

10 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Tragfähigkeit von Stäben mit Biegung und Torsion. Das nichtlineare Tragverhalten und die Stabilitätsgefährdung stehen dabei im Vordergrund. Verschiedene Versagenskriterien werden festgestellt und Stäben in Abhängigkeit von der Querschnittsgeometrie und der Länge zugeordnet. Maßgebliche Einflussfaktoren werden herausgearbeitet und beurteilt. Vorhandene Nachweismethoden werden dargestellt und hinsichtlich ihrer Eignung für biegedrillknickgefährdete Stäbe beurteilt. Die genauen Grenztragfähigkeiten werden ermittelt und daraus für die vereinfachten Nachweismethoden Abminderungsfaktoren und geometrische Ersatzimperfectionen bestimmt.

In der Bemessungspraxis spielen die **vereinfachten Nachweismethoden** eine große Rolle. Aufgrund ihres geringen Aufwands und der einfachen Handhabung bieten sie für baupraktisch relevante Systeme die Möglichkeit einer sicheren Nachweisführung. Das **Ersatzimperfectionsverfahren** mit direkter Anwendung der Theorie II. Ordnung und anschließendem Nachweis der Querschnittstragfähigkeit findet immer mehr Verbreitung, weil entsprechende EDV-Programme zur Schnittgrößenermittlung zur Verfügung stehen. Die **Nachweise mit Abminderungsfaktoren** spielen traditionell eine große Rolle, weil sie eine Schnittgrößenermittlung nach Theorie I. Ordnung vorsehen und dadurch besonders für eine Handrechnung geeignet sind. Die nichtlinearen Tragphänomene werden berücksichtigt, indem bei den Nachweisen mit Abminderungsfaktoren das plastische Grenzbiegemoment reduziert wird und beim Ersatzimperfectionsverfahren geometrische Ersatzimperfectionen angesetzt werden. In **Kapitel 2** werden die vereinfachten Nachweismethoden der DIN 18800-2 [13] und DIN EN 1993-1-1 [17] zusammengefasst und miteinander verglichen. Erste Anhaltspunkte über die Tauglichkeit der vereinfachten Nachweismethoden werden dabei herausgefunden. Der Vergleich der Nachweise mit Abminderungsfaktoren zeigt, dass es je nach Profil- und Querschnittsgeometrie zu **Unterschieden zwischen den Abminderungsfaktoren von über 20 %** kommt. Für einen Nachweis mit dem Ersatzimperfectionsverfahren wird in [13] eine Begrenzung des plastischen Formbeiwertes gefordert, auf die in [17] verzichtet wird. Die Größe der geometrischen Ersatzimperfectionen ist allerdings gleich, so dass hier Klärungsbedarf besteht.

Für einen sicheren Umgang mit vereinfachten Nachweisverfahren und -methoden sind die Kenntnis genauer Grenztragfähigkeiten und nichtlinearer Tragphänomene von großer Bedeutung. Die genaue Erfassung des Tragverhaltens und der Tragfähigkeit ist zum einen mithilfe von **Versuchen** möglich. Zum anderen kann durch eine geometrisch und physikalisch nichtlineare Berechnung nach der **Fließzonen-theorie** die genaue Traglast ermittelt werden. Das nichtlineare Materialverhalten von Stahl wird sowohl bei der Ermittlung der Querschnittstragfähigkeit als auch bei der Berechnung der Zustandsgrößen berücksichtigt. Die Anwendung der Fließzonen-theorie bedingt neben weit reichender Erfahrung einen sehr großen numerischen Aufwand, der nur mithilfe entsprechender FEM-Programme wie z. B. [23], [24] oder [140] möglich ist. **Kapitel 3** legt die Methoden zur Ermittlung der Grenztragfähigkeit

mittels Versuch und Fließzonenberechnung dar. Auf die Berechnungsgrundlagen und –annahmen der Fließzonentheorie, mit deren Hilfe die Grenztragfähigkeiten in den Kapiteln 4, 5 und 6 ermittelt werden, wird detailliert eingegangen.

Neben der genauen Kenntnis der Grenztragfähigkeit, die in Kapitel 6 ermittelt wird, sind das Tragverhalten und die maßgeblichen Versagenskriterien biegedrillknickgefährdeter Stäbe von großem Interesse. In **Kapitel 4** werden beispielhaft an dem Profil HEA 200 fünf verschiedene Traglasteffekte gezeigt und analysiert:

- **Erreichen der Querschnittstragfähigkeit am Auflager**
- **Erreichen der Querschnittstragfähigkeit in Feldmitte bzw. im Feldbereich**
- **Eigenwertversagen des teilplastizierten Systems**
- **Begrenzung der Verdrehung auf $\vartheta \leq 0,3$ rad**
- **Begrenzung der Grenzlast auf die Verzweigungslast $q_z \leq q_{ki,z}$**

Neben der Stablänge hat die Profilgeometrie einen entscheidenden Einfluss auf das Tragverhalten. Aus diesem Grund werden in **Kapitel 5** zwei hinsichtlich ihrer Profilgeometrie unterschiedliche Profile gegenübergestellt und die Einflussnahme grundlegender Systemparameter beurteilt. Es wird festgestellt, dass neben der **Querschnittsgeometrie** und der **Stablänge** auch der **Momentenverlauf** und insbesondere bei Profilen mit einem großen h/b-Verhältnis die **Eigenspannungen** einen nicht vernachlässigbaren Einfluss auf die Grenztragfähigkeit haben. Der **Lastangriffspunkt** sowie die Berücksichtigung von **Trägerüberständen** und variierende **Vorverformungen** beeinflussen die Grenztragfähigkeit dagegen nur in unbedeutender Weise. Zudem hat sich bestätigt, dass **der bezogene Schlankheitsgrad $\bar{\lambda}_M$ ein signifikanter Parameter zur Erfassung der Stabilitätsgefahr von Stäben ist.**

Die **exakten Grenztragfähigkeiten** aus der nichtlinearen Berechnung nach der Fließzonentheorie sind in **Kapitel 6** zusammengestellt. Die bezogenen Grenzlasten sind neben der Stablänge in erheblichem Ausmaß von der Querschnittsgeometrie abhängig. In Abhängigkeit vom Verhältnis der Trägheitsmomente I_y und I_T können bis zu **35 % Unterschied für gleiche bezogene Schlankheitsgrade** festgestellt werden. Bei Nachweisen mit Abminderungsfaktoren muss die Stabilitätsgefahr ab $\bar{\lambda}_M = 0,4$ überprüft werden. Bei kurzen Trägern wird die Querschnittstragfähigkeit am Auflager maßgebend. Nach Theorie I. Ordnung kann iterativ diejenige Stablänge bzw. der zugehörige bezogene Schlankheitsgrad ermittelt werden, bei dem nicht mehr die Tragfähigkeit am Auflager, sondern das Erreichen der Querschnittsausnutzung in Feldmitte maßgebend wird. Dies ist anhand eines Beispiels gezeigt worden und die Stablängen und bezogenen Schlankheitsgrade näherungsweise abhängig von Profil, Lastfall und Lastangriffspunkt bestimmt worden. Bereits in Kapitel 5 konnte festgestellt werden, dass für Profile mit großem h/b-Verhältnis der Ansatz von Eigenspannungen einen deutlich größeren Einfluss auf die Grenztragfähigkeit hat als bei kompakten Profilen. Dieses konnte durch ausführliche Untersuchungen in diesem Kapitel bestätigt werden.

Der Vergleich der rechnerisch ermittelten Abminderungsfaktoren mit denen aus den bautechnischen Regelwerken in Kapitel 6 zeigt, dass die **Anwendung des κ_M -Verfahrens aus [13] bis zu 24 % auf der unsicheren Seite liegt**. Die Einteilung der Profile nach dem h/b -Verhältnis [17] und die Berechnung des χ_{LT} -Wertes in Abhängigkeit der europäischen Knickspannungslinien führt zu einem deutlich besseren Ergebnis. Um ungenutzte Traglastreserven zu aktivieren und Unsicherheiten zu beschränken, wird für Profile mit kleinem I_y/I_T -Verhältnis die zusätzliche Anwendung der **Knickspannungslinie a** und für Profile mit großem I_y/I_T -Verhältnis die modifizierte **Knickspannungslinie c-d** vorgeschlagen. Die Abweichungen können damit auf +3,21 % und -9,71 % beschränkt werden. **Kapitel 7** hat gezeigt, dass die κ_M -Werte zum Teil deutlich auf der unsicheren Seite liegen, die **χ_{LT} -Werte indessen zu guten Ergebnissen führen, die durch die vorgeschlagenen Modifikationen noch verbessert werden konnten**.

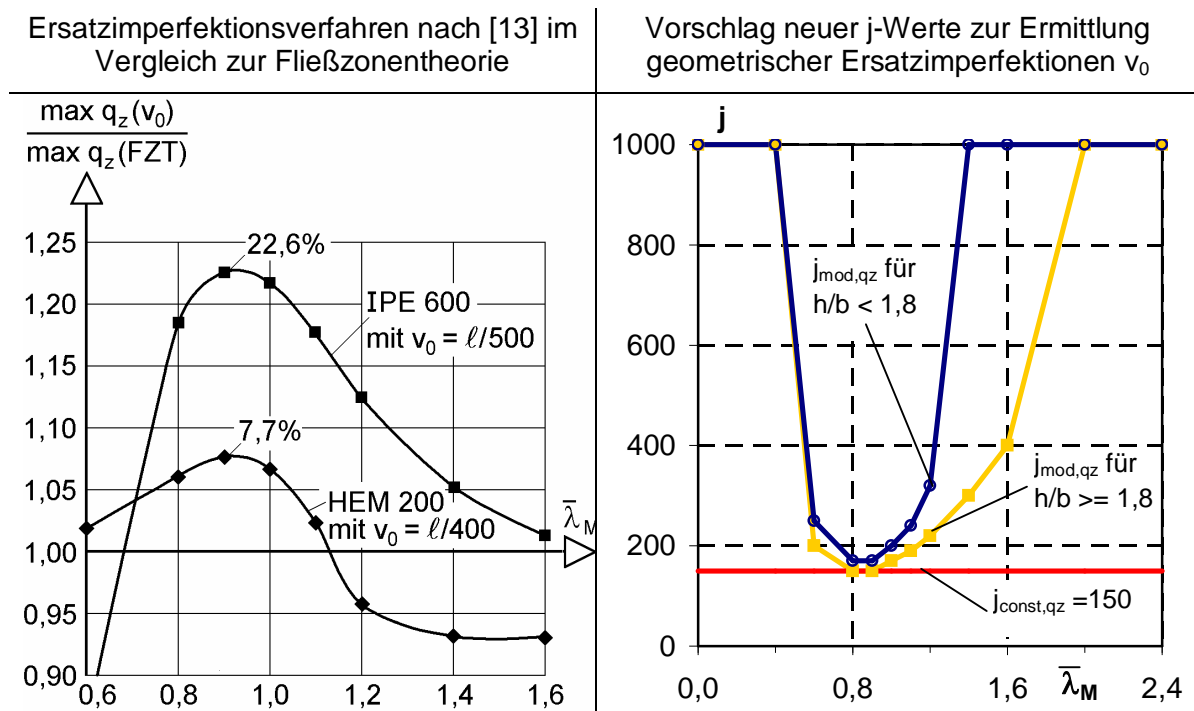
In **Kapitel 8** werden aus den rechnerisch ermittelten Grenzlasten die notwendigen **geometrischen Ersatzimperfektionen** für einen Nachweis nach Theorie II. Ordnung iterativ berechnet. Betrachtet werden die j -Werte, die sich aus der Vorverformung $v_{0,M} = L/j$ ergeben. Diese sind genauso wie die Abminderungsfaktoren von der Stablänge und der Profilgeometrie abhängig. **Die in [13] und [17] vorgeschlagenen geometrischen Ersatzimperfektionen sind für baupraktisch relevante Stablängen deutlich zu klein**. Zudem hat sich gezeigt, dass unabhängig von der Begrenzung des plastischen Formbeiwertes die Anwendung eines konstanten j -Wertes nicht den Auswertungsergebnissen entspricht.

In [120] wird die Biegedrillknickkurve nach DIN EN 1993-1-1 [17] hergeleitet. Dabei wird deutlich, dass die Empfehlung nach [17], nach der für Imperfektionen für den Biegedrillknicknachweis nur die Hälfte der Knickstabimperfektion und diese für Obergurt und Untergurt gleich anzunehmen ist, nur eine Näherung ist. Diese Aussage wird durch die in dieser Arbeit rechnerisch ermittelten j -Werte bestätigt. Aus diesem Grund werden für den Lastfall q_z und F_z **neue geometrische Ersatzimperfektionen** vorgeschlagen und ausgewertet. Der Ansatz eines **konstanten j_{const} -Wertes** ist für die Handhabung zwar einfacher, weil er ohne die Kenntnis des bezogenen Schlankheitsgrades angewendet werden kann. Allerdings führt dies dazu, dass insbesondere bei Stäben mit einem bezogenen Schlankheitsgrad $\bar{\lambda}_M \geq 1,2$ sehr große Traglastreserven ungenutzt bleiben. Es wird aus diesem Grund die Anwendung der **abgestuften $j_{mod,qz}$ -Werte** nach Tabelle 8.12 und Tabelle 10.1 empfohlen. Damit nimmt man für den Lastfall q_z **lediglich eine Unsicherheit von 3,3 % und ungenutzte Traglastreserven von 7,2 %** in Kauf. In Kapitel 8 konnte zudem festgestellt werden, dass für den Lastfall F_z größere j -Werte nach Tabelle 8.16 ausreichend sind. Auch hier ist der Ansatz der **abgestuften $j_{mod,Fz}$ -Werte** bei schlanken Stäben sinnvoll. Für Stäbe mit $\bar{\lambda}_M < 1,6$ liegen die Abweichungen lediglich zwischen **+2,6 % und -1,8 %**.

Es ist zu erwähnen, dass **die in dieser Arbeit ermittelten Ergebnisse bezüglich der j -Werte für einen Nachweis mit dem Ersatzimperfektionsnachweis in die neue Ausgabe der DIN 18800-2 (2008-11) [12] eingeflossen sind**. Danach darf beim

Biegedrillknicken nur noch eingeschränkt die Hälfte der Vorkrümmung für das Biegeknicken angesetzt werden. Die Halbierung der Vorkrümmung gilt nicht mehr für Bauteile mit doppelsymmetrischen Querschnitt mit $h/b > 2$ für $0,7 \leq \bar{\lambda}_M \leq 1,3$.

Tabelle 10.1 Unsicherheiten mit dem Ersatzimperfektionsverfahren nach [13] und Vorschlag neuer j-Werte



Das **Tragverhalten und Traglastphänomene von Stäben mit Biegung und planmäßiger Torsion** stehen in **Kapitel 9** im Vordergrund. Bei Stäben mit einer kleinen Stabkennzahl für Torsion ε_T hat das Wölbbmoment M_ω einen maßgeblichen Einfluss auf das Tragverhalten. Dabei wird die **große Bedeutung der richtigen Erfassung aller auftretenden Schnittgrößen** bei der Ermittlung der Querschnittstragfähigkeit deutlich. Für die in Kapitel 5 vorgestellten Fälle wird zudem die Entwicklung der rechnerisch ermittelten geometrischen Ersatzimperfektionen mit zunehmendem Torsions Einfluss untersucht. Bei Profilen mit großem ε_T und überwiegendem Biegemoment nehmen die j_{cal} -Werte geringfügig ab, bei Profilen mit kleinem ε_T und stark anwachsendem M_ω werden die notwendigen j_{cal} -Werte größer. Für diese Fälle konnte festgestellt werden, dass eine Begrenzung des plastischen Formbeiwertes zu falschen und sinnlosen Ergebnissen führt. Die in Kapitel 8 vorgeschlagenen j-Werte für den Lastfall q_z sind für Stäbe mit Biegung und planmäßiger Torsion angesetzt und ausgewertet worden. Die konstanten j_{const} führen zu guten Ergebnissen, die allerdings zum Großteil auf der sicheren Seite liegen. Mit dem Ansatz von j_{mod} muss eine maximale Unsicherheit von 5 % in Kauf genommen werden. Da die Auswertung nur für einen Lastfall erfolgt ist, kann kein endgültiger Schluss gezogen werden. Eine weitere Differenzierung bzgl. der Querschnittseinteilung und der Verhältnismäßigkeit von Torsions- und Biegeeinfluss sowie **Alternativen zur geometrischen Ersatzimperfektion v_0** für das Ersatzimperfektionsverfahren erscheint für Träger mit planmäßiger Torsion sinnvoll.