

## 10 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit behandelt das Tragverhalten im Grundriss gekrümmter Verbundträger. Offene und geschlossene Querschnitte mit oben liegender Betonplatte aus dem Verbundbrückenbau stehen dabei im Vordergrund.

Kapitel 2 enthält eine Zusammenstellung von Grundlagen, die für Verbundträger im Brückenbau benötigt werden. In diesem Zusammenhang wird die im Verbundbau übliche Vorgehensweise, den Verbundquerschnitt zur Ermittlung der Querschnittskennwerte ideell in einen auf den Baustahl bezogenen Gesamtquerschnitt zu überführen, auf die Berechnung der **Querschnittskennwerte der Torsion** übertragen. Brücken werden in Abhängigkeit ihres Querschnitts in drei Kategorien klassifiziert. Die Untersuchungen in den Kapiteln 3 bis 8 beziehen sich auf **Brückenquerschnitte**, bei denen die Anwendung der Stabtheorie ihre Gültigkeit behält.

In Kapitel 3 werden grundlegende Beziehungen für gekrümmte Träger entwickelt und zusammengestellt. Es wird gezeigt, dass die **Steifigkeiten im Einfeldträger** mit Gabelagern keinen Einfluss auf die Schnittgrößenverteilung haben (ausgenommen eine über die Länge veränderliche Torsionssteifigkeit  $GI_T$ ). Formeln zur Berechnung der Schnittgrößen von Einfeldträgern werden zusammengestellt. Mit Hilfe von **Gleichgewichtsbetrachtungen** wird das komplexe Tragverhalten des gekrümmten Trägers verständlich gemacht. Darüber hinaus werden Lastgrößen ins Hauptachsensystem transformiert und die Differentialgleichungen für gekrümmte Träger hergeleitet.

Kapitel 4 behandelt das grundsätzliche Tragverhalten von gekrümmten Ein- und Zweifeldträgern mit Gleichstreckenlast. Die Auswirkungen auf die elastische und plastische Tragfähigkeit von offenen und geschlossenen Verbundquerschnitten werden untersucht. Bei einem vertikal beanspruchten Träger werden infolge der **Kopplung von Biegung und Torsion** immer auch Torsionsmomente auftreten. Für den Einfeldträger mit Gleichstreckenlast können folgende Ergebnisse festgehalten werden:

- In gekrümmten Trägern treten immer auch Torsionsmomente auf. Diese müssen wie auch beim geraden Träger in einen primären und einen sekundären Anteil unterteilt werden. Der sekundäre Anteil führt zu weiteren Beanspruchungen aus den Wölbbimomenten.
- Die Krümmung führt zu einem veränderten Biegemomentenverlauf, der nicht mehr der  $q\ell^2/8$ -Parabel des geraden Trägers entspricht. Das Biegemoment in Feldmitte ist im Vergleich zum geraden Träger größer.
- Die Verformungen hängen von der Art des Querschnitts ab. Bei offenen Querschnitten sind die Verdrehungen  $\vartheta$  und demzufolge wegen der Kopplung von Torsion und Biegung auch die Verschiebungen  $w_M$  teilweise wesentlich größer als bei einem vergleichbaren geschlossenen Querschnitt.

Für den Zweifeldträger folgt:

- Die Verläufe der Biege- und Torsionsmomente hängen von den Steifigkeitsverhältnissen im Träger ab. Zu nennen sind hierbei die Biegesteifigkei-

ten über die Länge und das Verhältnis der Biegesteifigkeit zur Torsionssteifigkeit. Dies führt dazu, dass das Stützmoment beim offenen Querschnitt größer ist als beim vergleichbaren geschlossenen Querschnitt.

- Die Einflüsse der Torsion auf den Biegemomentenverlauf werden durch einen veränderten Querkraftverlauf kompensiert. Der eingehängte Biegemomentenverlauf entspricht auch bei starker Krümmung annähernd der  $q\ell^2/8$ -Parabel.
- Die Art der Lagerung bezüglich der Torsion hat ebenfalls Einfluss auf die Biegemomente.
- Die Verformungen  $\vartheta$  und  $w_M$  sind auch hier abhängig von der Wahl des Querschnitts. Der Unterschied bei vergleichbaren offenen und geschlossenen Querschnitten ist aber nicht so groß wie beim Einfeldträger, da über unterschiedliche Schnittgrößenverläufe die Einflüsse aus der Krümmung bereits ausgeglichen werden.

Die elastischen Grenzlasten in Verbundträgern mit offenem Querschnitt liegen immer unter den elastischen Grenzlasten vergleichbarer Träger mit geschlossenem Querschnitt. Beim Einfeldträger reduzieren die aufzunehmenden Wölbmomente die Grenzlast. Beim Zweifeldträger reduzieren zusätzlich die tendenziell größeren Stützmomente bei der Wahl eines offenen Querschnitts die elastische Grenzlast. Die **Rissbildung des Betons** in Zug beanspruchten Bereichen wirken sich hier ausgleichend aus.

In Kapitel 5 werden **Ersatzsysteme** erläutert, entwickelt und beurteilt. Die Einflüsse der Krümmung werden an geraden Trägern mit Ersatzlasten erfasst. Es wird gezeigt, dass die Auswirkungen der Biegung auf die Torsion größer sind als die Einflüsse der Torsion auf die Biegemomente. Mit Hilfe einer Analogiebetrachtung wird dargelegt, dass Krümmungen bis zu einem Öffnungswinkel von  $\varphi = 0,5$  rad (ca.  $30^\circ$ ) unter Anwendung der Theorie II. Ordnung als Vorverformung betrachtet werden können. In herkömmlichen räumlichen Stabwerksprogrammen sind im Allgemeinen gerade Stabelemente ohne Berücksichtigung der Wölbkrafttorsion (ohne  $\vartheta'$ ) formuliert. An einem Beispiel wird gezeigt, dass bei diesen Programmen die Verläufe von Biege- und Torsionsmomenten in Durchlaufträgern unter Verwendung **eines** Stabzuges nicht richtig bestimmt werden können. Die Wölbkrafttorsion muss in diesem Fall über ungleiche Biegung erfasst werden. In dem vorgestellten Leitermodell nach Ramberger wird ein Vorschlag der Idealisierung gegeben und beurteilt.

In Kapitel 6 wird die **virtuelle Arbeit für ein mäßig gekrümmtes Stabelement** mit 7 Freiheitsgraden unter Berücksichtigung der Wölbkrafttorsion ( $\vartheta'$ ) aufgestellt und die Elementsteifigkeitsmatrix für FE-Berechnungen hieraus entwickelt. Unter Verwendung dieses Stabelementes können stark gekrümmte Träger modelliert werden. Die Qualität dieses Stabelementes wird an mehreren Beispielen überprüft.

In Kapitel 7 wird die Berücksichtigung des Kriechens und Schwindens bei gekrümmten Verbundträgern behandelt. Das zeitabhängige Betonverhalten wird in analoger Weise wie bei geraden Verbundträgern erfasst und auf gekrümmte Träger übertragen. Aus Gründen des Gleichgewichts führen die **primären Schwindmomente** in gekrümmten Einfeldträgern zu Torsionsmomenten an den Auflagern sowie zu zusätzli-

chen Biegemomenten in Feldmitte. Das **Kriechen des Betons** infolge einer zeitlich konstanten Beanspruchung führt in gekrümmten Durchlaufträgern zu sich über die Zeit aufbauenden Umlagerungen der Biege- und Torsionsmomente. Diese müssen als zeitlich veränderliche Einwirkung betrachtet werden. Aufgrund dieser unterschiedlichen Einwirkungen wird das Kraftgrößenverfahren erforderlich. Die Größe der sich über die Zeit aufbauenden Schnittgrößenumlagerungen ist abhängig vom Verhältnis der Biegesteifigkeiten und der Biegesteifigkeit zur Torsionssteifigkeit. Die zeitliche Veränderung des Verhältnisses Biege- zur Torsionssteifigkeit hängt dabei vom gewählten Querschnitt ab. Die Veränderung fällt beim offenen Querschnitt größer aus als bei dem vergleichbaren geschlossenen Querschnitt, da die Torsionssteifigkeit beim offenen Querschnitt hauptsächlich von der Betonplatte abhängt. Bei allen Berechnungen ist zu beachten, dass auch kleine Umlagerungen der Biegemomente große Auswirkungen auf die Torsionsmomente an den Auflagern haben.

In Kapitel 8 wird verdeutlicht, dass in gekrümmten Trägern ein besonderes Augenmerk auf die Problematik der Erhaltung der Querschnittsform, die eine wichtige Voraussetzung für die Gültigkeit der Stabtheorie ist, gelegt werden muss. In gekrümmten Trägern entstehen aus der Krümmung kontinuierliche Torsionsbeanspruchungen aus der **Umlenkung von Längsspannung**. Die Einleitung dieser Torsionsbeanspruchungen kann bei nicht ausgesteiften Trägern zu großen Profilverformungen führen, die wiederum weitere Belastungen in Längsrichtung hervorrufen. Die **Erhaltung der Querschnittsform** kann durch eine genügend große Anzahl ausreichend steifer Queraussteifungen erreicht werden. Es wird gezeigt, dass für die richtige Erfassung der **profilverformenden Beanspruchung** in eine einzuleitende Torsionsbeanspruchung aus einer vertikalen und einer horizontalen Belastung unterschieden werden muss. Ein Vorschlag zur Bemessung der Queraussteifungen in gekrümmten Trägern wird gemacht.

In Kapitel 9 werden breite Brücken behandelt, deren Querschnitte sich in Querrichtung verformen können, sodass man nicht mehr von der Erhaltung der Querschnittsform ausgehen kann. Ein Modellierungsansatz von Unterweger, der speziell für den Brückenbau entwickelt wurde, wird diskutiert. Zur Modellierung gekrümmter Brücken mit offenen Querschnitten und mehreren Hauptträgern unter Verwendung eines **Trägerrostes** werden Hinweise gemacht. Vor allem in Bezug auf mittragende Breiten von Hauptträgern in gekrümmten Systemen sind weitere Untersuchungen erforderlich.