauptträgertorsionssteifigkeit werden nachfolgend am Beispiel der Nachrechnung der Herrengrabenbrücke (BW Nr. 540) in Hamburg – welche durch die G + S Planungsgesellschaft mbH erfolgte – verdeutlicht. Die im Jahr 1960 errichtete Brücke überquert das Herrengrabenfleet mit einer Stützweite von ca. 21,00 m, in einem Winkel von 94 gon und mit einer Fahrbahnbreite von ca. 20 m (Bild 7). Die Brücke wurde ursprünglich für die Brückenklasse 60 nach DIN 1072 [35] ausgelegt. Die Nachrechnung erfolgte für die Stufen 1 und 2 nach NRR mit dem Ziellastniveau LM 1 nach DIN-Fachbericht 101 [36] sowie einem Sonderlastmodell für Schwerlastfahrzeuge.

Der Überbau besteht aus einem zwölfstegigen Plattenbalkenquerschnitt in Spannbetonbauweise mit Bauhöhen von ca. 1,20 m bis 1,50 m und profiliertem Unter-



Bild 7 Ansicht der Herrengrabenbrücke in Hamburg
View of the Herrengraben bridge in Hamburg

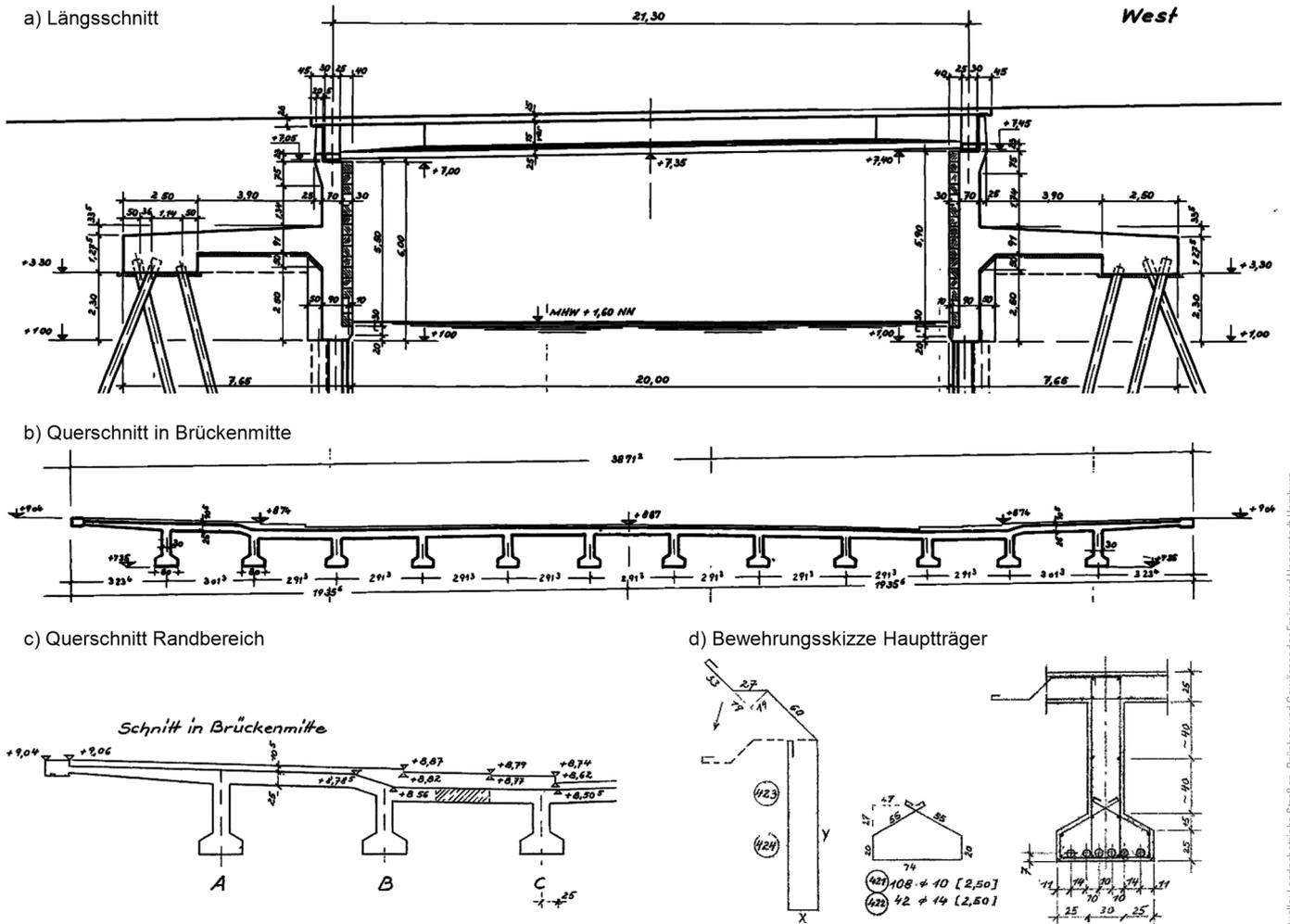
gurt. Die Achsabstände der Hauptträger betragen ca. 3,00 m, welche in den Lagerachsen mit Endquerträgern verbunden sind. In Querrichtung liegt ein schlaff bewehrtes Tragwerk aus einer Stahlbetonfahrbahnplatte mit 25 cm Dicke vor, die sich im Brückenrandbereich noch verjüngt (Bilder 8b) und 8c)). Die Lagerung des Überbaus erfolgt über Verformungslager, die jeweils in den Hauptträgerachsen unterhalb der Endquerträger angeordnet sind. Die Stahlbetonwiderlager sind tiefgegründet (Bild 8a)). Die schlaffe Bewehrung der Hauptträger besteht aus glatten Stäben des Betonstahls IIa. Die Bügel sind mit 180°-Hakenausbildung in den oberen Ecken im Bereich der Fahrbahnplatte geschlossen und entsprechen damit den normativen Vorgaben zur Anrechenbarkeit als Torsionsbügel (Bild 8d)) (vgl. hierzu auch [9, 11, 37]).

Die Auswertung der Bauwerksbücher, Prüfberichte und einer Inspektion vor Ort zeigte zum Zeitpunkt der Untersuchung einen guten Zustand des Überbaus. In den Seitenflächen der Stege konnten keine ausgeprägten Risse festgestellt werden, die überwiegenden Bereiche waren nach örtlicher Feststellung vollständig ungerissen. Im Rahmen der Nachrechnung eines Brückenbauwerks kann die Abminderung der Hauptträgertorsionssteifigkeit im GZT im Regelfall selbst bei einem Bauwerkszustand ohne sichtbare Stegrissbildung angesetzt werden, da eine beobachtbare Makrorissbildung erst in einem relativ hohen Beanspruchungszustand oberhalb des Gebrauchslastniveaus eintritt. Rückschlüsse anhand eines sichtbaren Rissbilds im Stegbereich von Plattenbalkenträgern auf die vorliegende Torsionssteifigkeit sind wiederum schwierig, da u. a. die Einflüsse der konstruktiven Durchbildung und einer Längsvorspannung aktuell noch nicht exakt quantifiziert werden können. In der Nachrechnungsstufe 2 erfolgte daher eine einheitliche Abminderung der Torsionssteifigkeit der Hauptträger mit dem Faktor 0,40 gemäß NRR (vgl. Abschn. 2.3).

4.2.2 Ergebnisse der Nachrechnung

Die Nachrechnung erfolgte mit einem FE-Modell (Trägerrostmodell). Die Ergebnisse wurden für diesen Beitrag um zusätzliche Parameterstudien mit unterschiedlichen Ansätzen der Hauptträgertorsionssteifigkeit mit $I_T = 100\%$, 70% , 10% sowie 1% des linear elastischen Werts nach Zustand I ergänzt. Der Vergleich der Hauptträgerschnittgrößen zeigt (analog der Parameterstudie mit dem modifizierten Bieger-Modell, vgl. Abschn. 3), dass sich die Torsionsmomente mit Abnahme der Steifigkeit deutlich reduzieren, während die Änderungen der Biegemomente und Normalkräfte gering bleiben. Das M/T -Verhältnis steigt im maßgebenden Querschnitt von ca. $M/T = 14$ bei $I_T = 100\%$ auf ca. $M/T = 30$ bei $I_T = 10\%$ bzw. 1% .

Für die Gesamtbewertung des Bestandsbauwerks war nach den Ergebnissen der Stufe 1 die Querkraft- und Tor-



Quelle: Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer der Freien und Hansestadt Hamburg

Bild 8 Längs- und Querschnitte sowie Bewehrungsskizze der Hauptträger der Herrengrabenbrücke
Longitudinal and cross sections as well as reinforcement plan of the main girders of the Herrengraben bridge

sionstragfähigkeit (Stahlversagen der Bügelbewehrung) eines innen liegenden Hauptträgers mit Ausnutzungsgraden von ca. $1,7 > 1,0$ maßgebend. In der Nachrechnungsstufe 2 konnten mit den angepassten Ansätzen der NRR

und besonders aufgrund der reduzierten Hauptträgertorsionssteifigkeiten deutlich niedrigere Auslastungsgrade der Hauptträgertorsionswiderstände ermittelt werden (Bild 9).

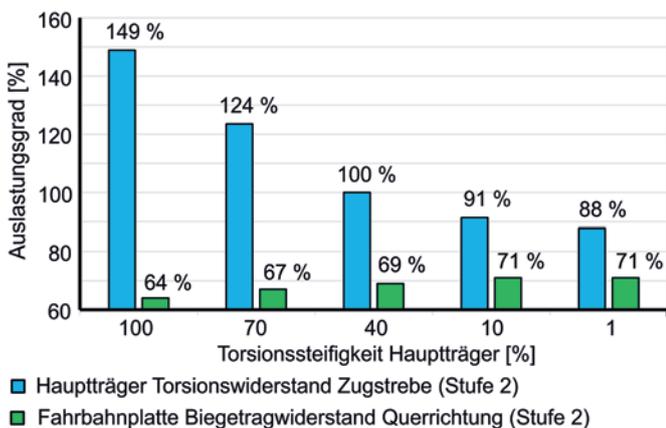


Bild 9 Auslastungsgrade der Bügelbewehrung des maßgebenden Hauptträgers und der Biegebewehrung der Fahrbahnplatte (Querrichtung) in Abhängigkeit von der Torsionssteifigkeit (NRR Stufe 2)
Load factors of the stirrup reinforcement of the determining main girder and of the bending reinforcement of the deck slab (transverse direction) as a function of the torsional stiffness (NRR level 2)

Die Auslastungsgrade der Hauptträger torsionswiderstände in Stufe 2 verringern sich mit der Torsionssteifigkeit der Hauptträger aufgrund der abnehmenden Torsionsmomente deutlich von 149% ($I_T = 100\%$) bis auf 88% ($I_T = 1\%$). Die Reduzierung des Auslastungsgrads der Bügelbewehrung von 149% ($I_T = 100\%$) auf 100% ($I_T = 40\%$) entspricht einem Faktor von 0,67 und ist damit etwa so groß wie die in Abschn. 3.4 beschriebene Reduzierung der Torsionsschnittgrößen am modifizierten Modell von Bieger mit 0,65. Die Biegetragwiderstände der Fahrbahnplatte in Querrichtung werden gleichzeitig stärker ausgelastet, wobei der relative Zuwachs deutlich geringer ausfällt (vgl. hierzu auch Abschn. 3.3). Konkret liegt eine Steigerung von 64% ($I_T = 100\%$) auf 71% ($I_T = 1\%$) vor, welche durch die Biegetragfähigkeitsreserven der Fahrbahnplatte abgetragen werden können. Mit dem nach NRR konformen Ansatz mit $I_T = 40\%$ ergibt sich eine Auslastung der Torsionstragfähigkeit von 100%, was eine noch ausreichende Bewertung des Bestandsbauwerks für das Ziellastniveau ermöglichte.

4.3 Bemessung eines Brückenneubaus

4.3.1 Allgemeines

Eine zweifeldrige Wirtschaftswegüberführung aus dem Jahr 1966 über die BAB 45 bei Hagen wurde abgebrochen und durch einen Brückenneubau in gleicher Lage ersetzt. Da der Ersatzneubau als Einfeldträger ohne Mittelunterstützung errichtet werden sollte, wurde aufgrund der Stützweitenverhältnisse, der Bauwerksschiefe, der geotechnischen Randbedingungen sowie der Sperrpausenverfügbarkeit ein integrales Spannbetontragwerk als wirtschaftlichste und robusteste Bauwerksvariante identifiziert (Bild 10). Die Konzeption und Planung des Neubaus wurde durch GRBV Ingenieure im Bauwesen GmbH & Co. KG erarbeitet. Als Überbauquerschnitt wurde ein dreistegiger, längs vorgespannter Plattenbalkenquerschnitt mit gestuften Fertigteilträgerabmessungen und einer Ortbetonergänzung von 22 cm Höhe vorgesehen (Bilder 11b) und 11c)). Die Stützweite zwischen den Auflagerachsen beträgt 48,80 m und die Brückenschiefe 136 gon. Der Überbau wurde biegesteif mit den Widerlagerwänden verbunden. Die Flügel verlaufen parallel zu der Straßenachse des überführten Wirtschaftswegs, werden von der Widerlagerwand durch Raumfugen getrennt und als hochgesetzter Trogquerschnitt ausgebildet (Bild 11b)). Die Widerlagerwände wurden flachgegründet.

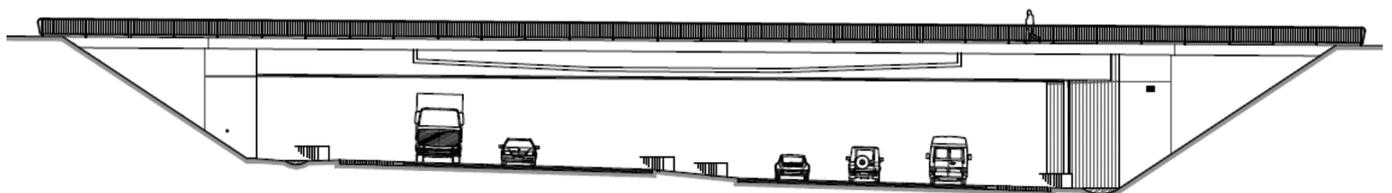
Die Fertigteilhöhe wurde durch die Wahl der Vorspannung optimiert und die Stegbreite des Querschnitts über die Bauwerkslänge veränderlich ausgebildet. Bezogen auf



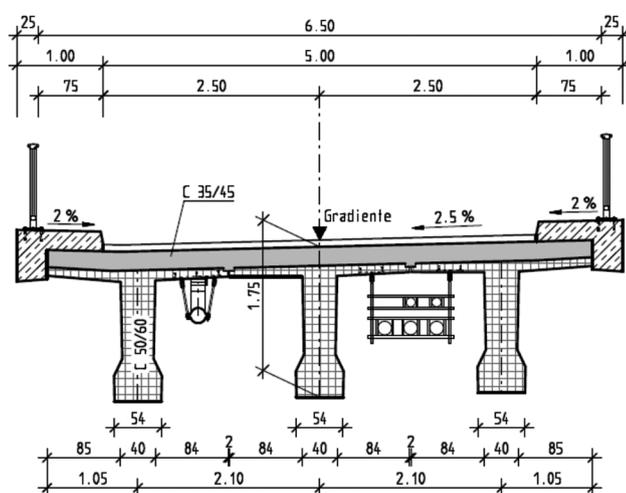
Bild 10 Ansicht des Brückenneubaus bei Hagen im Bauzustand während der Installation der auf Hilfsjochen aufgelagerten Spannbetonfertigteile
View of the new bridge near Hagen in the as-built condition during the installation of the precast prestressed concrete elements supported on auxiliary yokes

die Stützweite konnte durch die integrale Bauweise und die optimierten Trägerabmessungen eine Schlankheit von $l/h = 28$ im Endzustand realisiert werden. Einen besonderen Aspekt beim Tragwerksentwurf bildete der Ansatz der Torsionssteifigkeit der Hauptträger. Die Hauptspannungsverläufe über die Höhe der schlanken Träger und deren Veränderung entlang der Trägerachse im GZT mussten bewertet und die Einhaltung der Dekompressionsnachweise im Bau- und Endzustand unter Berück-

a) Längsansicht



b) Querschnitt in Brückenmitte



c) Querschnitt am Widerlager

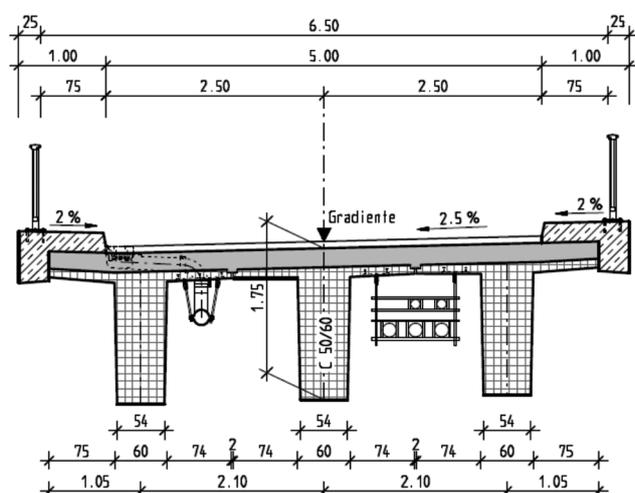


Bild 11 Längsansicht und Querschnitte des Überbaus des Brückenneubaus bei Hagen
Longitudinal view and cross sections of the girder of the new bridge near Hagen

sichtigung der Spannungumlagerungen auf Querschnitts- und Systemebene eingehalten werden.

4.3.2 Ergebnisse der Bemessung

Die Bemessung wurde sowohl an einem Trägerrostmodell als auch an einem FE-Gesamtmodell durchgeführt. Die Torsionssteifigkeit wurde bei der Schnittgrößenermittlung gemäß DIN 1075 [18] mit 50 % des Werts nach Elastizitätstheorie angesetzt ($= 0,50 \cdot GI_T^E$, vgl. Tab. 1). Die Auswertung der oberen Randspannungen am Anschnitt der Widerlagerwand im GZT ergab, dass bei den maßgebenden Lastkombinationen für Torsion und Biegung jeweils der Mittelwert der Betonfestigkeit f_{ctm} überschritten wird. Die über die Trägerhöhe verlaufenden Hauptzugspannungen erreichen in diesem Nachweisschnitt etwa die Werte von f_{ctm} . Im Abstand d von der Widerlagervordkante erreichen jedoch weder die oberen Randzugspannungen noch die Hauptzugspannungen Werte größer als der charakteristische Wert der Betonzugfestigkeit $f_{ctk,0,05}$ (5 %-Quantil). Näherungsweise kann hier ein ungerissener Querschnitt unterstellt werden.

Die zusätzlich durchgeführten, umfangreichen Vergleichsrechnungen unter Ansatz von 100 % der Torsionssteifigkeit nach Elastizitätstheorie führten aufgrund der vorhandenen Brückenschiefe dazu, dass am Anschnitt die oberen Randzugspannungen in der Lastkombination für das maßgebende Biegemoment verringert, gleichzeitig aber für die Hauptzugspannungen in den Trägerstegen infolge der höheren Torsionsbeanspruchung nunmehr f_{ctm} überschritten wurde. Gleichzeitig erhöht die Annahme von $I_T = 100\%$ die erforderliche Bügelbewehrung um bis zu 35 % (Bild 12). Der aus Torsion resultierende Anteil an der erforderlichen Bügelbewehrung liegt mitunter bei ca. 60 % der gesamten Bügelbewehrung.

Der gewählte Ansatz der Torsionssteifigkeit bei der Schnittgrößenermittlung steuert somit insbesondere bei schiefen Bauwerken sehr stark die rechnerisch erforderliche Bügelbewehrung, welche wiederum starken Einfluss

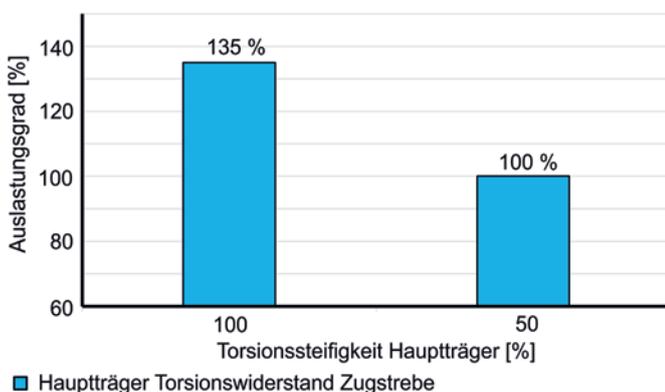


Bild 12 Auslastungsgrade der Bügelbewehrung in Abhängigkeit von der Torsionssteifigkeit
Load factors of stirrup reinforcement as a function of the torsional stiffness

auf die geometrischen Abmessungen der Hauptträger besitzt.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Durch das nichtlineare Tragverhalten von Stahlbeton- und Spannbetonbalken nimmt die Torsionssteifigkeit unter Rissbildung sehr stark ab. Versuche zeigen, dass sich die Torsionssteifigkeit bereits im Zustand I reduziert und zum Fließbeginn der Bewehrung meist nur noch einem Bruchteil der Steifigkeit nach Elastizitätstheorie entspricht. Auf Basis dieser Versuche wurden pauschale Abminderungen der Torsionssteifigkeit nach Elastizitätstheorie vorgeschlagen und in Regelwerken integriert. Eine derzeitige mögliche Abminderung beschränkt sich jedoch auf die Nachrechnung von Bestandsbrücken, für die Bemessung von Brückenneubauten sind zurzeit keine normativen Regelungen vorhanden. Die rechnerisch angesetzten Steifigkeitsverhältnisse bestimmen die Umlagerungseffekte im Gesamtsystem, woraus sich die Bemessungsschnittgrößen ergeben. Eine Reduzierung der Torsionssteifigkeit führt zu einem geringeren Torsionsmoment und einer geringeren erforderlichen Torsionsbewehrung. Hierbei ist jedoch eine mögliche Erhöhung der Biegemomente der Fahrplatte in Querrichtung und ggf. eine Erhöhung der Biegemomente und Querkräfte der Hauptträger in Längsrichtung zu beachten.

Da hinsichtlich des Einflusses der Torsionssteifigkeit auf das Tragverhalten von Betonbrücken in der Praxis oft Fragen und Probleme auftreten, wurde dieser systematisch mittels einer Parameterstudie unter Verwendung des Modells nach Bieger [34] analysiert, welches für diesen Beitrag geringfügig modifiziert wurde. Die Ergebnisse wurden in Form von Einflusslinien dargestellt und zeigen anschaulich die Effekte unterschiedlicher Torsionssteifigkeiten. Diese theoretischen Untersuchungen wurden anschließend um projektspezifische Parameterstudien hinsichtlich abgeminderter Torsionssteifigkeiten von Hauptträgern bei der Nachrechnung einer Bestandsbrücke sowie der Bemessung eines Brückenneubaus ergänzt, die jeweils als Spannbetonbrücken mit mehrstegigem Plattenbalkenquerschnitt ausgeführt wurden. Hierbei ergaben sich günstige Verringerungen der Torsionsbeanspruchungen und damit geringere Auslastungsgrade der Bügelbewehrung bei geringerer angesetzter Torsionssteifigkeit. Bei der Brückennachrechnung konnte zudem eine deutlich bessere Bewertung der Standsicherheit des Bestandsbauwerks erfolgen, wobei die hierbei genutzten Umlagerungen der Schnittgrößen eine höhere Beanspruchung des Quertragsystems zur Folge hatten. Voraussetzung für eine Abminderung der Hauptträgertorsionssteifigkeit bei Nachrechnungen sollte dabei eine als ausreichend bewertete konstruktive Bewehrungsdurchbildung sein. Bei der Bemessung von Brückenneubauten bestimmte die angesetzte Torsionssteifigkeit maßgebend die Bewehrungsmenge und somit die Querschnittsabmessungen der Hauptträger.

Basis für eine nachhaltige und ressourcenschonende Nachrechnung und Bemessung von Stahlbeton- und Spannbetonbrücken ist ein umfangreiches Verständnis des Trag- und Verformungsverhaltens unter Torsionsbeanspruchung und insbesondere der Torsionssteifigkeit sowie die Verankerung der diesbezüglichen Ansätze in Regelwerken und Normen. Um eine zukünftige Bemessung von Brückenbauwerken unter Verwendung von Hochleistungsbetonen und der damit einhergehenden schlanken Bauweise zu ermöglichen (vgl. z. B. [10, 38]), ist es notwendig, verbesserte Berechnungsmodelle zu entwickeln, welche eine wirklichkeitsnahe und sichere Be-

stimmung der Torsionssteifigkeit in Abhängigkeit von den maßgebenden Parametern ermöglichen.

Dank

Die Verwendung der Informationen zur Nachrechnung der Herrengrabenbrücke in Hamburg erfolgt mit freundlicher Genehmigung des Landesbetriebs Straßen, Brücken und Gewässer der Freien und Hansestadt Hamburg, welchem an dieser Stelle herzlich gedankt sei.

Literatur

- [1] Marzahn, G.; Hegger, J.; Maurer, R.; Zilch, K.; Dunkelberg, D.; Kolodziejczyk, A.; Teworte, F. (2015) *Die Nachrechnung von Betonbrücken – Fortschreibung der Nachrechnungsrichtlinie* in: Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.-D. [Hrsg.] *Beton-Kalender 2015*. Berlin: Ernst & Sohn, S. 818–904.
- [2] Hegger, J.; Maurer, R.; Zilch, K.; Rombach, G. (2014) *Beurteilung der Querkraft- und Torsionstragfähigkeit von Brücken im Bestand – Kurzfristige Lösungsansätze*. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) FE. <https://doi.org/15.0482/2009/FRB>.
- [3] Maurer, R.; Zilch, K.; Dunkelberg, D.; Kolodziejczyk, A. (2014) *Effektive Steifigkeiten, Anrechenbarkeit von Spanngliedern und heute unzulässige Bewehrungsformen beim Nachweis für Querkraft- und Torsion bei Bestandsbrücken*. *Bauingenieur* 89, H. 12, S. 511–520.
- [4] Herbrand, M.; Classen, M.; Stark, A.; Kueres, D. (2016) *Einheitliches Querkraftmodell für Stahl- und Spannbetonbrücken. Erweiterte Grundlagen*. *Bauingenieur* 91, H. 12, S. 487–495. <https://doi.org/10.37544/0005-6650-2016-12-43>
- [5] Zedler, T. (2011) *Zum Tragverhalten von Stahlbeton- und Spannbetonbalken unter Torsion* [Dissertation]. Ruhr-Universität Bochum.
- [6] Rombach, G. A.; Jauk, V. (2022) *Untersuchungen zur Kraftübertragung in Rissen von Stahlbetonbalken infolge Querkraft und Torsionsbeanspruchung* [Versuchsbericht]. Technische Universität Hamburg.
- [7] Leonhardt, F. (1978) *Vorlesungen über Massivbau. Vierter Teil. Nachweis der Gebrauchstauglichkeit. Rissebeschränkung, Formänderungen, Momentenumlagerung und Bruchlinientheorie im Stahlbetonbau*. 2. Aufl. Berlin: Springer.
- [8] Ojha, S. K.; Kordina, K. (1973) *Theoretische und experimentelle Untersuchungen an Stahlbetonrechteckbalken unter kombinierter Beanspruchung aus Torsion, Biegemoment und Querkraft* [Forschungsbericht]. Technische Universität Braunschweig. <https://doi.org/10.24355/dbbs.084-201505201055-0>
- [9] Volz, C. J. R. (2019) *Zur Torsionssteifigkeit von Stahlbeton- und Spannbetonträgern* [Dissertation]. Technische Universität München.
- [10] Oettel, V. V. (2016) *Torsionstragverhalten von stahlfaserbewehrten Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbalken* [Dissertation]. Technische Universität Braunschweig. <https://doi.org/10.24355/dbbs.084-201606210916-0>
- [11] Leonhardt, F.; Schelling, G. (1974) *Torsionsversuche an Stahlbetonbalken – DAfStb-Heft 239*. Berlin: Ernst & Sohn.
- [12] Jauk, V.; Rombach, G. A. (2022) *Tragverhalten von Stahlbetonbalken unter reiner Torsionsbeanspruchung*. *Innsbrucker Bautage 2022*, Innsbruck, S. 343–355.
- [13] Leonhardt, F.; Walther, R.; Vogler, O. (1968) *Torsions- und Schubversuche an vorgespannten Hohlkastenträgern – DAfStb-Heft 202*. Berlin: Ernst & Sohn.
- [14] Volz, C.; Fischer, O. (2016) *Zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonbalken unter Torsionsbeanspruchung*. *Beton- und Stahlbetonbau* 111, H. 7, S. 431–444. <https://doi.org/10.1002/best.201600019>
- [15] Teutsch, M.; Kordina, K. (1982) *Versuche an Spannbetonbalken unter kombinierter Beanspruchung aus Biegung, Querkraft und Torsion – DAfStb-Heft 334*. Berlin: Ernst & Sohn.
- [16] Thürlimann, B.; Lüchinger, P. (1973) *Steifigkeit von gerissenen Stahlbetonbalken unter Torsion und Biegung*. *Beton- und Stahlbetonbau* 46, H. 6, S. 2–8. https://doi.org/10.1007/978-3-0348-5966-0_1
- [17] Lampert, P. (1971) *Postcracking stiffness of reinforced concrete beams in torsion and bending*. University of Toronto.
- [18] DIN 1075:1981-04 (1981) *Betonbrücken. Bemessung und Ausführung*. Beuth, Berlin.
- [19] CEB-Comité Euro-International du Béton (1993) *CEB-FIP Model Code 1990*. Telford, London.
- [20] Grasser, E.; Thielen, G. (1991) *Hilfsmittel zur Berechnung der Schnittgrößen und Formänderungen von Stahlbetontragwerken – DAfStb-Heft 240*. Berlin: Beuth.
- [21] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2011) *Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie)*, einschließlich der 1. Ergänzung (2015).
- [22] Mitchell, D.; Collins, M. P. (1974) *Diagonal Compression Field theory – A Rational Model For Structural Concrete in Pure Torsion*. *ACI Journal Proceedings* 71, No. 8, pp. 396–408. <https://doi.org/10.14359/7103>
- [23] Collins, M. P.; Mitchell, D. (1980) *Shear and Torsion Design of Prestressed and Non-Prestressed Concrete Beams*. *PCI Journal Paper* 25, No. 5, pp. 32–100. <https://doi.org/10.15554/pcij.09011980.32.100>
- [24] Teutsch, M. (1981) *Bemessungsgrundlagen für Stahlbeton- und Spannbetonbauteile unter kombinierter Torsionsbeanspruchung* [Forschungsbericht]. Technische Universität Braunschweig.
- [25] Hsu, T. T. (1992) *Nonlinear Analysis of Concrete Torsional Members*. *ACI Structural Journal* 88, No. 6, pp. 674–682. <https://doi.org/10.14359/1259>
- [26] Hsu, T. T. (1988) *Softened Truss Model Theory for Shear and Torsion*. *ACI Structural Journal* 85, No. 6, pp. 624–635. <https://doi.org/10.14359/2740>
- [27] Hsu, T. T. C.; Mo, Y. L. (1985) *Softening of Concrete in Torsional Members – Prestressed Concrete*. *ACI Journal Proceedings*

- ceedings 82, No. 5, pp. 603–615. <https://doi.org/10.14359/10369>
- [28] Hsu, T. T.; Mo, Y. L. (1985) *Softening of Concrete in Torsional Members – Design Recommendations*. ACI Journal Proceedings 82, No. 4, pp. 443–452. <https://doi.org/10.14359/10355>
- [29] Hsu, T. T.; Mo, Y. L. (1985) *Softening of Concrete in Torsional Members – Theory and Tests*. ACI Journal Proceedings 82, No. 3, pp. 290–303. <https://doi.org/10.14359/10335>
- [30] Canadian Standards Association (2006) *CSA Standard S6-06: Canadian Highway Bridge Design Code*. Mississauga, Ontario.
- [31] Canadian Standards Association (2004) *CSA Standard A23.3-04, Design of Concrete Structures*. Mississauga, Ontario.
- [32] DIN EN 1992-2/NA (2013) *Eurocode 2: Nationaler Anhang Deutschland – National festgelegte Parameter – Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 2: Betonbrücken – Bemessungs- und Konstruktionsregeln*. Beuth, Berlin.
- [33] DIN EN 1992-2:2005 + AC:2008 (2010) *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 2: Betonbrücken – Bemessungs- und Konstruktionsregeln*. Beuth, Berlin.
- [34] Bieger, K.-W. (1962) *Vorbereitung zweistegiger Plattenbalken*. Beton- und Stahlbetonbau 57, H. 8, S. 188–195.
- [35] DIN 1072:1952-06 (1952) *Straßen- und Wegbrücken – Lastannahmen*. Beuth, Berlin.
- [36] DIN-Fachbericht 101:2009-03 (2009) *Einwirkungen auf Brücken*. Beuth, Berlin.
- [37] Schramm, N.; Fischer, O. (2020) *Zur Anrechenbarkeit von nicht normgemäßen Bügelformen auf die Querkrafttragfähigkeit von Bestandsbrücken*. Bauingenieur 95, H. 11, S. 408–418.
- [38] Reichel, M. M. (2010) *Dünnwandige Segmentfertigteilterbauweisen im Brückenbau aus gefasertem Ultrahochleistungsbeton (UHFB) – Tragverhalten, Bemessung und Konstruktion* [Dissertation]. Technische Universität Graz.

Autorin und Autoren



Saskia Meyer, M. Sc. (Korrespondenzautorin)
meyer@ifma.uni-hannover.de
Leibniz Universität Hannover
Institut für Massivbau
Appelstraße 9a
30167 Hannover



Prof. Dr.-Ing. Vincent Oettel
oettel@ifma.uni-hannover.de
Leibniz Universität Hannover
Institut für Massivbau
Appelstraße 9a
30167 Hannover



Dr.-Ing. Joachim Göhlmann
j.goehlmann@grbv.de
GRBV Ingenieure im Bauwesen GmbH & Co. KG
Expo Plaza 10
30539 Hannover



Dr.-Ing. Marco Wichers
m.wichers@gus-ing.de
G + S Planungsgesellschaft MBH
Stresemannstraße 29
22769 Hamburg

Zitieren Sie diesen Beitrag

Meyer, S.; Göhlmann, J.; Wichers, M.; Oettel, V. (2022) *Auswirkungen der Torsionssteifigkeit auf das Tragverhalten von Betonbrücken mit Plattenbalkenquerschnitt*. Beton- und Stahlbetonbau 117, H. 11, S. 888–900. <https://doi.org/10.1002/best.202200073>

Dieser Aufsatz wurde in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet. Eingereicht: 30. Juni 2022; angenommen: 26. August 2022.

GEDACHT. GEPLANT. GEBAUT.

Von unserem Team.



Ersatzneubau inklusive Behelfsbrücke über die A45