

Tragverhalten und statische Berechnung gemauerter Gewölbe bei großen Auflagerverschiebungen

Untersuchungen mit der Finite Elemente Methode

Matthias Jagfeld

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Architektur der Technischen Universität
München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. W. Koenigs

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. R. Barthel
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. K. Schweizerhof
Universität Karlsruhe

Die Dissertation wurde am 19.10.1999 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Architektur am 29.2.2000 angenommen.

Schriftenreihe des Lehrstuhls für Hochbaustatik und
Tragwerksplanung

Band 1

Matthias Jagfeld

**Tragverhalten und statische Berechnung
gemauerter Gewölbe**

Untersuchungen mit der Finite-Elemente-Methode

Shaker Verlag
Aachen 2000

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Jagfeld, Matthias:

Tragverhalten und statische Berechnung gemauerter Gewölbe: Untersuchungen mit der Finite-Elemente-Methode / Matthias Jagfeld.

Aachen: Shaker, 2000

(Schriftenreihe des Lehrstuhls für Hochbaustatik und Tragwerksplanung;
Bd. 1)

Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2000

ISBN 3-8265-8153-9

Copyright Shaker Verlag 2000

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

Printed in Germany.

ISBN 3-8265-8153-9

ISSN 1617-0903

Shaker Verlag GmbH • Postfach 1290 • 52013 Aachen

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

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Obwohl gemauerte Gewölbe zu den ältesten Bauelementen der Architektur zählen, treten bei der Beurteilung des Tragverhaltens und der Standsicherheit immer wieder Unsicherheiten auf. Die Deutung von Schäden und deren Wertung hinsichtlich möglicher Gefährdungen ist in vielen Fällen nach wie vor schwierig. In der Praxis entscheidet man sich deshalb oft für Instandsetzungsmaßnahmen, die entweder nicht zum gewünschten Ziel führen, oder unnötig weit auf der sicheren Seite liegen und damit die historische Bausubstanz unnötig zerstören oder verfremden. Auch bei der Anwendung moderner baustatischer Hilfsmittel stellen die Simulation der Rißbildung, der Einfluß großer Verformungen und die dreidimensionale Form der Gewölbe Probleme dar. Hierzu gibt es bisher nur wenige wissenschaftliche Arbeiten, die über die grundsätzlichen Beschreibungen der Mechanismen hinausgehen.

Matthias Jagfeld entwickelt in der vorliegenden Arbeit wichtige Grundlagen zur besseren Beurteilung von Gewölben, die durch große Auflagerverschiebungen geschädigt sind. Hierzu werden ausführliche analytische und numerische Studien zum Aufreißen der Lagerfuge, zum Rißabstand, zur Lokalisierung der Gelenkbildung, zu Längsrissen und zu Abplatzungen im Bereich der Gelenke durchgeführt. Schließlich wird ein eigenes Materialmodell entwickelt. Ziel ist es dabei, ein gemauertes Gewölbe in seinem Gesamttragverhalten bei größeren Auflagerverschiebungen zu simulieren. Dazu wird ein orthotropes Materialmodell basierend auf der Theorie der Mehrflächenplastizität hergeleitet. Mit dem Modell wird die Scheiben und Plattentragungswirkung von Mauerwerk berücksichtigt, so daß es für die Berechnung von gemauerten Schalen geeignet ist.

Die Arbeit entstand am Lehrstuhl für Hochbaustatik und Tragwerksplanung, an dem Matthias Jagfeld Assistent war. Der Lehrstuhl gehört zur Fakultät für Architektur der Technischen Universität München. Die Tragwerkslehre für Architekten ist Schwerpunkt der Lehrtätigkeit. Die Auseinandersetzung mit Architektur und Architekturgeschichte ist oft Anregung und Hintergrund für ingenieurwissenschaftliche Forschungsarbeiten. Das Tragverhalten historischer Konstruktionen und die Instandsetzung historischer Bauten ist ein Forschungsschwerpunkt am Lehrstuhl.

Prof. Dr.-Ing. Rainer Barthel

Lehrstuhl für Hochbaustatik und Tragwerksplanung

Technische Universität München

München, im Juli 2000

Diese Dissertation entstand während meiner sechsjährigen Tätigkeit als wissenschaftlicher Assistent bei Prof. Dr.-Ing. Rainer Barthel am Lehrstuhl für Hochbaustatik und Tragwerksplanung der Technischen Universität München.

Herr Prof. Dr.-Ing. Rainer Barthel regte diese Arbeit an. Er stellte mir Zeit und Raum zur Verfügung und half mir durch seine Vertrautheit mit der Thematik die unterschiedlichen Themenstränge meiner Arbeit zusammenzuführen, so daß sich die Puzzelteile einzelner Ergebnisse zu einem Bild zusammensetzten. Herzlichen Dank!

Herr Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karl Schweizerhof hat mit großer Interesse und erheblichem Zeitaufwand meine Arbeit verfolgt und unterstützt. Dafür und für die Übernahme des Koreferats danke ich ihm.

Frau Dipl.-Ing. Annette Koch stellte mir bereitwillig ihr Wissen und ihre Erfahrung aus der denkmalpflegerischen Baupraxis zur Verfügung und half mir beim Zusammentragen der Beispiele. Dafür vielen Dank.

Mein Dank gilt ebenfalls Herrn Dipl.-Ing. Johann Amaseder für die selbständige und verantwortliche Durchführung der Versuche.

Ich danke weiterhin Prof. Dr.-Ing. Schuller (Universität Bamberg) für den Hinweis auf die Burgruine Altenstein und Dr. Fraser Smith (University of Dundee), für die Vorbereitung und tatkräftige Mithilfe bei den Versuchen an Bogensegmenten. Ich danke Prof. P.B. Lourenco (Universidade do Minho), der mir seine Veröffentlichungen zur numerischen Berechnung von Mauerwerk bereitwillig zur Verfügung stellte. Sie waren außerordentlich hilfreich für meine Arbeit.

Dr. rer.-nat. Rolf Walter unterstützte mich in einer entscheidenden Phase durch wichtige Hinweise zur universitären Arbeitsweise. Er trug dadurch maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit bei. Ich danke ihm von Herzen.

Mein besonderer Dank gilt meiner Frau Mathilde und meinen Söhnen Christoph und Sebastian. Sie verfolgten mit großem Interesse den Fortgang meiner Arbeit. Leider kann ich nun - trotz Dokortitel - die Vorsorgeuntersuchungen U7 und U8 für Kinder mit vier und mit fünf Jahren nicht durchführen.

Matthias Jagfeld

Inhaltsverzeichnis

1.	EINLEITUNG	1
1.1.	Problematik	1
1.2.	Zielsetzung	2
1.3.	Vorgehensweise	2
2.	BEOBACHTUNGEN AN VERFORMTEN GEWÖLBEN	5
2.1.	Geometrie und Verformungen – Beispiele	5
2.2.	Schadensbilder	16
2.3.	Bezug zu Regelwerken	16
3.	TRAGVERHALTEN VON GEWÖLBEN – STAND DER FORSCHUNG	19
4.	FINITE ELEMENTE BERECHNUNG VON MAUERWERKSBAUTEN – STAND DER FORSCHUNG UND VERGLEICHSBERECHNUNGEN	27
4.1.	Grundlagen	27
4.2.	Modellierungstechniken	34
4.3.	Mauerwerk mit großen Rotationen – Vergleich verschiedener FE-Modelle	45
5.	VERSUCHE AN EXZENTRISCH BELASTETEM MAUERWERK	59
5.1.	Teilflächenbelastung von Ziegelsteinen	59
5.2.	Rotationsversuche an Kleinkörpern	62
5.3.	Bogensegmente mit Auflagerverschiebung	70
5.4.	Ergebnisse	72
6.	RIßBILDUNG IN EXZENTRISCH BELASTETEM MAUERWERK	73
6.1.	Mechanische Eigenschaften von Mauerwerk	73
6.2.	Aufreißen der Lagerfugen	74
6.3.	Riabstand	85
6.4.	Lokalisation der Verdrehungen – Gelenkbildung	86
6.5.	Längsrisse	94
6.6.	Abplatzungen	106
7.	ENTWICKLUNG EINES ORTHOTROPEN MATERIALMODELL FÜR MAUERWERK	109
7.1.	Stand der Forschung	110
7.2.	Anforderungen an das Materialmodell	111
7.3.	Versagenskriterien	111
7.4.	Mehrflächenplastizität	120
7.5.	Testberechnungen	128
7.6.	Ergebnis der Testberechnung	144

8.	BERECHNUNGEN VON GEWÖLBE MIT GROßEN AUFLAGERVERSCHIEBUNGEN	145
8.1.	Materialparameter	145
8.2.	Tonnengewölbe	146
8.3.	kreiszyndrisches Kreuzgewölbe	177
8.4.	Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse	186
9.	ERGEBNISSE	189
9.1.	Materialverhalten	189
9.2.	Numerische Simulation	190
9.3.	Orthotropes Materialmodell	192
9.4.	Tragverhalten gemauerter Gewölbe	192
9.5.	Offene Fragen und Ausblick	193
10.	ZUSAMMENFASSUNG	195
11.	LITERATUR	197