

## 7 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit behandelt das Tragverhalten von **offenen und geschlossenen Stahlprofilen** im Einspannbereich von Stahlbetonkonstruktionen. Die Bestimmung der erforderlichen Einspanntiefe steht dabei im Vordergrund. Dazu werden die vorhandenen Bemessungsmodelle für I-Profile vorgestellt, verglichen und hinsichtlich ihrer Eignung beurteilt. Darüber hinaus wird das Tragverhalten des Stahlprofils im Einspannbereich untersucht und ein eigenes weiterentwickeltes Modell für die Bestimmung der Einspanntiefe von I-Profilen hergeleitet. Modelle zur Berechnung der Einspanntiefe von geschweißten Kastenquerschnitten sowie rechteckigen und kreisförmigen Hohlprofilen existieren bislang nicht. Auch bei diesen Querschnitten wird die Lastabtragung analysiert, so dass Näherungsverfahren zur Bestimmung der Einspanntiefe entwickelt werden können.

Die Forschung für das Tragverhalten von I-Profilen im Einspannbereich von Stahlbetonkonstruktionen ist sehr weit fortgeschritten. Es existieren zahlreiche Berechnungsmodelle, die sich im Ansatz der Betonpressungen am Querschnitt und ihrer Verteilung über die Stablängsachse unterscheiden. Sie werden in Kapitel 2 vorgestellt. Es werden zwei Versagenszustände unterschieden: **Betonversagen und Stahlversagen**. Beim Betonversagen werden die maximal möglichen Betonpressungen angesetzt, was zur geringstmöglichen Einspanntiefe führen würde. Wird in diesem Zustand die Grenztragfähigkeit des Stahlprofils überschritten, ist das Stahlversagen maßgebend. Bei I-Profilen stellt sich das Stahlversagen häufig durch Erreichen der plastischen Querkraft ein.

Die Untersuchungen zum Tragverhalten werden im Rahmen dieser Arbeit mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente durchgeführt. Das verwendete FE-Modell wird in Kapitel 3 vorgestellt. Es ist an das Verfahren des elastisch gebetteten Balkens angelehnt. Allerdings werden folgende Modifikationen vorgenommen:

1. Der Stab wird mit Hilfe eines räumlichen Modells idealisiert, so dass die Bettung nicht nur über die Stablängsrichtung sondern auch am Querschnitt angesetzt werden kann.
2. Die elastische Bettung wird nur bis zum Erreichen der Grenzbetonpressungen angesetzt. Darüber hinaus wird von einer idealplastischen Verformung ausgegangen.

In Kapitel 4 werden die unterschiedlichen Annahmen der Bemessungsmodelle für I-Profile gegenübergestellt und die rechnerisch erforderlichen Einspanntiefen verglichen. Die Berechnungsmodelle von *Kindmann* ([40], [41]) führen zu den wirtschaftlichsten Ergebnissen. Ausschlaggebend für die sehr günstigen Ergebnisse ist die **Konzentration der Betonpressungen zum oberen und unteren Ende des Einspannbereichs** im Versagenszustand „Stahlversagen“. Die FE-Untersuchungen zeigen, dass sich konzentrierte Betonpressungen an den Enden des Einspannbereichs einstellen können, was mit den Modellen von *Kindmann* übereinstimmt. Zusätzlich

werden weitere Effekte aufgezeigt, die bei der Weiterentwicklung zu einem neuen Modell verwendet werden. Vor allem ist hier die **Entstehung von Abstützkräften** bei breiten schlanken Gurten zu erwähnen, die eine Vergrößerung der effektiven Breite beim Ansatz der Betonpressungen zulässt. Die Abstützkräfte erzeugen zudem zusätzliche Reibungskräfte die ebenfalls angesetzt werden. Das Verfahren wird mit Versuchsergebnissen verglichen, was zu guten Übereinstimmungen führt.

Als Übergang von I-Profilen zu Rechteckhohlprofilen werden in Kapitel 5 zunächst geschweißte Kastenprofile betrachtet. Dabei wird ausgehend von 2 nebeneinander stehenden I-Profilen das oben genannte Ingenieurmodell erweitert. Anschließend werden Untersuchungen zum **Tragverhalten von Rechteckhohlprofilen im Einspannbereich** durchgeführt. Es zeigt sich ein Tragverhalten, das in folgenden Punkten vergleichbar mit dem von I-Profilen ist:

1. Für den Ansatz der Betonpressungen über die Stablängsachse kann das Parabel-Rechteck-Diagramm verwendet werden
2. Die maximalen Betonpressungen am Querschnitt stellen sich im Bereich der Stützung durch die Stege ein, d.h. hier im Bereich der Ausrundungen in den Querschnittsecken
3. Die Verteilungsbreite der Betonpressungen am Gurt ergibt sich aufgrund einer Fließgelenkkette mit 4 Fließgelenken

Als Besonderheit ist zu beachten, dass sich aufgrund einer **Rahmenwirkung** zusätzliche Betonpressungen im Bereich der Stege einstellen, die **lokale Drucknormalkräfte im Gurt** erzeugen. Aufgrund dieser Normalkräfte ergeben sich kleinere Verteilungsbreiten als bei I-Profilen. Es wird ein Berechnungsmodell entwickelt, das diesen Effekt berücksichtigt. Zur Vereinfachung sind die Abminderungsfaktoren für die Verteilungsbreiten für kaltgefertigte und warmgefertigte Hohlprofile für verschiedene Stahl- und Betongüten in Abhängigkeit von der Schlankheit des Gurtes ( $B/t$ -Verhältnis) angegeben. Das neue Verfahren wird mit **aktuellen Versuchsergebnissen** verglichen. Das Hauptlastabtragungsverhalten lässt sich anhand von Riss- und Verformungsbildern sehr gut wiedererkennen, Vergleichsrechnungen liegen auf der sicheren Seite. Da bei geringen Einspanntiefen ein Herausdrehen des Profils aus dem Betonblock auftritt, wird als Mindesteinspanntiefe die zweifache Profilhöhe empfohlen ( $\min f = 2 \cdot H$ ). Abschließend werden Bemessungshilfen entwickelt, die ein einfaches Mittel zur Bestimmung der Einspanntiefe für warmgefertigte Rechteck- und Quadrathohlprofile darstellen.

Die Analyse des **Tragverhaltens von Kreishohlprofilen** wird in Kapitel 6 durchgeführt. Im Vergleich zu I-Profilen und Rechteckhohlprofilen erfolgt die Eintragung der Betonpressungen in den Querschnitt im Wesentlichen über die **Gewölbewirkung des Kreisringes**. Folglich kann der gesamte Durchmesser als effektive Breite angesehen werden, und es entstehen gleichmäßige **lokale Drucknormalkräfte im Kreisring**. Dadurch ergibt sich lediglich eine Beschränkung der angreifenden Betondruckspannungen auf die plastische Normalkraft im Blech. Es zeigt sich, dass

die lokalen Drucknormalkräfte Auswirkungen auf die Verteilung der Betonpressung in Längsrichtung haben. Sind sie vergleichsweise gering (dicker Steg), kann das Parabel-Rechteck-Diagramm ohne Einschränkungen verwendet werden. Liegt die lokale Normalkraft im Bereich von  $n_{pl}$  darf nur ein cosinusförmiger Ansatz für die Betonpressungen in Längsrichtung angesetzt werden. Diese Fallunterscheidung führt dazu, dass zwei Modelle entwickelt werden:

Modell 1: Parabel-Rechteck-Ansatz

Modell 2: cosinusförmiger Ansatz

Ein Vergleich mit Versuchsergebnissen führt sowohl qualitativ als auch quantitativ zu sehr guten Übereinstimmungen. Aufgrund von Herausdreheffekten wird auch hier eine Mindesteinspanntiefe empfohlen, die dem zweifachen Profildurchmesser entspricht ( $\min f = 2 \cdot D$ ). Es werden wiederum Bemessungshilfen entwickelt, mit denen die erforderliche Einspanntiefe von Kreishohlprofilen für die meisten praxisrelevanten Fälle direkt abgelesen werden kann.