

**Kollapsanalyse
quasistatisch belasteter
stählerner Schalentragwerke**

von

Werner Schneider

Bericht Nr. 5 (2002)

Universität Leipzig
Institut für Statik und Dynamik der Tragstrukturen

Herausgeber:
Prof. Dr.-Ing. R. Thiele
Prof. Dr.-Ing. M. Kaliske

Von der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Universität
Leipzig anerkannte Habilitationsschrift zur Erlangung des akade-
mischen Grades Doktor-Ingenieur habilatus (Dr.-Ing. habil.)

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. R. Thiele
Prof. Dr.-Ing. S. Winter
Prof. Dr.-Ing. H. Pasternak

Tag des Vollzugs der Habilitation: 6. 11. 2002

Berichte aus dem Institut für Statik und Dynamik der
Tragstrukturen

Band 5

Werner Schneider

**Kollapsanalyse
quasistatisch belasteter
stählerner Schalentragwerke**

Shaker Verlag
Aachen 2002

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Schneider, Werner:

Kollapsanalyse quasistatisch belasteter stählerner Schalentragwerke / Werner Schneider.

Aachen : Shaker, 2002

(Berichte aus dem Institut für Statik und Dynamik der Tragstrukturen ;

Bd. 5)

Zugl.: Leipzig, Univ., Habil.-Schr., 2002

ISBN 3-8322-1087-3

Copyright Shaker Verlag 2002

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

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-1087-3

ISSN 1615-8423

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

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

KURZFASSUNG

Die meisten Tragwerke werden durch nahezu ruhende Lasten beansprucht. Ihr Tragverhalten im Gebrauchszustand kann deshalb mit statischen Methoden, d.h. unter Negierung von Trägheitskräften beschrieben werden. Statische Lösungsstrategien werden bei quasistatisch belasteten Tragwerken oft auch zur Beschreibung des Kollapsverhaltens verwendet, wodurch inhaltliche Inkonsistenzen und methodische Schwierigkeiten entstehen. Hauptanliegen der Arbeit ist es, das Kollapsverhalten quasistatisch belasteter Tragwerke konsistent zu modellieren.

Im ersten Hauptteil werden zunächst die maßgebenden Probleme beschrieben, die bei der Modellierung und Bewertung von Versagensvorgängen zu beachten sind. Zur Analyse des Kollapsverhaltens wird eine quasistatische Analyse vorgeschlagen, d.h. die dynamische Analyse eines monotonen, gegenüber den charakteristischen Eigenzeiten des Systems langsam verlaufenden Belastungsprozesses. Grundsätzliche Charakteristika werden vorgestellt. Im Vergleich mit Arbeiten anderer Autoren, die ebenfalls dynamische Analysetechniken einbeziehen, wird gezeigt, dass die quasistatische Analyse nicht auf bestimmte Belastungsarten beschränkt ist und dass sie den realen Kollapsprozess wirklichkeitsnäher widerspiegelt, weil die Interaktion zwischen Lasteinwirkung und dynamischer Tragwerksantwort sowie die beim Versagen freigesetzte Energie berücksichtigt werden. Insbesondere sind dadurch Aussagen zum Schädigungspotenzial von Kollapsvorgängen möglich. Im Vergleich von statischer und quasistatischer Analyse wird gezeigt, dass mit beiden Methoden zuverlässige Aussagen über die erste Instabilitätslast getroffen werden können, dass die quasistatische Analyse aber Versagenslasten und -formen zutreffender beschreibt, wenn dem Systemversagen lokale Versagensvorgänge vorausgehen, nach Überwinden des Instabilitätspunktes ein abrupter Abfall des Tragvermögens erfolgt oder das Versagen durch materielle Nichtlinearitäten mitbestimmt wird. Ein weiterer Vorteil der quasistatischen Analyse ist die Verbesserung der Lösungskonvergenz in Fällen, bei denen geclusterte Instabilitäten auftreten. Die getroffenen Aussagen gelten unabhängig von einem bestimmten Werkstoff oder einer speziellen Tragstruktur. Mit besonderem Nutzen kann die quasistatische Analyse aber zur Modellierung des „böartigen“ Versagens von dünnwandigen Schalentragwerken eingesetzt werden.

Nach den grundsätzlichen methodischen Überlegungen werden im zweiten Hauptteil Kollapsanalysen ausgewählter Instabilitätsfälle stählerner Schalen vorgestellt, jeweils im Vergleich der Resultate von statischer und quasistatischer Analyse. Am Beispiel des Basisbeulfalles der axial gedrückten perfekten Kreiszylinderschale wird gezeigt, dass die quasistatische Analyse auch für diesen intensiv erforschten Instabilitätsfall zu substanziell neuen Aussagen über den Versagensprozess führt. Insbesondere zeigt sich, dass auch das Versagen dünnwandiger Schalen, die dem sog. Bereich elastischen Beulens nach der klassischen Beultheorie zugehören, maßgeblich durch materielle Nichtlinearitäten mitbestimmt ist. Da beim Schalenbeulen die Imperfektionsproblematik beherrschend ist, wird diesem Problemkreis besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Auch hierbei ergibt sich, dass sogar Basisaussagen zur Imperfektionssensitivität stählerner Schalentragwerke einer Korrektur bedürfen, wenn materielle Nichtlinearitäten in die Untersuchungen einbezogen werden. Ergänzt werden die ausgewählten Kollapsanalysen durch Untersuchungen biegebeanspruchter schlanker Schalen, um gegenwärtig noch bestehende Wissenslücken zu schließen.

Ein Ausblick auf weitere Forschungserfordernisse sowie zusammenfassende Schlussfolgerungen beschließen die Arbeit.

ABSTRACT

Most structures are subjected to almost static loads. Their load bearing behaviour in the service state can therefore be described by static methods, i.e. by neglecting inertial forces. Static methods, however, are also often used for modelling the collapse behaviour of quasi-static loaded structures. Thereby, content-related inconsistencies and methodical difficulties arise. The aim of this work is the consistent modelling of the collapse behaviour of quasi-static loaded structures.

In the first main section, the fundamental problems to be considered in modelling and evaluating collapse processes are described. A quasi-static approach for analysing the collapse behaviour of structures is proposed. It incorporates the dynamic analysis of a monotonous loading process running slowly compared to the intrinsic time periods of the system. Fundamental characteristics are presented. The comparison with studies of other authors which also include dynamic methods shows that the quasi-static analysis is not limited to certain loading cases and that it describes the collapse process more realistically because the interaction between the loading and the dynamic structural response as well as the energy that is released in the collapse process are here considered. In particular, statements about the damage potential of collapse processes can be given by a quasi-static analysis. Comparing static and quasi-static analysis, it is shown that both methods are suitable for making reliable statements about the first instability load. However, the quasi-static method describes the collapse load and the collapse pattern more applicably if local collapse processes precede the global system failure, if an abrupt reduction of the load bearing capacity occurs after overcoming an instability point or if the failure is codetermined by material non-linearity. A further advantage of the quasi-static analysis is the improvement of the solving convergence in cases of clustered instabilities. The statements are not limited to certain materials or special structures. However, the quasi-static analysis is particularly profitable for modelling the "vicious" collapse behaviour of thin-walled shell structures.

In the second main section, collapse investigations of selected instability cases of steel shells are presented. The results of the static and the quasi-static analysis are compared in each case. It is shown with the example of the basic buckling case of the axially compressed perfect cylindrical shell that the quasi-static analysis allows new substantial statements about the collapse behaviour of even this so intensively investigated instability case to be made. It is observed in particular that the collapse behaviour of thin-walled shells that belong to the so-called area of elastic buckling according to the classical buckling theory are also decisively codetermined by material non-linearity. Special attention is given to the imperfection problems since the shell buckling is very much dominated by this problem area. It comes out even here that basic statements about the imperfection sensitivity of steel shell structures need a correction if material non-linearity is included in the investigation. The selected collapse analyses are completed by investigations of slender shells subjected to bending in order to fill the knowledge gaps that currently still exist in this area.

Finally, an outlook for further research requirements as well as summarised conclusions are given.

VORWORT

Die vorliegende Arbeit entstand in den vergangenen Jahren während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Statik und Dynamik der Tragstrukturen der Universität Leipzig.

Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. R. Thiele, der während dieser Zeit die Leitung des Institutes innehatte und mir in fachlicher und menschlicher Hinsicht jede Unterstützung zuteil werden ließ. Durch seine Forschungen zu stählernen Flächentragwerken hat er die Ausrichtung meiner Arbeit wesentlich beeinflusst. Nicht zuletzt danke ich ihm dafür, dass er die Frage wachgehalten hat, welche Konsequenzen meine Forschungen für die Bewertung von Tragwerken haben.

Herrn Prof. Dr.-Ing. S. Winter, Professur für Stahl- und Holzbau der Universität Leipzig, danke ich für die kurzfristige Übernahme eines Gutachtens im laufenden Habilitationsverfahren. Dieses hatte zunächst Herr Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. e.h. G. König, Direktor des Institutes für Massivbau der Universität Leipzig, übernommen, dessen Forschungs-kompetenz und ingenieurwissenschaftliche Intuition ich in vielfältigen Begegnungen schätzen gelernt habe. Durch einen Unfall im Mai diesen Jahres mit anschließender längerer Rehabilitationsphase war ihm dies jedoch nicht möglich. Um den Abschluss des Verfahrens zu ermöglichen, hat Herr Prof. Winter trotz seiner mannigfaltigen Belastungen diese Lücke geschlossen und dabei seine weit gefächerten Erfahrungen aus dem Bereich des Stahlbaus eingebracht.

Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Pasternak, Brandenburgische Technische Universität Cottbus, für die Bereitschaft, als Gutachter im Habilitationsverfahren mitzuwirken und dabei seine vielfältigen Erfahrungen mit der Konstruktion und Bewertung stählerner Flächentragwerke einfließen zu lassen.

Schließlich gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. W. Zahiten, Lehr- und Forschungsgebiet Baumechanik und Numerische Methoden der Bergischen Universität GH Wuppertal, der mir bei der Nutzung des FE-Programmsystems FEMAS, aber auch bei vielen in dieser Arbeit behandelten Fragen wichtige Anregungen gab.

Danken möchte ich weiter den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Institutes für Statik und Dynamik der Tragstrukturen der Universität Leipzig. Ohne ihre Hilfe wäre die vorliegende Arbeit nicht möglich gewesen.

Ein besonderer Dank gilt meiner Frau Maria, die die Entstehung dieser Arbeit mit viel Einfühlungsvermögen „betreut“ hat.

Werner Schneider

Leipzig, Oktober 2002

INHALTSVERZEICHNIS

Bezeichnungen		I
1	Einführung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Stand der Forschung	2
2	Grundlegende Aspekte der Kollapsanalyse	7
2.1	Versagen und Instabilität	7
2.2	Statische Analyse	11
2.3	Quasistatische Analyse	12
2.3.1	Prinzipielle Vorgehensweise	12
2.3.2	Vergleich mit anderen dynamischen Methoden	19
2.3.3	Spezifische Anwendungsgebiete	22
3	Kollapsanalyse ausgewählter Schalenbeulfälle	23
3.1	Vorbemerkung	23
3.2	Modellbildung	24
3.3	Axial gedrückte Kreiszyinderschale	25
3.3.1	Perfekte Schale	25
3.3.2	Imperfekte Schale	42
3.3.2.1	Allgemeines	42
3.3.2.2	Kollapsprozess bei Einzelvorbeulen	43
3.3.2.3	Parameterstudien mit geometrischen Ersatzimperfectionen	48
3.4	Windbelastete schlanke Kreiszyinderschale	68
3.4.1	Perfekte Schale	68
3.4.1.1	Kopfringversteifte Schale mit einheitlicher Wanddicke	68
3.4.1.2	Zweifach ringversteifte Schale mit einheitlicher Wanddicke	80
3.4.1.3	Kopfringversteifte Schale mit einfach abgestufter Wanddicke	86
3.4.2	Imperfekte Schale	95
3.4.2.1	Klassische Imperfektionsmuster	95
3.4.2.2	Quasi-kollapsaffine Imperfektionen	102
3.5	Schlanke Kreiszyinderschale unter einzelner Querlast	113
4	Konsequenzen für die weitere Forschung	127
4.1	Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit	127
4.2	Verzweigungsähnliche Kollapsprobleme	128
4.3	„Stabiles“ Versagen	129
4.4	Redundanz von Tragwerken	131
5	Schlussfolgerungen und Zusammenfassung	133
6	Literatur	136