

Valentin Förster

Tragfähigkeit unbewehrter Mauerwerksdruckglieder bei zweiachsig exzentrischer Beanspruchung

DAfM Schriftenreihe Heft 2

- **Berechnungsmodell speziell auf Mauerwerksdruckglieder zugeschnitten**
- **neue Erkenntnisse, in Grafiken und Diagrammen anschaulich aufbereitet**
- **für die Bauwirtschaft als auch für die Wissenschaft bedeutsam**

Mauerwerkspfeiler/-wände sind Druckglieder, die primär dem vertikalen Lastabtrag dienen. Dabei ist die wirklichkeitsnahe Bestimmung der Tragfähigkeit unter Berücksichtigung der Schlankheit und unterschiedlicher Mauerwerksbaustoffe für die Tragwerksplanung von großer Bedeutung.

BESTELLEN

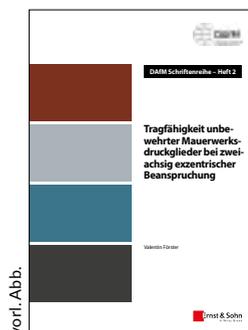
+49 (0)30 470 31-236

marketing@ernst-und-sohn.de

www.ernst-und-sohn.de/3324

WILEY

Ernst & Sohn
A Wiley Brand



vort. Abb.

7 / 2020 · ca. 174 Seiten ·
ca. 91 Abbildungen · ca. 12 Tabellen

Softcover

ISBN 978-3-433-03324-1 ca. € 59*

DAfM-Mitgliederkonditionen:

www.ernst-und-sohn.de/dafm

WILEY Ernst & Sohn
A Wiley Brand

ÜBER DAS BUCH

Druckglieder, wie Stützen und Wände, dienen primär zum vertikalen Lastabtrag und erfahren Biegemomente infolge der Verdrehungen angrenzender Bauteile wie Decken oder Unterzüge. Sofern Verdrehungen um zwei Achsen auftreten oder das Druckglied neben einer einachsigen Biegung um die schwache Achse als Teil des Aussteifungssystems durch horizontale Kräfte in Richtung der starken Achse beansprucht wird, wirken Biegemomente um zwei Achsen. Obwohl unbewehrte Druckglieder nennenswerte Biegemomente abtragen können, liegt für die Ermittlung der Tragfähigkeit bei schiefer Biegebeanspruchung kein adäquates Berechnungsverfahren vor.

Um die bestehenden Tragfähigkeitspotenziale unbewehrter Mauerwerksdruckglieder mit rechteckigem Querschnitt nutzen zu können, wird ein nichtlineares Berechnungsmodell zur wirklichkeitsnahen Bestimmung der Tragfähigkeit entwickelt und in ein praxisgerechtes Bemessungsverfahren überführt.

Grundlagen dafür sind systematisch aufeinander aufbauende Analysen zur Querschnittstragfähigkeit, -krümmung und Systemtragfähigkeit, wobei unterschiedliche Werkstoffverhalten ebenso berücksichtigt werden wie die Auswirkungen nach Theorie II. Ordnung für schlanke Druckglieder.

Mitglieder des Deutschen Ausschusses für Mauerwerk können die Publikationen aus der DAfM-Reihe zu speziellen Mitgliederkonditionen erwerben. Wenden Sie sich dazu an die DAfM.

BESTELLUNG

Anzahl	ISBN /	Titel	Preis
	978-3-433-03324-1	Tragfähigkeit unbewehrter Mauerwerksdruckglieder bei zweiachsig exzentrischer Beanspruchung	ca. € 59*

Privat

Geschäftlich

Bitte richten Sie Ihre Bestellung an:

Tel. +49 (0)30 47031-236

Fax +49 (0)30 47031-240

marketing@ernst-und-sohn.de

Firma _____

UST-ID Nr. _____

Name, Vorname _____

Telefon _____

Fax _____

Straße, Nr. _____

PLZ/Ort/Land _____

E-Mail _____

www.ernst-und-sohn.de/3324

Datum/Unterschrift _____

Vorwort

Mauerwerkspfeiler oder -wände sind Druckglieder, die infolge der Durchbiegung aufliegender Stahlbetondecken oder einer gegenüber der Wandachse exzentrischen Lasteinleitung neben der einwirkenden Normalkraft sehr häufig auch durch Biegung um die schwache Achse beansprucht sind. Ist das betrachtete Druckglied zudem Teil des Aussteifungssystems und erfährt somit eine zusätzliche Biegebeanspruchung um die starke Achse, so wirkt die Normalkraft zweiachsig exzentrisch (Doppelbiegung). Baupraktisch gesehen unterliegen viele der zur Gebäudeaussteifung notwendigen Wände und fast alle Mauerwerkspfeiler einer zweiachsig exzentrischen Druckbeanspruchung. Deshalb ist die wirklichkeitsnahe Bestimmung der Tragfähigkeit zweiachsig exzentrisch beanspruchter Mauerwerksdruckglieder unter Berücksichtigung des Einflusses der Schlankheit sowie der Mauerwerkeigenschaften von großer Bedeutung.

Die vorliegende Publikation ist eine speziell auf Mauerwerksdruckglieder zugeschnittene Fassung der Dissertation Förster (2018), welche die Thematik vollumfänglich behandelt. Sie liefert neue Erkenntnisse, die mittels aussagekräftiger Grafiken und Diagramme anschaulich aufbereitet werden. Die erzielten Forschungsergebnisse sind sowohl für die Bauwirtschaft als auch für die Wissenschaft von großer Bedeutung. Insbesondere für die in der Praxis tätigen Ingenieure stellt das Werk ein wertvolles Planungswerkzeug dar, weshalb der Forschungsbeirat des Deutschen Ausschusses für Mauerwerk (DAfM) e. V. die Herausgabe in seiner Schriftenreihe empfohlen hat.

Frankfurt am Main, April 2020

Autor
Dr.-Ing. Valentin Förster

Stellvertretend für den Forschungsbeirat des
Deutschen Ausschusses für Mauerwerk e. V.,
der Obmann
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner

Kurzfassung

Druckglieder, wie Stützen und Wände, dienen primär zum vertikalen Lastabtrag und erfahren Biegemomente infolge der Verdrehungen angrenzender Bauteile wie Decken oder Unterzüge. Sofern Verdrehungen um zwei Achsen auftreten oder das Druckglied neben einer einachsigen Biegung um die schwache Achse als Teil des Aussteifungssystems durch horizontale Kräfte in Richtung der starken Achse beansprucht wird, wirken Biegemomente um zwei Achsen. Obwohl unbewehrte Druckglieder nennenswerte Biegemomente abtragen können, liegt für die Ermittlung der Tragfähigkeit bei schiefer Biegebeanspruchung kein adäquates Berechnungsverfahren vor.

Um die bestehenden Tragfähigkeitspotenziale unbewehrter Mauerwerksdruckglieder mit rechteckigem Querschnitt nutzen zu können, wird ein nichtlineares Berechnungsmodell zur wirklichkeitsnahen Bestimmung der Tragfähigkeit entwickelt und in ein praxisgerechtes Bemessungsverfahren überführt. Grundlagen dafür sind systematisch aufeinander aufbauende Analysen zur Querschnittstragfähigkeit, -krümmung und Systemtragfähigkeit, wobei unterschiedliche Werkstoffverhalten ebenso berücksichtigt werden wie die Auswirkungen nach Theorie II. Ordnung für schlanke Druckglieder.

Abstract

Compression members, such as columns or walls, mainly have to carry vertical loads. In addition, they experience bending moments due to the rotation of adjacent components, such as slabs or beams. If rotations occur about two axes or the compression member is, in addition to a uniaxial bending moment about the weak axis, part of the bracing system and therefore loaded with horizontal forces in direction of the strong axis, bending moments about two axes arise. Although unreinforced compression members can resist considerable bending moments, an adequate calculation method for the determination of the load-carrying capacity in case of biaxial bending does not exist.

In order to use the existing load-carrying capabilities of unreinforced masonry compression members with a rectangular cross-section, a non-linear calculation model is developed for the realistic derivation of the load-carrying capacity and transferred into a design method for practical application. The model is based on systematic analyses of the load carrying capacity of the cross-section, the curvature and the load-carrying capacity of the system. Herein, different material behaviours are taken into account as well as the effects of second order theory for slender compression members.

Inhaltsverzeichnis

	Vorwort	<i>V</i>
	Kurzfassung/Abstract	<i>VII</i>
	Formelzeichen und Variablen	<i>XIII</i>
1	Einleitung	<i>1</i>
1.1	Problemstellung und Motivation	<i>1</i>
1.2	Zielsetzung	<i>2</i>
1.3	Vorgehensweise	<i>3</i>
2	Werkstoff Mauerwerk	<i>5</i>
2.1	Einführung	<i>5</i>
2.2	Ausgangsstoffe	<i>6</i>
2.2.1	Mauersteine	<i>6</i>
2.2.2	Mauermörtel	<i>7</i>
2.3	Tragverhalten	<i>8</i>
2.3.1	Druckbeanspruchung	<i>8</i>
2.3.2	Zug- und Biegezugbeanspruchung senkrecht zur Lagerfuge	<i>12</i>
2.4	Modellierung der einachsialen Spannungs-Dehnungs-Beziehung	<i>14</i>
2.4.1	Grundlagen	<i>14</i>
2.4.2	Normierte einachsiale Spannungs-Dehnungs-Beziehung	<i>14</i>
2.4.3	Werkstoffkennwerte	<i>16</i>
2.5	Zusammenfassung	<i>18</i>
3	Analyse ausgewählter Berechnungs- und Bemessungsverfahren	<i>19</i>
3.1	Einführung	<i>19</i>
3.2	Historische Entwicklung	<i>21</i>
3.2.1	Querschnittstragfähigkeit	<i>21</i>
3.2.2	Systemtragfähigkeit	<i>24</i>
3.3	Analyse ausgewählter Berechnungsverfahren	<i>26</i>
3.3.1	Grundlagen	<i>26</i>
3.3.2	Berechnungsverfahren für Druckglieder bei einachsiger Biegebeanspruchung	<i>26</i>
3.3.2.1	Haller und Kirtschig	<i>26</i>
3.3.2.2	Kordina & Quast und Bastgen	<i>28</i>
3.3.2.3	Glock	<i>30</i>
3.3.3	Berechnungsverfahren für Druckglieder bei zweiachsiger Biegebeanspruchung	<i>33</i>
3.3.3.1	Habel	<i>33</i>

3.3.3.2	Lau und Yang sowie Phipps, Swailes und Bell	34
3.3.3.3	Shi und Liu	35
3.3.3.4	Morton	37
3.3.3.5	Yu, Shi und Song	38
3.3.4	Vergleich der Berechnungsverfahren für Druckglieder bei zweiachsiger Biegebeanspruchung	40
3.4	Normative Bemessungsverfahren	41
3.4.1	Grundlagen	41
3.4.2	Europäische Norm EN 1996	42
3.4.3	Amerikanische Norm TMS 402/602	45
3.4.4	Kanadische Norm CSA S304.1	46
3.4.5	Australische Norm AS 3700	47
3.4.6	Vergleich normativer Bemessungsverfahren für Druckglieder bei zweiachsiger Biegebeanspruchung	48
3.5	Zusammenfassung	48
4	Nichtlineares Berechnungsmodell	51
4.1	Einführung	51
4.2	Querschnittstragfähigkeit	52
4.2.1	Grundlagen	52
4.2.2	Linear-elastisches Werkstoffverhalten	54
4.2.2.1	Allgemeines	54
4.2.2.2	Modellierung mit Begrenzung der Druckdehnung	54
4.2.2.3	Modellierung ohne Begrenzung der Druckdehnung	62
4.2.2.4	Analyse der Querschnittstragfähigkeit	64
4.2.3	Starr-plastisches Werkstoffverhalten	65
4.2.3.1	Allgemeines	65
4.2.3.2	Realitätsnähere Modellierung der Druckzone	66
4.2.3.3	Rechteckige Modellierung der Druckzone	70
4.2.3.4	Analyse der Querschnittstragfähigkeit	71
4.2.4	Nichtlineares Werkstoffverhalten	72
4.3	Querschnittskrümmung	75
4.3.1	Grundlagen	75
4.3.2	Linear-elastisches Werkstoffverhalten	76
4.3.2.1	Allgemeines	76
4.3.2.2	Fall I	77
4.3.2.3	Fall II	78
4.3.2.4	Fall III	79
4.3.2.5	Fall IV	80
4.3.2.6	Fall V	81
4.3.2.7	Analyse der Krümmung	82
4.3.3	Nichtlineares Werkstoffverhalten	84
4.4	Systemtragfähigkeit	85
4.4.1	Grundlagen	85
4.4.2	Linear-elastisches Werkstoffverhalten	89
4.4.2.1	Allgemeines	89
4.4.2.2	Fall I	92
4.4.2.3	Fall II	96

4.4.2.4	Fall III	97
4.4.2.5	Fall IV	99
4.4.2.6	Fall V	101
4.4.2.7	Iterative Ermittlung der Systemtragfähigkeit	103
4.4.2.8	Analyse der Systemtragfähigkeit	104
4.4.2.9	Sonderfall des linear-elastischen Werkstoffverhaltens mit betragsmäßig gleicher Druck- und Biegezugfestigkeit am Beispiel Stahl und Holz	109
4.4.3	Nichtlineares Werkstoffverhalten	111
4.4.4	Weitere mögliche Versagensmodi	115
4.4.4.1	Allgemeines	115
4.4.4.2	Versagen infolge von Biegedrillknicken	115
4.4.4.3	Querkraftversagen	117
4.4.4.4	Versagen infolge von horizontaler Last bei minimaler Normalkraft	118
4.5	Experimentelle Verifizierung	118
4.5.1	Grundlagen	118
4.5.2	Querschnittstragfähigkeit	119
4.5.3	Systemtragfähigkeit	124
4.6	Zusammenfassung	128
5	Nichtlineares Bemessungsverfahren	131
5.1	Einführung	131
5.2	Vorschlag eines nichtlinearen Bemessungsverfahrens	132
5.2.1	Grundlagen	132
5.2.2	Approximation der Systemtragfähigkeit	135
5.2.3	Verifizierung der Approximation der Systemtragfähigkeit	137
5.2.4	Modellbildung bei unterschiedlichen Exzentrizitäten an Kopf und Fuß	142
5.3	Berücksichtigung des semiprobabilistischen Teilsicherheitskonzepts	143
5.3.1	Grundlagen	143
5.3.2	Bemessungswert der Druckfestigkeit	144
5.3.3	Modifizierung des γ_R -Verfahrens	145
5.3.4	Überprüfung der normenkonformen Bemessung mit dem modifizierten γ_R -Verfahren	148
5.4	Nichtlineare Bemessung auf Basis normativer Verfahren	151
5.4.1	Grundlagen	151
5.4.2	Bemessung auf Basis von EN 1996-1-1	151
5.4.3	Bemessung auf Basis von EN 1996-1-1 in Verbindung mit DIN EN 1996-1-1/NA	153
5.4.4	Bemessung auf Basis von prEN 1996-1-1	155
5.5	Vorschlag zur direkten Ermittlung der Systemtragfähigkeit	155
5.6	Zusammenfassung	157
6	Resümee und Ausblick	159
7	Literaturverzeichnis	163

1

Einleitung

1.1 Problemstellung und Motivation

Stützen oder Wände sind Druckglieder, die primär dem vertikalen Lastabtrag dienen. Zudem werden Druckglieder infolge der Durchbiegungen angrenzender Bauteile, wie Decken oder Balken, durch Biegemomente beansprucht. Sofern Verdrehungen der angrenzenden Bauteile in zwei Richtungen auftreten oder das Druckglied Teil der Gebäudeaussteifung ist und zusätzlich zu einer Biegung um die schwache Achse somit auch Horizontalkräfte in Richtung der starken Achse erfährt, sind neben der vertikalen Normalkraft auch Biegemomente um zwei Achsen zu berücksichtigen. Diese schiefe Biegebeanspruchung kann durch eine zweiachsig exzentrisch wirkende Drucknormalkraft abgebildet werden. Auch zweiachsig exzentrisch eingeleitete Auflagerkräfte aus anderen Bauteilen oder unterschiedliche Spannweiten von zweiachsig gespannten Flachdecken können Biegemomente um zwei Achsen verursachen. Beispielhafte Beanspruchungen durch die Verformungen der angrenzenden Bauteile um die schwache und starke Achse sind in Bild 1.1 dargestellt.

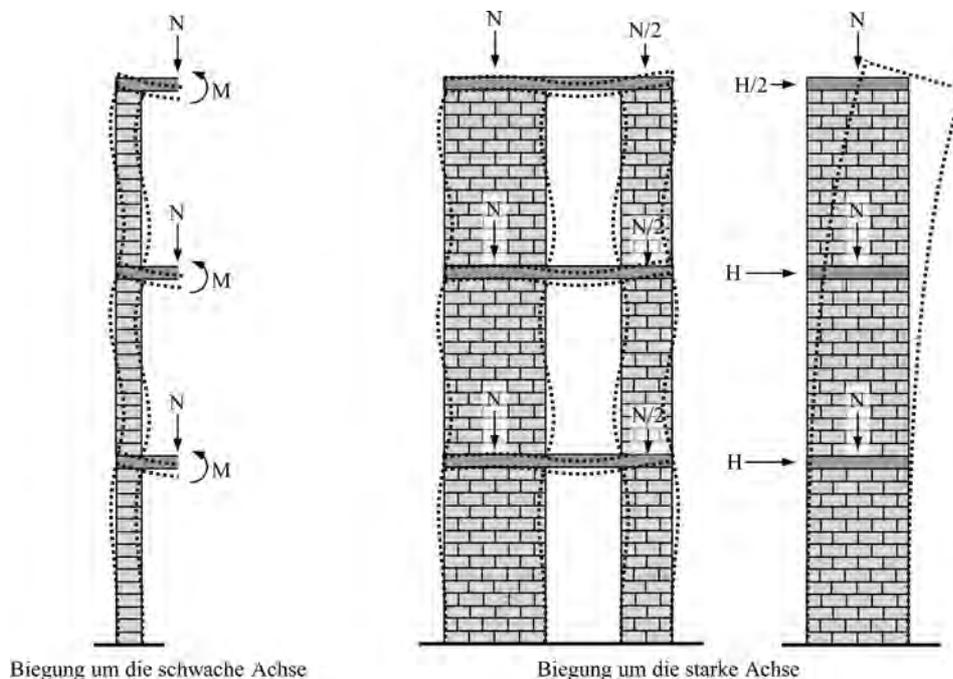


Bild 1.1 Beispielhafte Biegebeanspruchungen um die schwache und starke Achse

In Deutschland ist im Mauerwerksbau die unbewehrte Bauweise die gängige Praxis. Die Anordnung einer Bewehrung ist bei überwiegend auf Druck beanspruchten Stützen oder Wänden nicht zwingend erforderlich, da auch unbewehrte Druckglieder beachtliche Biegebeanspruchungen abtragen können. Dass eine Bewehrung abkömmlich ist, wird aus dem Grundprinzip von bewehrten Bauteilen ersichtlich: Die Druckkräfte werden durch den Grundwerkstoff aufgenommen, wohingegen die Zugkräfte wegen der sehr geringen Zugfestigkeiten des Grundwerkstoffes von der Bewehrung abgetragen werden müssen. Sofern die Stützen und Wände annähernd zentrisch auf Druck beansprucht sind, müssen keine Zugspannungen aufgenommen werden und die Bewehrung ist obsolet. In aller Regel erhöht die Bewehrung aufgrund ihrer größeren Festigkeit auch die Tragfähigkeit des Druckgliedes, beschränkt die Rissbreite und verbessert die Duktilität beim Versagen. Diese Eigenschaften sind jedoch nicht immer erforderlich, sodass Druckglieder auch unbewehrt ausgeführt werden können. In Zeiten knapper Ressourcen wurde dies in der Baupraxis umgesetzt, wie zum Beispiel die Aussage von Stiglat verdeutlicht: *„In jener Zeit habe ich, wie mancher Ingenieur der sechziger Jahre, Hochhäuser berechnet, [...] 12- u. 14-geschossig, deren aussteifende Kernwände unbewehrt waren. [...] Und sie haben sich bewährt.“* [vgl. Polónyi (2014)]. Auch Leonhardt & Mönning (1984) bestätigen den Einsatz von schlanken unbewehrten Wänden: *„Zahlreiche Hochhäuser wurden schon mit unbewehrten tragenden Betonwänden (Wanddicken bis herab zu 7 cm bei 2,75 m Stockwerkshöhe [...]) gebaut, so daß die Brauchbarkeit solcher Druckglieder erwiesen ist.“* Auch in jüngerer Vergangenheit wurde die Bewehrung schlanker Betonstützen kritisch hinterfragt, wie die Beiträge Polónyi (2014) und Schmidt & Curbach (2016) zeigen.

Für lediglich einachsig exzentrisch beanspruchte unbewehrte Mauerwerksdruckglieder mit rechteckigem Querschnitt stehen neben den normativ geregelten Verfahren in der Literatur viele unterschiedliche Ansätze zur Berechnung der Tragfähigkeit zur Verfügung. Für zweiachsig exzentrisch beanspruchte Druckglieder ist normativ eine Bemessung ohne aufwendige nichtlineare Berechnung möglich, wobei jedoch zu beachten ist, dass die Bemessung nur für ausreichend lange Wände ohne nennenswerte Einflüsse der Verformungen in Wandlängsrichtung geeignet ist. Für kurze Wände oder Pfeiler ist das normative Nachweisverfahren inadäquat.

Da kein fundierter Ansatz zur Bemessung schlanker unbewehrter Druckglieder mit rechteckigem Querschnitt unter zweiachsig exzentrischer Beanspruchung vorliegt, wird oftmals auf Stahlbetondruckglieder zurückgegriffen, obwohl die Bewehrung für die Sicherstellung der Tragfähigkeit nicht erforderlich ist. Mit der vorliegenden Arbeit soll die derzeit bestehende Lücke geschlossen werden. Hierfür ist neben der wirklichkeitsnahen Beschreibung des Last-Verformungs-Verhaltens mit einem nichtlinearen Berechnungsmodell auch ein für die Baupraxis geeignetes nichtlineares Bemessungsverfahren erforderlich.

1.2 Zielsetzung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die wirklichkeitsnahe Bestimmung der Tragfähigkeit unbewehrter, zweiachsig exzentrisch beanspruchter Druckglieder mit rechteckigem Querschnitt. Dabei soll zu Gunsten der Genauigkeit weitestgehend auf vereinfachende Annahmen verzichtet werden. Für die Bestimmung der Tragfähigkeit auf Querschnitts- und Systemebene sind die Werkstoffspezifika der mineralischen Mauerwerksbaustoffe zu berücksichtigen. Dies sind zum Beispiel das spröde, annähernd linear-elastische Werkstoffverhalten von Ziegelmauerwerk und das wesentlich duktilere Werkstoffverhalten von Kalksandsteinmauerwerk. Hierfür soll ein geeignetes Werkstoffgesetz verwendet werden, welches für alle Mauerwerkswerkstoffe konsistent anwendbar ist.

Neben einem ausführlichen nichtlinearen Berechnungsmodell soll zudem ein Bemessungsverfahren entwickelt werden, welches in die Bemessungsnormen DIN EN 1996-1-1 (2010) und DIN EN 1996-1-1/NA (2012) integriert werden kann. Für die Sicherstellung einer normenkonformen Bemessung ist dabei das semiprobabilistische Teilsicherheitskonzept gemäß DIN EN 1990 (2010) und DIN EN 1990/NA (2010) zu berücksichtigen.

1.3 Vorgehensweise

In Abschnitt 2 werden die Werkstoffeigenschaften der verschiedenen Mauerwerksbaustoffe vorgestellt. Beginnend mit deren maßgeblichen Ausgangsstoffen Mauerstein und Mauermörtel wird darauf aufbauend das Tragverhalten unter Druck- und Zugbeanspruchung analysiert. Zur Beschreibung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung wird das Werkstoffgesetz von DIN EN 1992-1-1 (2011) verwendet. Da für Mauerwerk ausschließlich die Druckfestigkeit und der Elastizitätsmodul normativ geregelt sind, wird anhand von Versuchen aus der Literatur aufgezeigt, dass die gewählte Spannungs-Dehnungs-Beziehung bei geeignetem Ansatz der zugehörigen Werkstoffkennwerte auch das Last-Verformungs-Verhalten von Mauerwerk zutreffend beschreibt.

Die Analyse bestehender Berechnungs- und Bemessungsverfahren zur Bestimmung der Tragfähigkeit von ein- und zweiachsig exzentrisch beanspruchten Druckgliedern erfolgt in Abschnitt 3. Zuerst wird die historische Entwicklung der Bestimmung der Querschnitts- und Systemtragfähigkeit erörtert. Anschließend werden ausgewählte theoretische Verfahren in eine allgemeingültige Formulierung überführt und ausgewertet. Weiterhin werden Bemessungsverfahren nationaler und internationaler Normen aufbereitet, um eine Auswertung der Tragfähigkeiten zu ermöglichen.

In Abschnitt 4 wird ein nichtlineares Berechnungsverfahren für die Bestimmung der Tragfähigkeit unbewehrter Druckglieder bei zweiachsig exzentrischer Beanspruchung entwickelt. Hierfür werden systematisch aufeinander aufbauende Analysen zur Querschnittstragfähigkeit, -krümmung und Systemtragfähigkeit durchgeführt. Für linear-elastisches Werkstoffverhalten wird die Systemtragfähigkeit analytisch hergeleitet, wohingegen diese für nichtlineares Werkstoffverhalten numerisch ermittelt werden muss. Anhand der Ergebnisse experimentell durchgeführter Versuche wird gezeigt, dass die getroffene Annahme eines Druckgliedes mit homogenem Querschnitt auch für Mauerwerk aus Steinen mit hohem Lochanteil möglich ist. Zudem wird das nichtlineare Berechnungsverfahren mit bestehenden Versuchsergebnissen an schlanken Druckgliedern verifiziert. Darüber hinaus erfolgt die Untersuchung weiterer Versagensmöglichkeiten, wie zum Beispiel das Biegedrillknickversagen.

Mittels umfangreicher Berechnungen mit dem entwickelten nichtlinearen Berechnungsverfahren wird in Abschnitt 5 ein Bemessungsverfahren entwickelt. Um eine normenkonforme Bemessung zu ermöglichen, ist das semiprobabilistische Teilsicherheitskonzept zu berücksichtigen. Für die nichtlineare Schnittgrößenermittlung und Bemessung wird das in Abschnitt 5.7 von DIN EN 1992-1-1/NA (2013) geregelte nichtlineare Verfahren (γ_R -Verfahren) derart modifiziert, dass es sich auch zur Bemessung von unbewehrten Druckgliedern eignet. Die dabei anzusetzenden Werkstoffkennwerte werden für die unterschiedlichen Werkstoffe angegeben. Ebenfalls wird aufgezeigt, wie das neue Bemessungsverfahren in die gültigen Regelwerke integriert werden kann und somit derzeit bestehende Defizite eliminiert werden.

Die Arbeit schließt mit den in Abschnitt 6 zusammengefassten wesentlichen Ergebnissen der durchgeführten Untersuchungen und einem Ausblick auf den weiteren Forschungsbedarf.

4

Nichtlineares Berechnungsmodell

4.1 Einführung

Das Ziel dieses Abschnittes ist die Entwicklung eines nichtlinearen Berechnungsmodells, welches die Tragfähigkeit unbewehrter Druckglieder wirklichkeitsnah abbildet. Dabei ist es erforderlich, die physikalisch nichtlinearen Eigenschaften der Werkstoffe möglichst realistisch zu modellieren. Dazu zählt neben der Rissbildung infolge der verhältnismäßig geringen Biegezugfestigkeit der Baustoffe auch die nichtlineare Spannungs-Dehnungs-Beziehung. Da Druckglieder nicht unendlich gedrungen sind, sondern stets eine gewisse Schlankheit aufweisen, ist es notwendig, die Durchbiegungen in beide Richtungen und die sich daraus ergebenden Traglastminderungen wirklichkeitsnah zu erfassen. Deshalb ist es unabdingbar, die geometrische Nichtlinearität mit Hilfe einer Berechnung nach Theorie II. Ordnung zu berücksichtigen.

Für unbewehrte Druckglieder mit lediglich einachsig exzentrischer Druckbeanspruchung – Sonderfall des ebenen Druckgliedes mit einachsiger Biegung – wurde von Glock (2004) ein Modell zur Bestimmung der Tragfähigkeit bei linear-elastischen Werkstoffverhalten entwickelt (vgl. Abschnitt 3.3.2.3). Aufbauend auf diesen Erkenntnissen werden die Tragfähigkeiten für den allgemein gültigen räumlichen Fall – zweiachsig Biegung mit Normalkraft – analytisch hergeleitet. Hierfür werden zunächst die Querschnittstragfähigkeiten für verschiedene Werkstoffverhalten analysiert. Für unendlich gedrungenen Druckglieder entspricht die Querschnittstragfähigkeit der Systemtragfähigkeit, da sich keine Verformungen nach Theorie II. Ordnung einstellen. Um jedoch diese Verformungen für schlanke Druckglieder wirklichkeitsnah zu erfassen, erfolgt zudem die Analyse der Querschnittskrümmungen. Unter Berücksichtigung des statischen Systems wird mit Hilfe der Querschnittstragfähigkeit und der Querschnittskrümmungen die Systemtragfähigkeit für linear-elastisches Werkstoffverhalten analytisch hergeleitet. Da die Berechnung der Systemtragfähigkeiten für Druckglieder mit nichtlinearem Werkstoffverhalten komplex ist, wird ein numerisches Berechnungsmodell vorgestellt. Mit diesem Modell lassen sich auch die analytischen Beziehungen zur Bestimmung der Systemtragfähigkeit bestätigen. Abschließend erfolgt die Verifizierung der theoretisch ermittelten Querschnitts- und Systemtragfähigkeiten durch experimentelle Versuchsergebnisse. Zum einen werden hierfür Versuche zur Bestimmung der Querschnittstragfähigkeit an Hochlochziegeln mit verhältnismäßig homogenem sowie heterogenem Lochbild durchgeführt und ausgewertet. Zum anderen wird die Systemtragfähigkeit mit in der Literatur verfügbaren Versuchsergebnissen verifiziert.

Nachstehend sind die dem nichtlinearen Berechnungsmodell zugrunde liegenden Randbedingungen zusammengestellt:

- Einaxialer Spannungszustand mit der Werkstoffbeziehung gemäß Abschnitt 2.4.2
- Prismatische homogene Druckglieder mit rechteckigem Querschnitt ohne Eigengewicht¹⁾
- Ebenbleiben der Querschnitte
- Querschnitte stehen stets senkrecht zur Stabachse
- Verformungen sind im Vergleich zu den Stababmessungen gering
- Ausschluss von Profilverformungen²⁾
- Keine Berücksichtigung der Verformungen infolge von Querkraft und Torsion³⁾
- Zeitlich veränderliche Einflüsse infolge von Kriechen und Schwinden sowie Imperfektionen sind als zusätzliche Exzentrizitäten zu berücksichtigen
- Die Berechnung nach Theorie II. Ordnung am beidseitig gelenkig gelagertem Ersatzstab erfolgt ausschließlich unter konstanter Druckkraft und konstanten Exzentrizitäten nach Theorie I. Ordnung (vgl. auch Bild 4.28).⁴⁾ Dies bedingt zugleich, dass auch bei unterschiedlichen Schlankheiten die größten Beanspruchungen nach Theorie II. Ordnung in beide Richtungen in gleicher Höhenlage des Druckgliedes Stabes auftreten.
- Schlankheit in y -Richtung λ_y ist größer oder gleich der Schlankheit in z -Richtung λ_z , es gilt somit: $1,0 \leq \delta = \lambda_y / \lambda_z \leq \infty$
- Bezogene Exzentrizitäten der Normalkraft e_y^I/t und e_z^I/b sind stets positiv, es gilt somit: $0 \leq \psi^I = e_z^I/b / (e_y^I/t) = e_z^I \cdot t / (e_y^I \cdot b) \leq \infty$

Die letzten beiden Punkte der Aufzählung schränken die Anwendungsmöglichkeiten des nichtlinearen Berechnungsmodells nicht ein, da durch eine Transformation des Achsensystems alle möglichen Fälle der Kombinationen von Exzentrizitäten und Schlankheiten in beide Richtungen abgebildet werden können. Zudem werden verschiedene Normierungen eingeführt, um die Darstellung in kompakter Form zu ermöglichen. Diese Vorgehensweise vermeidet Doppelungen und reduziert die notwendigen Untersuchungen auf ein Minimum.

4.2 Querschnittstragfähigkeit

4.2.1 Grundlagen

Bei vorgegebenen Exzentrizitäten beschreibt die Querschnittstragfähigkeit den Gleichgewichtszustand mit der größtmöglichen Normalkraft. Dieser Zustand wird nur erreicht, wenn die inneren mit den äußeren Schnittgrößen im Gleichgewicht stehen und wenn der Werkstoff unter Berücksichtigung seines Verhaltens an mindestens einer Faser des Querschnittes gänzlich ausgenutzt ist.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Querschnittstragfähigkeiten für linear-elastisches, starr-plastisches und nichtlineares Werkstoffverhalten analysiert. Im Hinblick auf die spätere Ermittlung der Krümmungen in Abschnitt 4.3 werden zusätzlich zu den Querschnittstragfähigkeiten auch die zugehörigen überdrückten Längen für linear-elastisches Werkstoffverhalten ohne Biegezugfestigkeit ermittelt. Neben den analytischen Herleitungen, welche nicht für alle Teilbereiche geschlossen möglich sind, wird auch ein Modell, basierend auf der numerischen Integration, entwickelt und dargestellt.

1) In Abschnitt 4.5.2 wird experimentell verifiziert, dass auch für Mauersteine mit verhältnismäßig großem Lochanteil von einem homogenen Druckglied ausgegangen werden kann.

2) Der Querschnitt behält stets seine rechteckige Form bei.

3) Die Auswirkung von Torsionsverformungen auf die Tragfähigkeit werden in Abschnitt 4.4.4 analysiert.

4) Für unterschiedliche Exzentrizitäten an Kopf und Fuß des Druckgliedes wird in Abschnitt 5.2.4 eine Modellbildung mit über die Druckgliedhöhe konstanten Ersatzexzentrizitäten vorgestellt.

Die Tragfähigkeit bei linear-elastischem Werkstoffverhalten ist der untere Grenzwert der Tragfähigkeit, sofern bis zum Erreichen der Höchstspannung die Dehnung stets proportional oder überproportional zur Spannung anwächst. Für die Mauerwerksbauweise ist die einzige bekannte Ausnahme das Trockenmauerwerk, da bei kleinen Spannungen die Dehnungen unterproportional zu den Spannungen anwachsen und die Spannungs-Dehnungs-Beziehung somit einen Wendepunkt aufweist [vgl. Marzahn (2000)]. Von besonderer Bedeutung ist auch das starr-plastische Werkstoffverhalten, da dieses den oberen Grenzfall der Querschnittstragfähigkeit abbildet. Des Weiteren liegt für dieses Werkstoffverhalten die Querschnittstragfähigkeit für lediglich einachsige exzentrische Beanspruchung in einfacher Form vor und wird daher oftmals für normative Nachweisverfahren zugrunde gelegt (vgl. Abschnitt 3.4).

Die aufnehmbaren Schnittgrößen lassen sich mit Hilfe der Integration der Spannungen σ über die Querschnittsfläche A ermitteln. Dabei beschreiben die Größen y und z jeweils den Abstand von einem beliebigen Querschnittspunkt innerhalb der Fläche A zur Koordinatenachse.

$$N_R = \int_A \sigma dA \quad (\text{Gl. 4.1})$$

$$M_{R,y} = \int_A z \cdot \sigma dA \quad (\text{Gl. 4.2})$$

$$M_{R,z} = \int_A y \cdot \sigma dA \quad (\text{Gl. 4.3})$$

Allgemein bekannte Versagensmodi für die mineralischen Mauerwerksbaustoffe sind das Überschreiten der Druck- oder Biegezugfestigkeit. Die Überschreitung der Druck- oder /und Biegezugfestigkeit ist nicht zwangsläufig ein maßgebender Versagenszustand, da die Beanspruchung des Querschnittes gegebenenfalls auch nach Überschreitung der maximal aufnehmbaren Festigkeiten an einer Stelle des Querschnittes gesteigert werden kann. Deshalb wird für die Ermittlung der Querschnittstragfähigkeit für zweiachsig exzentrisch druckbeanspruchte rechteckige Querschnitte zwischen zwei Modellierungen respektive Versagenskriterien unterschieden. Das erste Versagenskriterium ist die Begrenzung der Druckdehnung ($\eta_{\max} = \eta_u$; vgl. Bild 4.1 links). Sobald

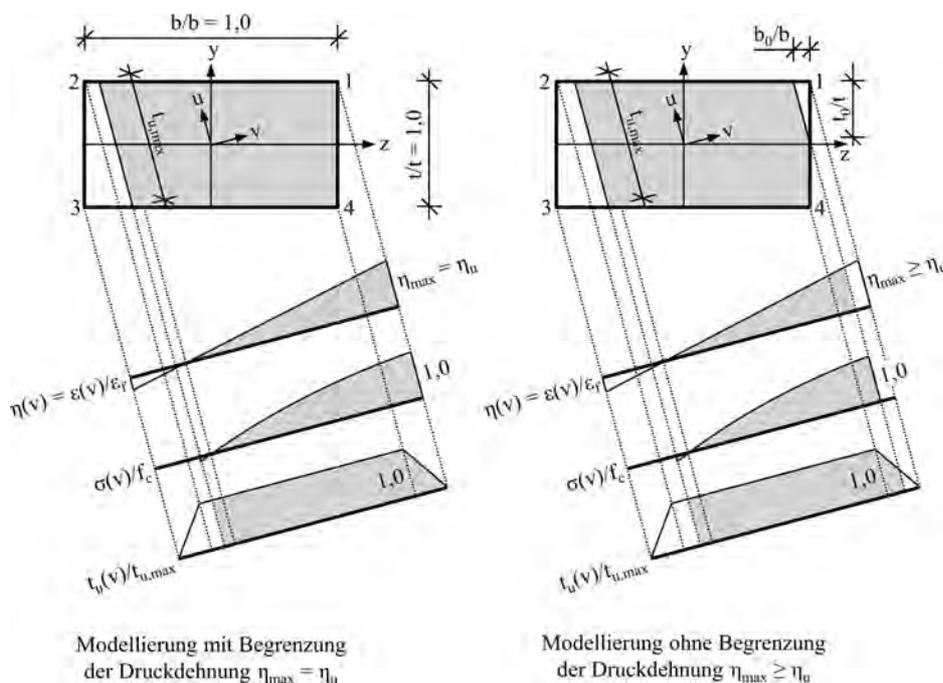


Bild 4.1 Dehnungs-, Spannungs- und schiefe Querschnittsbreitenverteilung im Versagenszustand für die Modellierung mit (links) und ohne (rechts) Begrenzung der Druckdehnung