

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>XI</b>
<b>1. Einführung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Häufig auftretende Probleme mit Schüttgütern .....	1
1.2 Meilensteine der Schüttguttechnik .....	4
<b>2 Grundlagen.....</b>	<b>9</b>
2.1 Partikel oder Kontinuum?.....	9
2.2 Kräfte und Spannungen .....	10
2.3 Spannungsverhältnisse in Schüttgütern .....	12
2.3.1 Einführung des Mohrschen Spannungskreises .....	13
2.3.2 Berechnungen zum Mohrschen Spannungskreis .....	16
2.4 Schüttgutdichte .....	20
2.5 Elastische und plastische Verformung.....	22
2.6 Haftkräfte.....	24
2.7 Einfluss der Partikelgröße auf das Verhalten des Schüttgutes.....	32
<b>3 Fließeigenschaften von Schüttgütern .....</b>	<b>35</b>
3.1 Einachsiger Druckversuch als Modell .....	35
3.1.1 Verfestigung von Schüttgütern .....	35
3.1.2 Zeitverfestigung.....	38
3.1.3 Darstellung mit Spannungskreisen .....	39
3.1.4 Kennzahlen zur Charakterisierung der Fließfähigkeit .....	42
3.2 Prinzip der Messung mit Schergeräten .....	47
3.2.1 Messprozedur .....	48
3.2.3 Fließort und Fließeigenschaften .....	56
3.2.4 Zeitverfestigung (Caking).....	67
3.3 Wandreibung .....	71
3.3.1 Messprozedur für Wandfließorte.....	72
3.3.2 Wandfließort und Wandreibungswinkel.....	73
3.3.3 Zeitwandfließort, statische Wandreibung .....	75

<b>4 Praktisches Messen von Fließeigenschaften .....</b>	<b>79</b>
4.1 Messungen mit Schergeräten .....	79
4.1.1 Messung von Fließorten mit dem Jenike-Schergerät .....	80
4.1.2 Messung von Fließorten mit dem Ringschergerät .....	88
4.1.3 Messung der Zeitverfestigung .....	92
4.1.4 Messung der kinematischen Wandreibung .....	94
4.1.5 Messung der statischen Wandreibung .....	97
4.1.6 Abriebmessung .....	98
4.1.6 Messung der Verdichtbarkeit .....	101
4.2 Festlegen der Spannungen .....	103
4.2.1 Fließorte (Fließfähigkeit) .....	103
4.2.2 Zeitfließorte (Fließfähigkeit bei Zeitverfestigung) .....	112
4.2.3 Wandfließorte (Wandreibung) .....	113
4.3 Anwendungsbezogene Messung von Fließeigenschaften .....	114
4.3.1 Vergleichsmessungen .....	114
4.3.2 Verfahrenstechnische Siloauslegung .....	115
<b>5 Anmerkungen zum realen Verhalten von Schüttgütern .....</b>	<b>117</b>
5.1 Anisotropie und Einfluss der Verformung .....	117
5.1.1 Spannungen .....	119
5.1.2 Schüttgutdichte .....	129
5.1.3 Druckfestigkeit (Schüttgutfestigkeit) .....	130
5.2 Scherverformung, Scherzonen, Lokalisation .....	133
5.2.1 Idealisierung: Einfaches Scheren und reines Scheren .....	133
5.2.2 Scherzonen und Scherbänder .....	136
5.2.3 Dilatanz .....	144
5.2.4 Stationäres Fließen und Dilatanz beim Messen von Fließeigenschaften .....	148
5.3 Fließorte .....	151
5.3.1 Anscherpunkt, Abscherpunkte und Spannungskreise .....	152
5.3.2 Zugfestigkeit und Kohäsion .....	155
5.3.3 Verhalten bei sehr kleinen Spannungen .....	160
5.4 Einfluss der Geschwindigkeit .....	164
<b>6 Überblick über Messverfahren und Messgeräte .....</b>	<b>167</b>
6.1 Einflüsse auf das Messergebnis .....	167
6.1.1 Prozedur und Hauptspannungen .....	167
6.1.2 Spannungen in der Messebene .....	171
6.2 Anforderungen an Messgeräte für Fließeigenschaften .....	172
6.3 Messverfahren (Übersicht) .....	173
6.3.1 Trichter .....	175
6.3.2 Böschungswinkel .....	176

6.3.3 Lawinenbildung (Avalanching) .....	178
6.3.4 Imse-Test .....	179
6.3.5 Fließfähigkeitsindex nach Carr.....	180
6.3.6 Rührer .....	181
6.3.7 Verdichtbarkeitsmessung.....	182
6.3.8 Cohesion Tester, Flowability Test.....	183
6.3.9 Penetration Test .....	185
6.3.10 Einachsiger Druckversuch .....	185
6.3.11 Monoaxial Shear Test.....	186
6.3.12 Powder Bed Tester mit Zugfestigkeitsmessung .....	187
6.3.13 Einachsige Zugfestigkeitsmessung .....	188
6.3.14 Zugfestigkeitsmessung mit Gasströmung.....	189
6.3.15 Johanson Hang-up Indicizer™, ähnliche Messprinzipien ..	190
6.3.16 Quality Control Tester .....	192
6.3.17 Zweiachsiger Druckversuch (Biaxial compression test) ...	193
6.3.18 Jenike-Schergerät.....	194
6.3.19 Torsionsschergeräte .....	195
6.3.20 Ringschergeräte .....	196
6.4 Bemerkungen zu Aussagekraft und Genauigkeit.....	197
6.5 Messung von Haftkräften .....	200
6.6 Zusammenfassung .....	202
<b>7 Spezielle Eigenschaften und Einflüsse auf das Fließverhalten .....</b>	<b>203</b>
7.1 Effekte beim Fließen von Schüttgütern .....	203
7.1.1 Slip-Stick-Effekt durch Zeit- und Geschwindigkeitsabhängigkeit .....	203
7.1.2 Wegabhängigkeit der Wandreibung .....	213
7.2 Einflüsse auf das Fließverhalten .....	215
7.2.1 Partikelgrößenverteilung .....	215
7.2.2 Fließhilfsmittel .....	215
7.2.3 Flüssigkeit, Feuchtigkeit.....	220
7.2.4 Gasströmung.....	223
7.2.5 Partikelform.....	227
<b>8 Beispiele gemessener Fließeigenschaften .....</b>	<b>237</b>
8.1 Fließhilfsmittel.....	237
8.2 Feuchtigkeit .....	239
8.3 Temperatur.....	241
8.4 Zeitverfestigung.....	242
8.5 Feinheit .....	244
8.6 Abrieb .....	246
8.7 Schüttgutedichte .....	247

8.8	Spannungsabhängigkeit des Wandreibungswinkels .....	249
8.9	Wandreibungswinkel in Abhängigkeit vom Wandmaterial.....	251
<b>9</b>	<b>Spannungen im Schüttgut .....</b>	<b>255</b>
9.1	Spannungsverhältnisse bei der Lagerung in Silos .....	255
9.1.1	Horizontallastverhältnis.....	255
9.1.2	Spannungsverläufe .....	258
9.2	Berechnungsverfahren (Übersicht).....	263
9.2.1	Berechnung der Spannungen im Siloschaft.....	265
9.2.2	Weitere Anwendungen der Janssen-Gleichung .....	268
9.2.3	Schüttguteigenschaften zur Spannungsberechnung.....	272
9.2.4	Abschätzung der Spannungen an der Auslauföffnung .....	275
9.2.5	Spannungsberechnung für das Gesamtsystem.....	276
9.3	Belastung von Ausraggeräten.....	277
9.3.1	Vertikalspannung an der Auslauföffnung.....	278
9.3.2	Abschätzen von Abzugskräften .....	280
9.4	Einflüsse auf die Spannungsverteilung.....	284
9.4.1	Lokale Querschnittsänderungen .....	284
9.4.2	Exzentrisches Entleeren.....	291
<b>10</b>	<b>Verfahrenstechnische Siloauslegung.....</b>	<b>295</b>
10.1	Fließprofile: Massenfluss und Kernfluss .....	295
10.2	Probleme beim Lagern von Schüttgütern in Silos .....	297
10.3	Das Auslegungsverfahren von Jenike.....	299
10.3.1	Auslegung von Massenflusssilos.....	299
10.3.2	Auslegung von Kernflusssilos .....	310
10.4	Anwendungen der Ergebnisse der Siloauslegung.....	314
10.5	Diagramme zur Siloauslegung.....	316
<b>11</b>	<b>Silogestaltung .....</b>	<b>321</b>
11.1	Einfluss der Fließeigenschaften auf die Silogestaltung .....	321
11.2	Trichtergestaltung .....	322
11.2.1	Trichterformen.....	322
11.2.2	Übergänge und Wandgestaltung.....	325
11.2.3	Mehrere Auslauföffnungen.....	328
11.2.4	Sonderfälle: Unterschiedliche Wandneigungswinkel.....	328
11.3	Einbauten .....	330
11.3.1	Verdrängende Einbauten .....	331
11.3.2	Trichterförmige Einbauten .....	334
11.3.3	Rohrförmige Einbauten .....	335

<b>12 Schüttgutaustrag</b> .....	<b>341</b>
12.1 Freier Auslauf und maximaler Massenstrom.....	341
12.1.1 Abschätzung des Auslaufmassenstroms grobkörniger Schüttgüter.....	343
12.1.2 Auslaufmassenstrom feinkörniger Schüttgüter.....	344
12.2 Austraghilfen .....	349
12.2.1 Pneumatische Austraghilfen .....	349
12.2.2 Mechanische Austraghilfen .....	352
12.2.3 Einsatz von Austraghilfen .....	354
12.3 Austraggeräte.....	355
12.3.1 Regeln zur Gestaltung hinsichtlich Massenfluss .....	355
12.3.2 Übersicht.....	359
12.4 Einsatz von Austraghilfen und Austraggeräten .....	379
<b>13 Entmischung</b> .....	<b>383</b>
13.1 Entmischungsmechanismen.....	383
13.1.1 Siebeffekt und andere Entmischungsmechanismen auf Böschungen .....	384
13.1.2 Perkolation bei Verformung des Schüttgutes .....	386
13.1.3 Flugbahn und Gasströmung.....	388
13.2 Reduzieren der Entmischung beim Lagern von Schüttgütern ...	392
13.2.1 Veränderung des Schüttgutes .....	393
13.2.2 Optimieren von Einfüllprozessen .....	394
13.2.3 Zusammenführen des entmischten Schüttgutes.....	398
13.3 Probenahme .....	405
13.4 Schlussfolgerungen.....	406
<b>14 Erschütterungen und Schwingungen in Silos</b> .....	<b>407</b>
14.1 Phänomen .....	407
14.2 Erschütterungen als Ergebnis schlagartig bewegter Schüttgutmassen .....	408
14.3 Schlagartiges und pulsierendes Fließen durch Slip-Stick.....	411
14.4 Scherzonen im Silo.....	411
14.5 Erschütterungen durch Slip-Stick-Reibung .....	415
14.5.1 Scherzonen im fließenden Schüttgut .....	415
14.5.2 Veränderliche tote Zonen (Kernfluss) .....	421
14.5.3 Fließen an der Silowand .....	425
14.5.4 Kombinationen verschiedener Mechanismen.....	431
14.6 Erschütterungen durch andere Ursachen .....	431
14.6.1 Große Massenströme bei kleinen Auslauföffnungen.....	431
14.6.2 Zyklische Anregung durch das Austraggerät .....	432
14.6.3 Zusammenbrechende Brücken und Schächte .....	432

14.7 Maßnahmen zur Reduzierung von Silobeben und Silohupen....	433
14.7.1 Verringerung der beschleunigten Masse .....	434
14.7.2 Regelmäßiges Auslösen von kleinen Erschütterungen.....	436
14.7.3 Erhöhung der Wandrauigkeit im Siloschaft .....	437
14.7.4 Vergleichmäßigung des Fließprofils .....	438
14.7.5 Umwandeln von Kernfluss in Massenfluss .....	439
<b>15 Beispielaufgaben mit Lösungen.....</b>	<b>441</b>
15.1 Allgemeine Hinweise zu den Aufgaben .....	441
15.2 Aufgaben und Lösungen.....	441
Aufgabe 1: Spannungen im Siloschaft .....	441
Aufgabe 2: Maximale Spannung im Massenflusssilo (Abrieb).....	443
Aufgabe 3: Entleerungsrohr.....	444
Aufgabe 4: Abzugskraft .....	446
Aufgabe 5: Presse .....	447
Aufgabe 6: Spannungen bei Kombination von Behältern .....	449
Aufgabe 7: Spannungen in BigBags und gestapelten Säcken .....	451
Aufgabe 8: Auslaufmassenstrom.....	452
Aufgabe 9: Auswahl eines Wandmaterials für Massenfluss .....	453
Aufgabe 10: Auslegung eines Massenflusssilos.....	454
Aufgabe 11: Auslegung eines Kernflusssilos .....	458
Aufgabe 12: Auslegung eines Silos bei Zeitverfestigung.....	461
<b>Symbolverzeichnis .....</b>	<b>467</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>471</b>
<b>Sachverzeichnis .....</b>	<b>501</b>