

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 Simulationismethoden 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

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