



Technische
Universität
Braunschweig

Institut für
STAHLBAU 

Ding Cai

Modellierung der Einwirkung auf ein Silo bei exzentrischer Entleerung

Modellierung der Einwirkung auf ein Silo bei exzentrischer Entleerung

Von der
Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina
zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

von
Ding Cai
geboren am 10. Juli 1988
aus Yueyang (China)

Eingereicht am: 09.06.2018

Disputation am: 13.12.2018

Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr. sc. Techn. Klaus Thiele
Prof. Dr.-Ing Dieter Dinkler

2019

Schriftenreihe des Instituts für Stahlbau

Heft 6

Ding Cai

**Modellierung der Einwirkung auf ein Silo
bei exzentrischer Entleerung**

Shaker Verlag
Düren 2021

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.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2021

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8225-8

ISSN 2198-8722

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Mein besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr. sc. techn. Klaus Thiele für seine Unterstützung und Förderung in den letzten Jahren, sowie für die Übernahme des Referates. Durch ihn konnte ich meine ingenieurmäßige Denkweise vertiefen. Außerdem danke ich ihm für das mir entgegenbrachte Vertrauen und die gewährten Freiräume für die Gestaltung der Arbeit. Ohne ihn wäre diese Arbeit nicht zustande gekommen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dieter Dinkler und Frau Prof. Dr.-Ing. Laura de Lorenzis danke ich herzlich für Ihr Interesse an der Arbeit und die Übernahme des Koreferats. Herrn Prof. Dr.rer.nat Hans Matthias Schöniger bin ich für die Übernahme des Vorsitzes für die Prüfungskommission einen Dank verpflichtet.

Herrn Dr.-Ing Martin Kaldenhoff von der HHW Gesellschaft Beratende Ingenieure mbH danke ich für die Initiierung des Forschungsvorhabens, die kontinuierlich andauernde Diskussionsbereitschaft, die aufgebrauchte Zeit, sowie die tiefgehenden, fachlichen Diskussionen, die zum Entstehen dieser Arbeit viel beigetragen haben.

Konrad Ritter, Cong Chen, Jonas Pons, Anzhi Wang, Niccolo Wieczorek, Hendrik Jahn, Dr.-ing Julian Unglaub, Dr.-Ing. Florian Minuth-Hadi, Dr.-Ing Thomas Höbbel, Dr.-Ing. Hodei Aizpurua Aldasoro, Prof. Dr.-Ing. Mathias Clobes, Dr.-Ing. Matthias Reininghaus danke ich für das angenehme Arbeitsumfeld und die stets aufmunternden Worte. Die guten 4 Jahre am Institut werden mir in bester Erinnerung bleiben, besonders die gemeinsamen Rennradtouren im Harz, sowie um und über den Elm.

Mein größter Dank gilt meinen Eltern. Ihnen danke ich von Herzen für die Möglichkeit eines Studiums in Deutschland, die uneigennützig Liebe und fortwährende Unterstützung darüber hinaus. Meiner Frau Benyu danke ich für ihre Geduld, ihr Verständnis und den liebevollen Rückhalt. Die größte Freude hat mir die Geburt unser Tochter Mila während der Promotion bereitet.

Braunschweig, im Januar 2019

Ding Cai

Kurzfassung

Silobauwerke weisen hohe Schadensraten auf. Besonders bei Silos mit exzentrisch angeordneter Auslauföffnung stellt die Bemessungssituation für die planenden Ingenieure immer noch eine Herausforderung dar. Das Ingenieurmodell nach Rotter für die Entleerung von Silos mit großen Exzentrizitäten, das in der aktuellen Norm Anwendung findet, wurde unter Anwendung der Scheibenelementmethode nach Janssen entwickelt. Der auf vereinfachten Annahmen beruhende Ansatz hat sich in der Ingenieurpraxis als unzulänglich erwiesen. Die künstlich erzeugten, nicht membrangerechten und unrealistischen Beanspruchungen können nicht über den Membranzustand abgetragen werden. Im Fall von Metallsilos ergibt sich bei strenger Anwendung der Regeln eine kaum noch zu beherrschende Bemessungssituation. Daher ist eine genaue Erfassung der unsymmetrischen Belastungen von Silokonstruktion für eine wirtschaftliche und sichere Auslegung von vitalem Interesse.

Die Modellierung eines Schüttgutes gilt immer als große Herausforderung in der Numerik. Die Gründe dafür sind zum einen, dass mit einer großen Verformung zu rechnen ist, wenn das Schüttgut in Bewegung ist. Dies führt in der herkömmlichen FEM, basierend auf der Lagrange-schen Formulierung, zu Schwierigkeiten. Zum anderen ist die Beschreibung des nichtlinearen Materialverhaltens eines Schüttgutes sehr komplex. In dieser Arbeit werden mit Hilfe neuer numerischer Methoden die Entleerungsvorgänge in Silos simuliert, womit eine längere Entleerungszeit und somit der stationäre Zustand erreicht wird. Die Simulationsergebnisse stimmen sehr gut mit den Versuchsergebnissen überein. Dabei stehen die berechneten Wanddrücke in großem Kontrast zu den nach der Norm berechneten Werten. In DIN EN 1991-4 wird lediglich das Fließprofil eines Schlotflusses parallel zur Silowand berücksichtigt. Das numerisch ermittelte Fließprofil für Weizen zeigt ein gemischtes Fließen und für Sand einen inneren Schlotfluss, dessen Fließkanalgrenze sich bis zur Schüttgutoberfläche erstreckt. Die unterschiedlichen Fließprofile führen zu unterschiedlichen Spannungsumlagerungen sowie Wanddrücken. Dahingehend werden aktuell in der DIN EN 1991-4 keine Unterscheidungen gemacht und es bedarf damit einer Berücksichtigung.

Stabilitätsuntersuchungen mit den simulierten Lasten und den Normlasten zeigen, dass die Tragfähigkeit von Silos bei exzentrischer Entleerung nach dem Normansatz deutlich unterschätzt wird. Für Silos unter einer realistischen Beanspruchung wird das global entstehende

Biegemoment neben den erhöhten Wandreibungslasten als Ursache für das axiale Beulen identifiziert. Ein ingenieurmäßiger Ansatz zur Beschreibung des Wanddrucks wird herangezogen. Mittels einer Parameterstudie wird exemplarisch der Ansatz für Weizen bei einer Schlankheit von 3 abgeleitet. An einem Silo wird die Auswirkung des neuen Ansatzes auf die Bemessung untersucht, dabei zeigen die Berechnungen mit dem neuen Ansatz gegenüber dem Normansatz für die drei Beulsicherheitsnachweise eine wesentlich bessere Abbildung des realen Tragverhaltens auf. Des Weiteren kann ein Silo mit dem Ansatz aufgrund seiner einfachen Handhabung sowohl wirtschaftlich als auch sicher ausgelegt werden.

Abstract

Silo structures tend to comprise high damage rates. Especially silos with an eccentrically arranged outlet still imply a major challenge for the planning engineers in the process of the design situation. The engineering model by Rotter for highly eccentric discharge, which is applicable within the current European Standard EN 1991-4 (2010), was developed using the slice element method of Janssen. However, the approach based on simplified assumptions turned out to be deficient in engineering practice. The artificially produced, non-membrane adequate and unrealistic loads cannot be ablated over the membrane condition. In case of metal silos, this results in a barely controllable design situation under strict application of the criteria. Thus, an accurate description of the asymmetric loads of silo constructions is of vital interest for a safe and economic design.

The modelling of bulk material is always considered as a major challenge in numerical analysis. The reasons on the one hand are that there is likely to be a great distortion when the bulk material is in motion. This leads to difficulties within the conventional FEM based on the Lagrangian formulation. On the other hand, the specification of non-linear material behavior of bulk material is very complex. Within this thesis, the emptying processes are simulated with the help of new numerical methods, which consequently leads to a longer discharge process and a stationary state is therefore reached. The simulation results show good correlation to the test results. Hence, the calculated wall pressures are contrary to the calculated values considering the standard. DIN EN 1991-4 only considers the flow profile of a chimney flow parallel to the silo wall. The numerically determined flow profile for wheat shows a mixed flow and for sand an eccentric taper pipe flow, whose flow channel boundary ranges up to the bulk material surface. The various flow profiles lead to different stress redistributions as well as wall pressures. However, no distinctions are currently made within the DIN EN 1991-4, which requires further consideration.

Stability investigations with the simulated loads and the standard loads implicate that the load capacity of silos under eccentric discharge according to the standard are being significantly underestimated. For silos under a realistic load, the globally resulting bending moment as well as the increased wall friction loads are considered to be the causes of axial buckling. An engineering approach to specify the wall pressure is obtained. By means of a parameter study, an

approach for wheat at a slenderness of 3 is exemplarily derived. The impact of the new approach on the design is examined on a silo. Consequently, the calculations using the new approach compared to the standard approach considering the there design concepts for the verification of shell stability show a considerably improved reflection of the real structural behavior. Furthermore, due to its ease of use, this approach enables a safe and economic design of a silo.

Inhalt

Symbole	iii
Glossar	ix
1 Einführung	1
1.1 Motivation und Zielsetzung	1
1.2 Gliederung der Arbeit	2
2 Exzentrische Entleerung von Silos	5
2.1 Allgemeines	5
2.2 Entwicklung der Lastansätze für die Praxis	7
2.2.1 Gleichmäßige Lasten	7
2.2.2 Teilflächenlast	9
2.2.3 Entleeren mit großen Exzentrizitäten: das Modell nach Rotter	10
2.3 Diskussion der aktuellen Normvorschrift	13
2.4 Stabilitätsuntersuchung eines Stahlsilos infolge exzentrischer Entleerung	18
2.4.1 Beulsicherheitsnachweise nach DIN EN 1993-1-6	20
2.4.2 Numerisches Berechnungsmodell	26
2.4.3 Stabilitätsuntersuchung unter symmetrischer Entleerung	28
2.4.4 Stabilitätsuntersuchung unter exzentrischer Entleerung	34
3 Simulationsmethoden und Materialmodelle	41
3.1 Überblick	41
3.2 Numerische Methoden	42
3.3 Numerische Modellierungstechnik zur Siloentleerung	43
3.4 Gewählte Methoden: Die ALE- und CEL-Methode	45
3.4.1 ALE-Methode	47
3.4.2 CEL-Methode	50
3.5 Lösungsmethoden: das implizite und explizite Verfahren	52
3.6 Kontakt	54
3.6.1 Reibungsmodell	54
3.6.2 Penalty-Methode	55

Inhalt

3.6.3	Kontaktmodellierung mit ALE und CEL	57
3.7	Materialmodelle für granulare Medien	58
3.7.1	Elasto-plastisches Stoffgesetz nach Drucker-Prager	59
3.7.2	Hypoplastisches Stoffmodell	61
4	Numerische Simulation	63
4.1	Simulation des Fülldrucks	63
4.2	Vergleich der ALE- und CEL-Methode	66
4.2.1	Numerische Umsetzung	66
4.2.2	Vergleich der Ergebnisse	67
4.3	Einfluss der Auszugsgeschwindigkeit und Auslauföffnung	72
4.4	Vergleich der Elasto-Plastizität und der Hypoplastizität	76
4.4.1	Vergleich der UMAT- und VUMAT-Subroutinen für die Hypoplastizität	76
4.4.2	Ergebnisse der Füll- und Entleerungsberechnungen beider Stoffmodelle	79
4.5	Interaktion zwischen dem Schüttgut und der Silowand	83
5	Validierung der Füll- und Entleerungsberechnungen	89
5.1	Experimentalsilos	89
5.2	Numerische Simulation der Versuche	90
5.3	Füllzustand	91
5.4	Entleerungszustand	93
6	Exzentrische Entleerung und Diskussion	97
6.1	Silogeometrien und Eingangswerte	97
6.1.1	Simulationsergebnisse: Weizen und Sand	99
6.1.2	Einfluss der Exzentrizität	108
6.1.3	Einfluss der Schlankheit	111
6.1.4	Zusammenfassung	114
6.2	Tragverhalten und Schnittgrößen der Silowand	115
6.3	Beschreibung der Druckverteilung mittels eines mathematischen Ansatzes . . .	118
6.3.1	Zweidimensionale Beschreibung der Wanddrücke	119
6.3.2	Räumliche Beschreibung der Wanddrücke	122
6.4	Entwicklung eines Ingenieurmodells für die exzentrische Entleerung	124
6.5	Auswirkung des neuen Ansatzes auf die Bemessung	129
7	Zusammenfassung und Ausblick	135
	Literatur	139
	Anhang	149