

Schriftenreihe des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau

Herausgeber:  
Geschäftsführender Direktor des  
Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau  
Ruhr-Universität Bochum

Heft 2016-2

**Manfred Käsmaier**

**Tragverhalten und Tragfähigkeiten von  
stabilitätsgefährdeten Trägern und Stützen  
bei kombinierter Beanspruchung**

Shaker Verlag  
Aachen 2016

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Bochum, Univ., Diss., 2015

Copyright Shaker Verlag 2016

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4176-7

ISSN 1614-4384

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2010 bis 2015 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für konstruktiven Ingenieurbau – Lehrstuhl für Stahl-, Holz- und Leichtbau, nachfolgend Lehrstuhl für Stahl-, Leicht- und Verbundbau – der Ruhr Universität Bochum. Sie wurde von der dortigen Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften als Dissertation anerkannt.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rolf Kindmann, ehemaliger Inhaber des Lehrstuhls für Stahl-, Leicht- und Verbundbau der Ruhr Universität Bochum, für die Betreuung und Förderung während der Entstehung dieser Arbeit sowie für die Übernahme des Referates.

Herrn Univ.-Prof. Dr. Markus Knobloch danke ich für die Übernahme des Koreferates sowie für sein Interesse an meiner Arbeit und die Unterstützung während der Erstellung.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Matthias Kraus danke ich herzlich für die bereitwillige Übernahme des dritten Referates.

Weiterhin gilt mein Dank meinen Kolleginnen und Kollegen für die Diskussionsbereitschaft sowie für die gute Zusammenarbeit und die angenehme Zeit am Lehrstuhl. Ebenso bedanke ich mich bei meinen studentischen Hilfskräften für deren Einsatz. Besonders bedanke ich mich bei Frau Dr.-Ing Rebekka Ebel für die wertvollen Anregungen und ihre Unterstützung.

Nicht zuletzt danke ich meinen Eltern für deren weltoffene Erziehung und liebevolle Unterstützung.

Bochum im November 2015

Manfred Käsmaier

Doktorarbeit eingereicht am: 25.08.2015

Tag der mündlichen Prüfung: 30.10.2015

Berichter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rolf Kindmann

Univ.-Prof. Dr. Markus Knobloch

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Matthias Kraus

## Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit werden das Tragverhalten von stabilitätsgefährdeten Trägern und Stützen untersucht sowie ein Bemessungsvorschlag für den Nachweis mit Abminderungsfaktoren unter Berücksichtigung der Schnittgrößen nach Theorie II. Ordnung entwickelt. Es werden verschiedene Systeme mit doppelsymmetrischen I-Querschnitten sowie Hohlprofilen und unterschiedlichen Verläufen der Biegemomente untersucht.

Die Untersuchungen zum Tragverhalten erfolgen zum Biegeknicken und Biegedrillknicken infolge reiner Druckbeanspruchung sowie unter kombinierten Beanspruchungen durch die Schnittgrößen  $N$ ,  $M_y$  und  $M_z$ . Ein besonderer Fokus liegt auf dem unterschiedlichen Einfluss von Walz- und Schweißbeigenspannungen auf das Tragverhalten. Effekte, die zum Versagen führen, werden identifiziert. Die Tragfähigkeiten von geschweißten Profilen liegen für die häufigsten Fälle unter denen von gewalzten Profilen.

Mit dem Bemessungsvorschlag wird der aktuelle Nachweis mit Abminderungsfaktoren durch eine Verwendung von Schnittgrößen nach Theorie II. Ordnung weiterentwickelt. Erstmals werden das geometrisch nichtlineare Verhalten von räumlich belasteten Stäben und deren Auswirkungen in einem Nachweis mit Abminderungsfaktoren berücksichtigt. Der Bemessungsvorschlag und Varianten hierzu werden anhand von umfangreichen Fließzonenberechnungen für doppelsymmetrische I-Querschnitte und Hohlprofile validiert, sowie mit den Tragfähigkeiten der bestehenden europäischen Regelwerke und mit Versuchsergebnissen verglichen. Systemabhängige Streuungen werden ermittelt und quantifiziert. Für die baupraktisch häufigsten Anwendungsfälle liegen die Tragfähigkeiten überwiegend bei 90 % der Tragfähigkeiten aus den Fließzonenberechnungen. Die Anwendbarkeit des Bemessungsvorschlages wird anhand von baupraktischen Beispielen aufgezeigt.

Mit den Bemessungsvorschlägen wird die Nachweisführung mit Abminderungsfaktoren bei vielen Anwendungsfällen stark verkürzt. Die Arbeit liefert grundlegende Erkenntnisse zur Erweiterung des Stabilitätsnachweises mit Abminderungsfaktoren für Biegeknicken und Biegedrillknicken bei planmäßig torsionsbeanspruchten Stäben.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung und Zielsetzung	1
1.2	Stand der Forschung	3
1.3	Bezeichnungen	7
1.4	Annahmen	10
1.4.1	Grundlegende Annahmen	10
1.4.2	Materialgesetz für Stahl	10
1.4.3	Theorie II. Ordnung und virtuelle Arbeit	10
1.4.4	Berechnungen nach der Methode der Finiten-Elemente	12
<b>2</b>	<b>Nachweise für Stäbe im Stahlbau</b>	<b>13</b>
2.1	Allgemeines	13
2.2	Nachweise zur Querschnittstragfähigkeit	14
2.2.1	Allgemeines	14
2.2.2	Nachweis elastischer Querschnittstragfähigkeit	14
2.2.3	Nachweis plastischer Querschnittstragfähigkeit	15
2.3	Verfahren mit Abminderungsfaktoren	16
2.3.1	Nachweise	16
2.3.2	Biegeknickbeanspruchbarkeit	17
2.3.3	Biegedrillknickbeanspruchbarkeit	18
2.3.4	Interaktionsfaktoren für kombinierte Beanspruchungen	20
2.4	Verfahren mit Ersatzimperfektionen	26
2.5	Allgemeines Verfahren zum Biege- und Biegedrillknicken	27
2.6	Berechnungen mit Anwendung der Fließzonentheorie	28
2.6.1	Allgemeines	28
2.6.2	Werkstoffeigenschaften	29
2.6.3	Geometrisch nichtlineare Berechnung	30
2.6.4	Geometrische Imperfektionen	31
2.6.5	Strukturelle Imperfektionen	32
2.6.6	Finite-Elemente-Methode	33
2.6.7	Hinweise zur den durchgeführten Fließzonenberechnungen	35
<b>3</b>	<b>Tragverhalten und Tragfähigkeiten von verdrehsteifen Stäben</b>	<b>38</b>
3.1	Allgemeines	38
3.2	Biegeknicken um die starke Achse infolge Drucknormalkraft	39
3.2.1	Allgemeines	39
3.2.2	Tragverhalten für I-Querschnitte ohne Eigenspannungen	40
3.2.3	Tragverhalten für I-Querschnitte mit Walzeigenspannungen	44

3.2.4	Tragverhalten für I-Querschnitte mit Schweißeigenspannungen	46
3.2.5	Zusammenfassung	52
3.3	Biegeknicken um schwache Achse infolge Drucknormalkraft	59
3.3.1	Allgemeines	59
3.3.2	Tragverhalten für I-Querschnitte ohne Eigenspannungen	59
3.3.3	Tragverhalten für I-Querschnitte mit Walzeigenspannungen	61
3.3.4	Tragverhalten für I-Querschnitte mit Schweißeigenspannungen	63
3.3.5	Zusammenfassung	67
3.4	Biegeknicken um die starke Achse infolge Drucknormalkraft und Biegemoment $M_y$	72
3.5	Biegeknicken um die schwache Achse infolge Drucknormalkraft und Biegemoment $M_z$	75
<b>4</b>	<b>Tragverhalten und Tragfähigkeiten von verdrehweichen Stäben</b>	<b>79</b>
4.1	Allgemeines	79
4.2	Biegedrillknicken infolge Biegemoment um die starke Achse	81
4.3	Biegedrillknicken infolge Biegemoment $M_y$ und Normalkraft	90
<b>5</b>	<b>Vergleich der aktuellen Nachweisverfahren mit Abminderungsfaktoren</b>	<b>97</b>
5.1	Allgemeines	97
5.2	Vergleich für verdrehsteife Bauteile	100
5.2.1	Allgemeines	100
5.2.2	Biegeknicken um die starke Achse infolge $N$ - $M_y$	100
5.2.3	Biegeknicken um die schwache Achse infolge $N$ - $M_z$	101
5.2.4	Biegeknicken um die starke oder schwache Achse infolge $N$ - $M_y$	102
5.2.5	Biegeknicken um die starke oder schwache Achse infolge $N$ - $M_y$ - $M_z$	104
5.3	Vergleich für verdrehweiche Bauteile	105
5.3.1	Allgemeines	105
5.3.2	Biegeknicken und Biegedrillknicken infolge $N$ und $M_y$	107
5.3.3	Biegeknicken und Biegedrillknicken infolge $N$ - $M_y$ - $M_z$	107
5.4	Zusammenfassung	109
<b>6</b>	<b>Nachweise mit Abminderungsfaktoren und Schnittgrößen nach Theorie II. Ordnung</b>	<b>111</b>
6.1	Allgemeines	111
6.2	Nachweise mit Schnittgrößen nach Theorie II. Ordnung	111
6.3	Herleitung der Nachweisgleichung für Biegeknicken	113
6.4	Interaktionsbeiwerte für Biegeknicken	117
6.4.1	Allgemeines	117
6.4.2	Einfluss der Biegemomentenbeanspruchung	119
6.4.3	Einfluss der Querschnittsform	119
6.4.4	Einfluss des bezogenen Schlankheitsgrades	120



---

6.4.5	Einfluss des Biegemomentenverlaufs	121
6.4.6	Fazit	122
6.5	Interaktionsbeiwerte für Biegedrillknicken	123
6.5.1	Allgemeines	123
6.5.2	Einfluss der Biegemomentenbeanspruchung	124
6.5.3	Einfluss der Querschnittsform	124
6.5.4	Einfluss des bezogenen Schlankheitsgrades	125
6.5.5	Einfluss des Biegemomentenverlaufs	125
6.5.6	Fazit	126
6.6	Vergleich mit numerischen Ergebnissen	127
6.6.1	Allgemeines	127
6.6.2	Biegeknicken infolge N-M	128
6.6.3	Biegeknicken und Biegedrillknicken	131
6.7	Erläuterungen zum Nachweis und Ausblick	134
6.7.1	Maßgebende Stelle zur Nachweisführung	134
6.7.2	Einfluss der Verdrehung	135
6.7.3	Nachweis mit ‚globalem‘ Verzweigungslastfaktor	136
6.8	Vergleich mit den Verfahren mit Abminderungsfaktoren in EN 1993-1-1	140
6.8.1	Allgemeines	140
6.8.2	Biegeknicken infolge N und M	140
6.8.3	Biegeknicken um die starke oder schwache Achse	142
6.8.4	Biegeknicken und Biegedrillknicken infolge N und $M_y$	143
6.8.5	Biegeknicken und Biegedrillknicken infolge N, $M_y$ , $M_z$	144
6.8.6	Querschnittsklasse 3	146
6.8.7	Hohlprofile	147
<b>7</b>	<b>Vergleich mit experimentellen Versuchsergebnissen</b>	<b>149</b>
7.1	Vorbemerkungen	149
7.2	Versuche an dickwandigen I-Profilen	149
7.3	Versuche am HEB 200 mit einachsiger Beanspruchung	151
7.4	Versuche am HEB 200 mit zweiachsiger Beanspruchung	152
7.5	Versuche an Stützen aus hochfesten Stählen	153
7.6	Versuche mit zweiachsiger Beanspruchung	156
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>161</b>
	<b>Anhang</b>	<b>165</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>171</b>