

7 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Ermittlung der Tragfähigkeit von Stäben aus Baustahl unter Berücksichtigung des nichtlinearen Tragverhaltens und von Stabilitätseinflüssen. Darüber hinaus werden Nachweisverfahren und -methoden hinsichtlich ihrer Eignung zur Erfassung des Tragverhaltens und der sicheren Ermittlung der Tragfähigkeit untersucht. Für das Biegeknicken gewalzter I-Profile unter planmäßiger Druckbeanspruchung werden genaue Grenztragfähigkeiten für unterschiedliche Stahlgüten ermittelt und davon ausgehend geometrische Ersatzimperfektionen abgeleitet sowie Abminderungsfaktoren κ festgelegt.

Das geometrisch und physikalisch nichtlineare Tragverhalten von Stäben aus Baustahl wird in Kapitel 2 anhand theoretischer und experimenteller Untersuchungen eingehend analysiert. Es wird gezeigt, dass das **Eigenwertversagen des teilplastizierten Systems** in vielen Fällen die Versagensursache darstellt, wenn der Querschnitt ganz oder teilweise durch Druckspannungen beansprucht ist. Durch das nichtlineare Werkstoffverhalten von Stahl kommt es nach Überschreiten der Fließdehnungen zur Ausbreitung von Fließzonen im Stab. Die damit einhergehende Reduktion der Steifigkeit führt auch zu einer Verringerung der kritischen Last des Systems. Sinkt diese so weit ab, dass sie gleich der aufgebrachten Belastung ist, so kommt es zum instabilen Versagen des teilplastizierten Systems bevor an irgendeiner Stelle die plastische Querschnittstragfähigkeit ausgenutzt ist. Bei geringer Stabilitätsgefahr wird dagegen das **Querschnittversagen** als maßgeblicher Versagenszustand erreicht. D. h. die plastische Querschnittstragfähigkeit kann zu 100 % ausgenutzt werden und statisch bestimmte Systeme werden aufgrund dessen kinematisch.

Die Untersuchungen in Kapitel 2 beschränken sich nicht nur auf die Stabilitätsfälle **Biegeknicken** und **Biegedrillknicken** sondern behandeln auch Stäbe mit **planmäßiger Torsionsbeanspruchung**. Bei Stäben mit offenen Querschnitten ergibt sich in der Regel die Besonderheit, dass sie hinsichtlich der Torsionsbeanspruchung statisch unbestimmt sind, auch wenn es sich ansonsten um statisch bestimmte Systeme handelt, denn die Abtragung der Torsionsbeanspruchung erfolgt gemischt durch die Wölbkrafttorsion und die *St. Venantsche* Torsion. Daraus ergeben sich zum Teil deutliche Tragreserven, weil von der Wölbkrafttorsion in die *St. Venantsche* Torsion umgelagert werden kann, sobald sich die Steifigkeiten durch die Ausbreitung von Fließzonen entsprechend verändert haben. Bei kombinierten Beanspruchungen aus Biegung und Torsion kann das Eigenwertversagen diese Umlagerung verhindern.

Die sichere und möglichst genaue Ermittlung der Grenztragfähigkeit von Stäben unter Berücksichtigung der nichtlinearen Tragphänomene ist das Ziel von **Nachweisverfahren und -methoden**. Die genaueste Erfassung des Tragverhaltens und der Tragfähigkeit ermöglicht eine geometrisch und physikalisch nichtlineare Berechnung nach der **Fließzonentheorie**. Eine Bemessung mit dieser Methode ist dem Verfahren Plastisch-Plastisch zuzuordnen, weil das nichtlineare Materialverhalten von Stahl sowohl bei der Ermittlung der Querschnittstragfähigkeit als auch bei der Berechnung der Zustandsgrößen berücksichtigt wird. Die sichere

Anwendung der Fließzonentheorie setzt weit reichende Erfahrung voraus und ist wegen des numerischen Aufwandes nur mit Hilfe entsprechender FE-Programme möglich (z. B. [24], [25] oder [128]). Aus diesem Grund werden in Kapitel 4 die Grundlagen des Verfahrens erläutert und Hinweise zur Verwendung von FE-Programmen gegeben. Dabei wird auch auf Unterschiede eingegangen, die sich aus der unterschiedlichen Erfassung der geometrischen Nichtlinearität bei der Theorie II. Ordnung und der Theorie großer Verformungen ergeben. Dies ist vor allem für Stäbe mit planmäßiger Torsionsbeanspruchung von Bedeutung. Die Ausführungen in Kapitel 4 enthalten zudem Erläuterungen zu Imperfektionsannahmen, die für eine Bemessung erforderlich sind. Dabei hat sich gezeigt, dass der Kenntnisstand zu Walzeigenspannungen noch nicht ausreichend ist, insbesondere was Profile aus S 355 betrifft.

Von großer Bedeutung für die Bemessungspraxis sind **vereinfachte Nachweisverfahren** die mit einem geringeren Aufwand als die Fließzonentheorie eine sichere und genaue Bemessung für baupraktisch relevante Anwendungsfälle ermöglichen. Sowohl die **κ -Verfahren** als auch das **Ersatzimperfektionsverfahren** mit direkter Anwendung der Theorie II. Ordnung sind solche vereinfachten Verfahren. Die κ -Verfahren spielen traditionell eine große Rolle, weil sie eine Schnittgrößenermittlung nach Theorie I. Ordnung vorsehen und dadurch besonders für eine Handrechnung geeignet sind. Die direkte Anwendung der Theorie II. Ordnung mit Ansatz geometrischer Ersatzimperfektionen und separatem Nachweis der Querschnittstragfähigkeit findet aber immer mehr Verbreitung, weil entsprechende EDV-Programme zur Schnittgrößenermittlung zur Verfügung stehen und diese, als Ersatzimperfektionsverfahren bezeichnete Vorgehensweise gegenüber den κ -Verfahren eine Reihe von Vorzügen bietet. Dazu gehört vor allem, dass das geometrisch nichtlineare Tragverhalten bei der Anwendung der Methode erkennbar wird. In Kapitel 3 werden die beiden genannten Verfahren explizit vorgestellt, wobei auch auf die einzelnen Vor- und Nachteile eingegangen wird.

Zusammen mit Kapitel 4 bilden diese Ausführungen die Grundlage für die Untersuchungen in den Kapiteln 5 und 6. Darin geht es um den Nachweis der Tragsicherheit beim **Biegeknicken von gewalzten I-Profilen unter planmäßiger Druckbeanspruchung**. Zunächst werden in Kapitel 5 für unterschiedliche Profile, Eigenspannungen, statische Systeme und Stahlgüten die bezogenen Grenzlasten $\kappa = N_u/N_{pl}$ durch Berechnungen nach der Fließzonentheorie ermittelt und dadurch der Einfluss der genannten Parameter auf die Tragfähigkeit und das Tragverhalten geklärt. Als Resultat werden sowohl für S 235 als auch für S 355 **genaue κ -Werte** angegeben, die zum Teil eine deutlich wirtschaftlichere Bemessung als bisher ermöglichen. Um die Werte auch mit der analytischen Formulierung der bekannten Knickspannungslinien nutzen zu können, wird eine neue Knickspannungslinie *ab* ($\alpha = 0,26$) vorgeschlagen und eine modifizierte Zuordnung zu den Knickspannungslinien vorgenommen. Die Zuordnung wird hier noch einmal in Tabelle 7.1 angegeben. Bei Verwendung der neuen Knickspannungslinie *ab* ergeben sich für S 235 bis zu 6,6 % höhere Grenzlasten als mit der bisher gültigen Linie *b*. Für S 355 liegen die maximalen Erhöhungen der Grenzlasten durch die neu zugeordneten Knickspannungslinien zwischen 6,6 und 11,5 %. Die genaueste Bemessung wird in

jedem Fall mit den rechnerischen κ -Werten nach Tabelle 5.10 erreicht, da die analytischen Formulierungen der Knickspannungslinien in der Regel etwas unterhalb dieser Werte liegen (für Eulerfall 2 maximal 5 %, s. Tabelle 5.12).

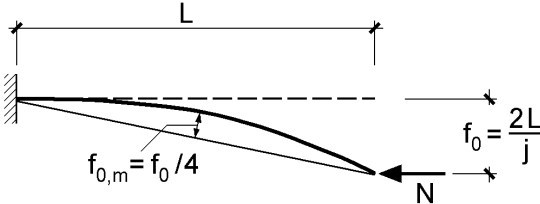
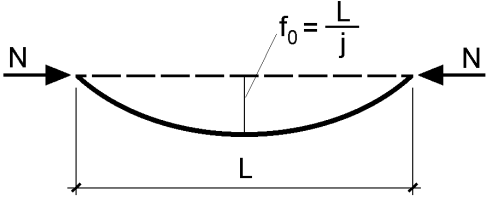
Tabelle 7.1 Zuordnung von Knickspannungslinien für den Biegeknicknachweis gewalzter I-Profile mit dem κ -Verfahren

	starke Achse		schwache Achse	
	$h/b > 1,2$	$h/b \leq 1,2$	$h/b > 1,2$	$h/b \leq 1,2$
S 235	a	ab ¹⁾	b	c
S 355	a ₀	a	ab ¹⁾	b
DIN 18800-2 (zum Vergleich)	a	b	b	c
1) Knickspannungslinie „ab“ mit $\alpha = 0,26$.				

Ausgehend von den rechnerischen κ -Werten werden in Kapitel 6 **geometrische Ersatzimperfektionen** abgeleitet, die bei der Anwendung des Ersatzimperfektionsverfahrens mit Schnittgrößenermittlung nach Theorie II. Ordnung zum Nachweis der Tragsicherheit anzusetzen sind. Die analytische Lösung für den Eulerfall 2 zeigt, dass die geometrischen Ersatzimperfektionen von der bezogenen Schlankheit $\bar{\lambda}_K$, dem Stegflächenanteil δ sowie der Streckgrenze f_y abhängig sind. Durch Auswertungen für den relevanten Parameterbereich werden sowohl die genauen Vorkrümmungen für die starke und schwache Achse ermittelt als auch die Grenzlastunterschiede festgestellt, die sich mit den gültigen Regelungen nach [14] und [16] ergeben. Für die starke Achse sind die festgelegten Werte deutlich zu konservativ, weil die damit errechneten Grenzlasten bis zu 12 % unterhalb der wirklichen Grenzlasten liegen. Aus diesem Grund werden neben den genauen Werten in Abhängigkeit von $\bar{\lambda}_K$ auch neue Festwerte vorgeschlagen, die hier noch einmal in Tabelle 7.2 angegeben sind. Mit den neuen Werten kann die maximale Abweichung um fast 10 Prozentpunkte auf 2,5 % gesenkt werden. Für die schwache Achse ergibt sich die Schwierigkeit, dass die Grenzlastunterschiede sehr stark in Abhängigkeit von der bezogenen Schlankheit variieren. Daher wird neben den festen Werten auch eine Reduktionsmöglichkeit in Abhängigkeit von $\bar{\lambda}_K$ vorgeschlagen, durch die die Abweichungen erheblich verringert werden. Eine wichtige Ergänzung für die schwache Achse ist außerdem die Festlegung von Werten, mit denen auf die bisher erforderliche Begrenzung von M_{pl} verzichtet werden kann. Dies stellt besonders für computerorientierte Berechnungen einen erheblichen Vorteil dar.

Zum Abschluss der Untersuchungen in Kapitel 6 wird die Anwendbarkeit der neuen Regeln für S 355 überprüft. Aufgrund der genauen κ -Werte, die für S 355 größer sind als für S 235, können die Werte nach Tabelle 7.2 auch für S 355 verwendet werden.

Tabelle 7.2 Zum Ansatz geometrischer Ersatzimperfektionen für den Biegeknicknachweis gewalzter I-Profile nach dem Ersatzimperfektionsverfahren (E-P)

	j			
	Vorschlag		DIN 18800-2 (zum Vergleich)	
	h/b > 1,2	h/b ≤ 1,2	h/b > 1,2	h/b ≤ 1,2
starke Achse	500	400	300	250
schwache Achse mit $M_{pl,red}$	250	200	250	200
schwache Achse mit M_{pl}	200	150	keine Angaben	
<p>Verbesserungsmöglichkeit für die schwache Achse und $\bar{\lambda}_K > 0,8$:</p> $j_{mod} = \begin{cases} j + 200 \cdot \frac{\bar{\lambda}_K}{2,4} & \text{für } 0,8 < \bar{\lambda}_K < 3,2 \\ j + 200 & \text{für } \bar{\lambda}_K \geq 3,2 \end{cases}$				
<p>Eulerfall 1</p>  <p>quadratische Parabel oder sin-Halbwellen</p> <p>alternativ: skalierte Eigenform</p>		<p>Eulerfälle 2 bis 4</p>  <p>quadratische Parabel oder sin-Halbwellen</p>		