

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
1 Aufgabenstellung und Zielsetzung	1
2 Schüttgutlasten bei exzentrischer Entleerung / Stand der Erkenntnis	5
2.1 Allgemeines	5
2.2 Numerische Untersuchungen zur exzentrischen Entleerung	6
2.3 Lastansätze für die Praxis – Normen	16
2.3.1 Gegenüberstellung verschiedener Normen / Richtlinien	16
2.3.2 Vergleichsrechnung – Füllvorgang und vollexzentrische Entleerung ..	26
3 Kontinuumsmechanische Grundlagen.....	33
3.1 Allgemeines	33
3.2 Bezugssystem für den Bewegungszustand	33
3.3 Beschreibung des Verformungszustandes.....	35
3.4 Physikalische Grundgesetze der Kontinuumsmechanik bezogen auf die Eulersche Formulierung	36
4 Materialmodelle für granulare Schüttgüter.....	39
4.1 Allgemeines zum Verhalten von granularen Schüttgütern	39
4.2 Elastisch-Plastische Stoffmodelle	42
4.2.1 Grenzbedingung nach Drucker-Prager	42
4.2.2 Stoffmodell nach Lade	44
4.3 Hypoplastische Stoffmodelle.....	48
4.3.1 Stoffmodell von Kolymbas.....	48
4.3.2 Stoffmodell nach Gudehus / v. Wolffersdorff.....	53
4.4 Geschwindigkeitsabhängige Erweiterungen des Stoffmodells	56
4.5 Additiv zusammengesetztes hypoplastisches Stoffmodell	57
4.6 Vergleiche zwischen Kolymbas und Gudehus / v. Wolffersdorff	58
5 Numerische Grundlagen der Silosimulationen	61
5.1 Überblick	61
5.2 Finite-Elemente-Methode zur Beschreibung der Fließvorgänge granularer Medien	63
5.3 Erhaltung der Masse	73
5.4 Numerische Umsetzung der Stoffmodelle	74
5.4.1 Stoffmatrix nach dem Stoffmodell von Kolymbas	74
5.4.2 Stoffmatrix nach dem Stoffmodell von Gudehus / v. Wolffersdorff	76
5.5 Finite Elemente zur Berechnung räumlicher Systeme	79
5.5.1 Allgemeines.....	79
5.5.2 Schüttgut.....	83

5.5.3	Kontaktschicht Schüttgut / Wand	84
5.5.4	Wandelemente	86
5.5.5	Konvergenzbedingungen	87
6	Programmumgebung.....	89
7	Verifizierung des FE-Programms	93
7.1	Notwendigkeit	93
7.2	Programmkontrolle und Datenverifizierung	93
7.3	Wahl des Füll- und Entleerungsverfahrens	95
8	Programmoptimierung.....	99
8.1	Allgemeines	99
8.2	Zeitmessungen	101
8.3	Gleichungslöser	106
9	Füll- und Entleerungsberechnungen mit verschiedenen Finite Element Programmen – ANSYS vs. SILO-05.....	117
9.1	Einleitung	117
9.2	Ergebnisse der Füllberechnungen	121
9.3	Ergebnisse der Entleerungsberechnungen.....	125
9.3.1	Zylindrisches Silo – zentrische Entleerung rotationssymmetrischer Modelle ($b_{\text{Off}} = 0,32\text{m}$)	125
9.3.2	Spaltzelle – zentrische Entleerung ebener Modelle ($b_{\text{Off},1} = 0,32\text{m}$; $b_{\text{Off},2} = 0,64\text{m}$).....	127
9.3.3	Spaltzelle – vollexzentrische Entleerung ebener Modelle ($b_{\text{Off}} = 0,64\text{m}$).....	130
9.3.4	Rechtecksilo – zentrische Entleerung räumlicher Modelle ($b_{\text{Off},1} = 0,32\text{m}$; $b_{\text{Off},2} = 0,64\text{m}$).....	131
9.3.5	Rechtecksilo – vollexzentrische Entleerung räumlicher Modelle ($b_{\text{Off}} = 0,64\text{m}$).....	134
9.4	Zusammenfassung / Fazit.....	135
10	Räumliche Silogeometrien.....	137
10.1	Einleitung	137
10.2	Innerer Reibungswinkel und Ermittlung der Schüttgutdichte	137
10.3	Horizontaldrücke auf die Wände und resultierende Schnittgrößen	146
10.3.1	Silogeometrien und Eingangswerte.....	146
10.3.2	Ebene Vergleichsberechnungen	149
10.3.3	Simulationsergebnisse der räumlichen Systeme.....	151
10.3.4	Auswertung der Ergebnisse	157
10.3.5	Tragverhalten und Schnittgrößen der Silowand	163
10.4	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	165

11 Zusammenfassung und Ausblick.....	167
Anhang	169
A.1 Notation und mathematische Konventionen.....	169
A.2 Invariante und Deviator	169
A.3 Schreibweise der Tensoren	171
A.4 Parameter für die Vergleichsrechnungen im Kapitel 4.6	172
A.5 CSR-Format.....	173
A.6 Beispiele unter Verwendung des Bandbreitenoptimierers.....	174
A.7 Schnittgrößen für eine Wand (Auslauföffnung)	175
Nomenklatur	179
Literaturverzeichnis	183