

10 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Tragfähigkeit und dem Tragverhalten von Stabanschlüssen und Fachwerkknoten mit ausgeschnittenen Knotenblechen. Ein Schwerpunkt liegt dabei in der Analyse des sich einstellenden Kraftflusses und der sich einstellenden Versagensmechanismen.

Zunächst werden in Kapitel 2 die vorhandenen Bemessungsmethoden und Berechnungsverfahren nach dem Stand der Technik und dem Stand der Forschung zu diesem Thema vorgestellt. Diese beruhen im Wesentlichen aus Kraftflussannahmen und Gleichgewichtsbeziehungen. Der wesentliche Unterschied in den vorliegenden Modellen liegt in der Erfassung der sich einstellenden Zwängungsspannungen sowie den unterschiedlichen Versagensmechanismen und daraus resultierend in der Tragfähigkeit des Anschlussbereichs.

Die Untersuchungen zum Tragverhalten werden im Rahmen dieser Arbeit mit der Methode der Finite Elemente durchgeführt. Die betrachteten Detailpunkte werden dabei als räumliche Modelle mit Hilfe von Schalenelementen abgebildet. Als zusätzliche Untersuchungen werden Eigenwertuntersuchungen an Druckstäben und beispielhaften Fachwerken durchgeführt. Die Grundlagen der Modellierung und die Vorgehensweise bei der Berechnung und Auswertung werden in Kapitel 3 vorgestellt.

Den Untersuchungen der Detailpunkte wird in Kapitel 4 eine **Diskussion der Beanspruchungen in Fachwerkstreben** vorangestellt. Anhand eines beispielhaften Fachwerkträgers werden die Schnittgrößen im Anschlussbereich mit verschiedenen Berechnungsmethoden ermittelt und miteinander verglichen. Dabei zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Normalkraftbeanspruchungen. Allerdings ist hervorzuheben, dass sich nennenswerte **Biegebeanspruchungen in der Fachwerkebene** ergeben. Zur Erfassung der Biegebeanspruchungen sind die **Stabwerksmodellierungen** auch bei einer biegesteifen Verbindung der Fachwerkstäbe **nicht geeignet**. Aufgrund der großen Steifigkeit im Anschlussbereich ergeben sich deutlich höhere Biegemomente. Sie sind im Vergleich zum Gesamtmoment zwar gering, können aber für die Tragfähigkeit der einzelnen Stäbe durchaus relevant werden. Außerdem kann gezeigt werden, dass sich durch Plastizierungen zwar Kraftumlagerungen einstellen, diese aber **nicht die Annahme reibungsfreier Gelenke** in den Fachwerken zulassen. Die Untersuchungen zeigen auf, dass durchaus Forschungsbedarf besteht, um die tatsächlich einwirkenden Schnittgrößen in Fachwerken wirklichkeitsnah bestimmen und um die Auswirkungen auf die Tragfähigkeit abschätzen zu können.

Das Tragverhalten von **symmetrischen Zugstabanschlüssen** wird in Kapitel 5 anhand von beispielhaften Anschlüssen aufgezeigt. Die Untersuchungen werden an rechteckigen und schräg abgeschnittenen Anschlussblechen durchgeführt. Bei der Analyse wird gezeigt, dass sich die Zugkraft zur Einleitung in das Anschlussblech auf beide Anschlussseiten gleichmäßig aufteilt. Dabei entstehen Umlenkungs- bzw. Zwängungsspannungen im Stegblech des Zugstabes, die sich traglaststeigernd aus-

wirken. Dieser Effekt und somit auch der Kraftfluss im Anschlusspunkt hängen in starkem Maße von der Anschlussblechgeometrie und dem sich einstellenden Versagensmechanismus ab. In diesem Zusammenhang können die Anschlussblechformen in drei Bereiche eingeteilt werden, die in Tabelle 10.1 zusammengefasst werden. Der Intention dieser Einteilung besteht in der wirklichkeitsnahen Erfassung der Beanspruchungen und demzufolge in der exakten Ermittlung der Grenztraglast für alle auftretenden Versagensmechanismen.

Tabelle 10.1 Einteilung der Anschlussblechgeometrie

		Geometrische Randbedingungen	
		Rechteckige Anschlussbleche	Schräg abgeschnittene Anschlussbleche
1.	Schmale Anschlussbleche	$b \leq \frac{L_w}{2}$	$b \leq \frac{L_w}{3}$
2.	Mittelbreite Anschlussbleche	$\frac{L_w}{2} < b < L_w$	$\frac{L_w}{3} < b < \frac{3 \cdot L_w}{2}$
3.	Breite Anschlussbleche	$b \geq L_w$	$b \geq \frac{3 \cdot L_w}{2}$

Bei **unsymmetrischen Zugstabanschlüssen** wird gezeigt, dass der sich einstellende Kraftfluss zunächst von der minder tragfähigen Anschlussseite abhängt. Ist die Grenztragfähigkeit dieser Anschlussseite erreicht, bildet sich dort ein Fließgelenk und darüber hinaus gehende Beanspruchungen können ausschließlich von der noch tragfähigen Anschlussseite aufgenommen werden. Dabei ist zu beachten, dass der Versatz von der Systemlinie des Zugstabes bis zum Anschlussblech ebenfalls berücksichtigt werden muss.

Bei **Stabanschlüssen mit Biegebeanspruchung in der Ebene** ergeben sich im Anschlussbereich zwei unterschiedliche Kraftflüsse, die sich wie folgt unterscheiden:

- Bei dem ersten Kraftfluss wird das sich aus dem Moment ergebende vertikale Kräftepaar des Stabes durch das Stegblech in ein horizontales umgewandelt. Dieses wird an die beiden Anschlussseiten zu gleichen Teilen übertragen und im Knotenblech wiederum in ein vertikales Kräftepaar transformiert.
- Der zweite Kraftfluss stellt sich derart ein, dass das vertikale Kräftepaar als Schubkräfte an beide Anschlussseiten übertragen wird. Die Beanspruchungen im Knotenblech ergeben sich somit aus einer exzentrisch angreifenden Zug- bzw. Druckkraft.

Das Verhältnis zwischen beiden Kraftflüssen stellt sich in etwa im Verhältnis von der Stegdicke zur Anschlussblechdicke ein.

Für **Druckstäbe mit ausgeschnittenen Anschlussblechen** werden ebenfalls in Kapitel 5 Eigenwertuntersuchungen durchgeführt. Es stellt sich dabei heraus, dass die Eigenwerte der Druckstäbe in starkem Maße von der Anschlussgeometrie abhängen. Die Betrachtung als beidseitig gelenkig gelagerter Druckstab (Eulerfall II) kann nicht als Maßstab für die Stabilitätsgefahr herangezogen werden, da sie teilweise stark auf der unsicheren Seite liegt. Auf Grundlage von Parameterstudien werden mehrere Ersatzstabwerksmodellierungen zur Abschätzung der Verzweigungslast N_{Ki} des Druckstabes untersucht. Die Abschätzung der Verzweigungslast kann für das Nachweisverfahren mit Abminderungsfaktoren genutzt werden. Weitere Nachweisverfahren für eine sichere und wirtschaftliche Bemessung für Druckstäbe mit ausgeschnittenen Anschlussblechen existieren bislang nicht. Dabei sind das Ersatzimperfektionsverfahren und die Berechnungen nach der Fließzonentheorie vorrangig zu nennen, für die die destabilisierenden Einflüsse zu erfassen und daraus resultierend Ersatzimperfektionen festzulegen sind. An dieser Stelle wird der ergänzende Forschungsbedarf hervorgehoben, derartige Stäbe mit den aktuell gültigen Berechnungsmethoden erfassen zu können.

In Kapitel 6 werden analog zu den Stabanschlüssen **Fachwerkknoten** untersucht. Das Tragverhalten wird dabei mit Hilfe der Versagensmechanismen und den sich einstellenden Kraftflüssen aufgezeigt. Im Vergleich zu den Stabanschlüssen in Kapitel 5 ergeben sich deutlich mehr mögliche Versagenszustände, die die Anschluss Tragfähigkeit charakterisieren und die beachtet werden müssen. Es zeigt sich, dass die bereits gewonnenen Erkenntnisse zu dem Kraftfluss bei Stabanschlüssen hier übernommen werden können.

Aus der **Eigenwertanalyse eines ausgewählten Fachwerks** ergeben sich Verzweigungslasten, die wie bei den Druckstäben abhängig sind von der Ausbildung der Knoten. Mit der anschließenden Parameterstudie wird aufgezeigt, dass die Dicken des Stegblechs und des Knotenblechs sowie der vertikale Abstand vom Gurtstab bis zur Diagonalen die wesentlichen Einflussparameter sind. Daraus lassen sich Grenzbedingungen erarbeiten, die bei der Konstruktion von Fachwerkknoten einzuhalten sind, um eine lokale Stabilitätsgefahr des Anschlusses auszuschließen. Auch bei diesen Untersuchungen wird deutlich, dass die vorhandenen Berechnungsverfahren zur Stabilitätsuntersuchung anzupassen und zu erweitern sind.

Die Erkenntnisse aus den Kapiteln 5 und 6 fließen bei der Entwicklung der Bemessungsverfahren ein, die in den Kapiteln 7 und 8 vorgestellt werden. Dabei können die Tragfähigkeiten der einzelnen Versagenszustände berechnet werden. Die Beanspruchungen ergeben sich jeweils aus dem **Kräftegleichgewicht** und dem **Kraftfluss im Anschlussbereich**. Darüber hinaus werden Konstruktionsempfehlungen sowie Mindest- und Maximalabmessungen für baupraktische Anwendungen gegeben und die Vorgehensweisen zur Ermittlung der Traglasten systematisch dargestellt.

Anhand von Berechnungsbeispielen werden in Kapitel 9 die Vorgehensweisen zur Ermittlung der Traglasten verdeutlicht. Darüber hinaus werden die vorhandenen Modelle und das hier vorgestellte Berechnungsverfahren mit den Ergebnissen der FEM

verglichen. Als Ergebnis zeigt sich, dass die vorhandenen Modelle zu teilweise sehr auf der sicheren Seite liegenden aber auch teilweise zu übergroßen, d.h. unsicheren, Traglasten führen. Im Gegensatz dazu liefert das in dieser Arbeit entwickelte Bemessungsverfahren zuverlässige Ergebnisse und kann außerdem bisher nicht erfasste Versagensmechanismen berücksichtigen. Vergleiche und statistische Auswertungen zu Versuchen und FEM-Berechnungen sichern das Verfahren zusätzlich ab.

Ein weiterer bedeutsamer Vorteil des in dieser Arbeit vorgestellten Verfahrens liegt darin, dass aufgrund der detailliert dargelegten Erkenntnisse in den Kapiteln 5 und 6, Übertragungen auf andere Problemstellungen unmittelbar möglich sind und das Verfahren entsprechend erweitert bzw. angepasst werden kann.