

9 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Tragfähigkeit von doppelsymmetrischen I-Trägern unter einachsiger Biegebeanspruchung untersucht. Für verschiedene ausgewählte baustatische Systeme wird das Tragverhalten detailliert analysiert und es werden Tragfähigkeiten ermittelt. Dabei werden bestehende Ansätze zur Tragfähigkeitsermittlung im Hinblick auf ihre Anwendungsgrenzen untersucht und neue Erkenntnisse entwickelt. Grundlage der Untersuchungen sind numerische Berechnungen nach der Fließzonentheorie mit dem Programm ANSYS. Als Ausgangspunkt wird der in der Literatur häufig vorkommende Einfeldträger gewählt. Die detaillierte Analyse des Tragverhaltens liefert die Grundlage für eine mögliche Verbesserung der Biegedrillknicknachweise. Fließzonenberechnungen für den Kragträger als auch für den Zweifeldträger sind in dieser Tiefe neu. Ein Vergleich der Tragfähigkeiten ermöglicht eine Aussage über systemabhängige Streuungen und weitere Einflussparameter, wie dem bezogenen Schlankheitsgrad und Querschnittswerten.

Zunächst werden in Kapitel 2 die Grundlagen vorhandener Nachweisverfahren für Stahlträger mit Biegedrillknickgefahr erläutert. Insbesondere werden die Annahmen und berücksichtigten Parameter beim Verfahren mit Abminderungsfaktoren sowie beim Ersatzimperfektionsverfahren dargelegt. In Kapitel 3 erfolgt eine Diskussion der Vorgehensweise bei Fließzonenberechnungen. Die üblichen Annahmen werden bezüglich der sinnvollen Anwendung für Biegedrillknickuntersuchungen hinterfragt. Ein neuer Ansatz für die zu berücksichtigende geometrische Imperfektion für Fließzonenberechnungen wird hergeleitet. Darüber hinaus werden Anwendungsgrenzen von Finite-Elemente-Programmen aufgezeigt. Daraus resultierend werden Basisannahmen festgelegt, die für die Untersuchungen verwendet werden.

Im Einzelnen lassen sich die Hauptaussagen dieses Kapitels wie folgt zusammenfassen:

- Beim Biegedrillknicken sollten für Fließzonenberechnungen $v_0(x)$ und $\vartheta_0(x)$ in Kombination als geometrische Imperfektion angesetzt werden, weil in der Eigenform beide Verformungen auftreten. Sie sollten affin zur Eigenform angenommen werden, da sich unter diesem Ansatz in der Regel die kleinste Tragfähigkeit ergibt und damit eine eindeutige Berechnungsvorschrift vorliegt. Die Zahlenwerte sollten mit $\max v_{0,OG} = L/1000$ oder ggf. auch etwas größeren Werten bestimmt werden.
- Es können die bekannten Annahmen für die Eigenspannungen verwendet werden. Vornehmlich kommt es auf die Zahlenwerte an den Gurträndern und auf den dortigen Verlauf an.

In Kapitel 4 erfolgt mithilfe der in Kapitel 3 ausführlich diskutierten und modifizierten Vorgehensweise bei den Fließzonenberechnungen die Analyse von

experimentellen Traglastbestimmungen aus der Literatur. Es werden sowohl Versuche an Einfeldträgern als auch an Kragträgern nachgerechnet. Die experimentellen Tragfähigkeiten weisen bereits große Streuungen auf, jedoch decken die gewählten Basisparameter für eine Berechnung nach Fließzonentheorie die Varianz in den Annahmen und Parametern (Versuchsträger) auf der sicheren Seite liegend ab.

In den Kapiteln 5 bis 7 werden für die drei ausgewählten Basissysteme Parameterstudien in Form von Fließzonenberechnungen durchgeführt. Zwei ausführliche Beispiele zeigen die Grenzen bisheriger Nachweismethoden auf. Das Tragverhalten des Einfeldträgers wird ausführlich untersucht und dargestellt. Neu ist insbesondere die Analyse der stark abweichenden Tragverhalten von Kragträgern und Zweifeldträgern. Eine umfassende systemübergreifende Untersuchung zu den jeweiligen Versagenskriterien wird durchgeführt, die sowohl eine Variation des Profils als auch des bezogenen Schlankheitsgrads berücksichtigt. Für jedes Basissystem folgen Tragfähigkeiten in Form von rechnerisch erforderlichen Abminderungsfaktoren und erforderlichen Imperfektionen für das Ersatzimperfektionsverfahren.

Im Einzelnen lassen sich die Erkenntnisse und Schlussfolgerungen dieser Untersuchungen wie folgt zusammenfassen:

- Die Wahl eines kombinierten Ansatzes sowohl für die geometrische Imperfektion bei Fließzonenberechnungen als auch als Vorverformung für das Ersatzimperfektionsverfahren wird empfohlen. Die Annahme eines kombinierten Ansatzes von v_0 und ϑ_0 für die geometrische Imperfektion führt in der Regel zu kleineren Tragfähigkeiten als eine Imperfektion mit der Amplitude $L/1000$ für die Vorverformung v_0 ($\vartheta_0 = 0$).
- Der Ansatz der skalierten Eigenform (nur v_0) als Ersatzimperfektion führt verglichen mit einem parabelförmigen- oder sinusförmigen Verlauf zur geringsten Tragfähigkeit. Letztere liegen auf der unsicheren Seite.
- Da der Eigenformanteil ϑ_{cr} für den **Kragträger** je bezogenem Schlankheitsgrad stark variiert, ist es wichtig, für die geometrische Imperfektion, aber auch für die Ersatzimperfektion, einen eigenform-affinen Verlauf zu wählen. Es wird der kombinierte Ansatz von v_0 und ϑ_0 empfohlen.
- Für den **Einfeldträger** tritt in einem großen bezogenen Schlankheitsgradbereich Eigenwertversagen des teilplastizierten Systems auf. Für große bezogene Schlankheitsgrade reicht dazu häufig ein geringfügiges Plastizieren an einem Gurtrand aus. Um aus der Fließzonentheorie ein vereinfachtes Verfahren herzuleiten, wäre in diesen Fällen ein Spannungsnachweis unter Berücksichtigung der Eigenspannungen sinnvoll.
- Die statische Unbestimmtheit des **Zweifeldträgers** wirkt sich maßgeblich auf das Tragverhalten aus. Es können sowohl an der Mittelstütze als auch in den Feldbereichen Fließzonen auftreten. In der Regel entstehen die Fließzonen

zuerst an der Mittelstütze und danach in den Feldbereichen. Dieser Effekt führt zu Momentenumlagerungen von der Stütze in die Felder.

- Es treten große profilabhängige Streuungen der rechnerisch erforderlichen Abminderungsfaktoren auf (bis zu 45 %). Das Verhältnis I_y/I_T ist gut geeignet, um den Einfluss des Profils zu erfassen. Zwei Biegedrillknickkurven sind nicht ausreichend. Es ist eine größere Anzahl an Biegedrillknickkurven erforderlich, um die profilabhängigen Streuungen erfassen zu können. Denkbar wäre auch eine profilwert-abhängige Bestimmung des Imperfektionsbeiwertes.
- Es stellt sich die prinzipielle Frage, ob der bezogene Schlankheitsgrad ein brauchbares Maß ist, um die Biegedrillknickgefahr mithilfe von Abminderungsfaktoren zu erfassen.

Eine vergleichende Analyse und Diskussion der Ergebnisse der einzelnen Basissysteme erfolgt in Kapitel 8. Hauptaugenmerk liegt auf den profil- und systemabhängigen Streuungen. Die bestehenden Verfahren – Verfahren mit Abminderungsfaktoren und Ersatzimperfektionsverfahren – werden im Hinblick auf ihre Möglichkeit zur Erfassung der Streuungen überprüft und eine Optimierung vorgenommen. Wesentliche Erkenntnisse werden hier zusammenfassend herausgearbeitet. Im Einzelnen lassen sich die Schlussfolgerungen wie folgt zusammenfassen:

- Die Tragfähigkeiten aus der Fließzonenberechnung weisen eine große profil- und systemabhängige Streuung auf. Weder die beiden Biegedrillknicklinien nach DIN EN 1993-1-1, noch der bisher übliche Ansatz der Ersatzimperfektionen, der auch nur zwischen zwei Querschnittstypen unterscheidet, kann das Tragverhalten ausreichend genau erfassen.
- Für das Verfahren mit Abminderungsfaktoren wird ein I_y/I_T -abhängiger Ansatz vorgeschlagen, der auf der sicheren Seite liegt. Für das Ersatzimperfektionsverfahren ist eine einheitliche Festlegung der Werte schwierig. Die Systemabhängigkeit muss für einen sinnvollen Ansatz jedoch mit einbezogen werden. Als Annahme kann ein j -Wert von $j = 200$ gewählt werden. Mit der zugehörigen Vorverdrehung stellt dieser einen Ansatz auf der sicheren Seite liegend dar.
- Um alle Systeme und Profile zu erfassen, scheint es sinnvoll, das Fließzonenverfahren baupraktisch anwendbar zu machen. Dafür müssen klare Vorgaben bezüglich Eigenspannungen, geometrischen Imperfektionen und der Durchführung der Berechnung gegeben werden.

Die Arbeit liefert mit ihren Empfehlungen und Erkenntnissen die Basis für die Weiterentwicklung bestehender und Neuentwicklung weiterer Verfahren. Sie zeigt darüber hinaus auch die Notwendigkeit auf, eine Methode zu entwickeln, die das Tragverhalten sämtlicher Systeme sicherer und realitätsnäher erfassen kann.