

	DIN EN 1991-4	
ICS 91.010.30; 91.040.01	Entwurf	Einsprüche bis 2024-04-02 Vorgesehen als Ersatz für DIN EN 1991-4:2010-12 und DIN EN 1991-4 Berichtigung 1:2013-08
Eurocode 1 – Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 4: Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter; Deutsche und Englische Fassung prEN 1991-4:2024 Eurocode 1 – Actions on structures – Part 4: Silos and tanks; German and English version prEN 1991-4:2024 Eurocode 1 – Actions sur les structures – Partie 4: Silos et réservoirs; Version allemande et anglaise prEN 1991-4:2024 Anwendungswarnvermerk Dieser Entwurf mit Erscheinungsdatum 2024-02-02 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt. Weil das beabsichtigte Dokument von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs besonders zu vereinbaren. Stellungnahmen werden erbeten – vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben; – oder als Datei per E-Mail an nabau@din.de möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden; – oder in Papierform an den DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau), 10772 Berlin oder Am DIN-Platz, Burggrafenstr. 6, 10787 Berlin. Es wird gebeten, mit den Kommentaren zu diesem Entwurf jegliche relevanten Patentrechte, die bekannt sind, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen. Gesamtumfang 335 Seiten DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau)		

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (prEN 1991-4:2024) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 250 „Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau“ erarbeitet, dessen Sekretariat von BSI (Vereinigtes Königreich) gehalten wird. CEN/TC 250 ist für alle Eurocodes des konstruktiven Ingenieurbaus zuständig. Die Verantwortung für alle Angelegenheiten der Tragwerks- und geotechnischen Planung wurde dem CEN/TC 250 von CEN übertragen.

Das zuständige nationale Normungsgremium ist der Arbeitsausschuss NA 005-51-02 AA „Einwirkungen auf Bauten (SpA zu CEN/TC 250/SC 1)“ im DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau).

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung beigefügt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen Text.

Aktuelle Informationen zu diesem Dokument können über die Internetseiten von DIN (www.din.de) durch eine Suche nach der Dokumentennummer aufgerufen werden.

Änderungen

Gegenüber DIN EN 1991-4:2010-12 und DIN EN 1991-4 Berichtigung 1:2013-08 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) inhaltliche Überarbeitung des Dokuments;
- b) redaktionelle Überarbeitung des Dokuments.

<i>Titel de:</i>	Eurocode 1 — Einwirkungen auf Tragwerke — Teil 4: Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter
<i>Titel en:</i>	Eurocode 1 — Actions on structures — Part 4: Silos and tanks
<i>Titel fr:</i>	Eurocode 1 — Actions sur les structures — Partie 4: Silos et réservoirs

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	8
0 Einleitung	9
1 Anwendungsbereich	11
1.1 Anwendungsbereich von EN 1991-4	11
1.2 Annahmen	11
1.3 Einschränkungen bei Silos	11
1.3.1 Geometrische Einschränkungen	11
1.3.2 Einschränkungen hinsichtlich der gelagerten Schüttgüter	14
1.3.3 Einschränkungen hinsichtlich der Betriebsbedingungen beim Füllen und Entleeren	15
1.4 Einschränkungen für Flüssigkeitsbehälter	16
2 Normative Verweisungen	17
3 Begriffe und Symbole	17
3.1 Allgemeines	17
3.2 Begriffe	17
3.3 Symbole und Abkürzungen	26
3.3.1 Lateinische Großbuchstaben	26
3.3.2 Lateinische Kleinbuchstaben	27
3.3.3 Griechische Großbuchstaben	30
3.3.4 Griechische Kleinbuchstaben	30
4 Klassifizierung von Silos	32
4.1 Anforderungsklassen für Silos	32
4.2 Siloverwendungsklassen	34
5 Bemessungssituationen und Modellierung der Einwirkungen	34
5.1 Allgemeines	34
5.2 Darstellung von Lasten auf Silos	34
5.2.1 Allgemeines	34
5.2.2 Darstellung von Lasten auf Siloinnenflächen	35
5.2.3 Einstufung der Einwirkungen auf Silos	35
5.2.4 Bewertung von auf Silos wirkenden Lasten	36
5.2.5 Grundlegende und spezielle Silolastfälle	37
5.2.6 Bemessungssituationen für spezielle Konstruktionsformen von Silos	38
5.3 Bewertung der Füll- und Entleerungsbedingungen von Silos	39
5.3.1 Allgemeines	39
5.3.2 Vorhersage von symmetrischen Fließprofilen	42
5.3.3 Bewertung der Exzentrizitäten beim Befüllen und Entleeren	44
5.3.4 Silos für die Lagerung von staubförmigem Schüttgut	47
5.4 Grundlegende Silolastfälle (SFLC)	47
5.4.1 Übliche Versagensformen	47
5.4.2 Exzentrizitätsgrenzen für grundlegende Silolastfälle	47
5.4.3 Unsicherheit und Veränderlichkeit von Schüttgutkennwerten	48
5.4.4 Arten von grundlegenden Silolastfällen	48
5.5 Spezielle Silolastfälle (SSLCs)	50
5.5.1 Allgemeines	50
5.5.2 Situationen, die spezielle Silolastfälle erfordern	50
5.5.3 Asymmetrische Entleerung	51

5.5.4	Exzentrizitätsgrenzen.....	54
5.5.5	Lasten durch große Exzentrizitäten beim Befüllen von schlanken und sehr schlanken jeweils kreisförmigen Silos.....	55
5.5.6	Große Exzentrizitäten beim Befüllen von kreisförmigen niedrigen Silos und kreisförmigen Silos mit mittlerer Schlankheit.....	55
5.5.7	Lasten durch mittlere Exzentrizitäten beim Entleeren von schlanken und sehr schlanken jeweils kreisförmigen Silos.....	55
5.5.8	Lasten durch mittlere Exzentrizitäten beim Entleeren von kreisförmigen niedrigen Silos und kreisförmigen Silos mit mittlerer Schlankheit.....	56
5.5.9	Schlotfluss mit großer Exzentrizität in kreisförmigen und rechteckigen Silos	56
5.5.10	Silos mit fluidisiertem Schüttgut	56
5.5.11	Temperaturunterschiede zwischen Schüttgut und Silokonstruktion	57
5.5.12	Unterdruck durch unzureichende Belüftung.....	57
5.5.13	Lasten auf vertikale Wände von besonderen rechteckigen Silos	57
5.5.14	Innerer invertierter Kegel	57
5.5.15	Schiefe konische Trichter.....	58
5.5.16	Exzentrischer Schlotfluss in steilen konzentrischen oder schiefen Trichtern.....	58
5.5.17	Prinzipien für die Bemessung von Silos für Staubexplosionen.....	58
5.6	Lastmodifikationsfaktoren für die direkte Anwendung bei der Ermittlung von Lasten	59
5.7	Darstellung der auf Flüssigkeitsbehälter wirkenden Lasten.....	60
6	Schüttgutkennwerte.....	61
6.1	Allgemeines	61
6.1.1	Fließfähigkeitskategorie	61
6.1.2	Schüttgutkennwerte für Bemessungsberechnungen.....	61
6.1.3	Wandrauigkeitsklasse	61
6.1.4	Charakteristische Werte für Materialkennwerte.....	63
6.1.5	Anwendungen des effektiven Elastizitätsmoduls.....	64
6.2	Schüttgutkennwerte: Kurzbeschreibung und Hintergrund	65
6.2.1	Allgemeines	65
6.2.2	Ermittlung geeigneter Schüttgutkennwerte für die Bemessung	67
6.3	Messung der Schüttgutkennwerte in Versuchen	67
6.3.1	Experimentelle Ermittlung (Messverfahren).....	67
6.3.2	Bestimmung der Schüttgutwichte γ	67
6.3.3	Wandreibungskoeffizient μ	68
6.3.4	Winkel der inneren Reibung ϕ	68
6.3.5	Horizontaldruckverhältnis K	68
6.3.6	Kohäsion c	69
6.3.7	Porosität n	69
7	Symmetrische Lasten auf vertikale Wände (grundlegende Silolastfälle)	70
7.1	Allgemeines	70
7.2	Schlanke und sehr schlanke Silos ($h_c/d_c \geq 2,0$)	71
7.2.1	Symmetrische Fülllasten auf die vertikalen Wände von schlanken und sehr schlanken Silos	71
7.2.2	Symmetrische Entleerungslasten auf die vertikalen Wände von schlanken und sehr schlanken, von oben entleerten Silos	73
7.2.3	Symmetrische Entleerungslasten auf die vertikalen Wände von schlanken und sehr schlanken Silos bei Massenfluss.....	73
7.2.4	Symmetrische Entleerungslasten auf die vertikalen Wände von schlanken und sehr schlanken Silos bei gemischtem Fließen.....	74
7.3	Niedrige Silos und Silos mit mittlerer Schlankheit ($0,4 \leq h_c/d_c < 2,0$)	77
7.3.1	Symmetrische Fülllasten auf die vertikalen Wände von niedrigen Silos und Silos mit mittlerer Schlankheit	77
7.3.2	Symmetrische Entleerungslasten auf die vertikalen Wände von schlanken und sehr schlanken Silos bei innerem Schlotfluss oder Entleerung von oben	79

7.3.3	Symmetrische Entleerungslasten auf die vertikalen Wände niedrigen Silos und Silos mit mittlerer Schlankheit bei Massenfluss oder gemischtem Fließen	79
7.4	Stützwandsilos ($h_c/d_c < 0,4$)	80
7.4.1	Fülllasten auf vertikale Wände von Stützwandsilos.....	80
7.4.2	Entleerungslasten auf vertikale Wände von Stützwandsilos	81
8	Spezielle Silolastfälle für vertikale Wände	82
8.1	Allgemeines	82
8.2	Durch Ersatzlasten dargestellte unsymmetrische Druckverhältnisse in schlanken und sehr schlanken Silos	82
8.2.1	Allgemeines	82
8.2.2	Ersatzlast: dickwandige kreisförmige Silos ($d_c/t < 200$)	82
8.2.3	Ersatzlast: dünnwandige kreisförmige Silos ($d_c/t \geq 200$)	85
8.3	Große Exzentrizitäten beim Befüllen von niedrigen Silos und Silos mit mittlerer Schlankheit	86
8.4	Schlotfluss in allen Silos mit großer Fließkanalexzentrizität.....	87
8.4.1	Allgemeines	87
8.4.2	Schlotfluss beim exzentrischen Entleeren von sehr schlanken und schlanken kreisförmigen Silos.....	88
8.4.3	Große Exzentrizitäten beim Entleeren von kreisförmigen niedrigen Silos und kreisförmigen Silos mit mittlerer Schlankheit.....	92
8.4.4	Lasten beim Entleeren mit großer Exzentrizität bei rechteckigen Silos	92
8.5	Silos mit fluidisiertem Schüttgut	93
8.5.1	Allgemeines	93
8.5.2	Lasten in Silos zur Lagerung von fluidisiertem Schüttgut.....	94
8.6	Temperaturunterschiede zwischen Schüttgut und Silokonstruktion.....	94
8.6.1	Allgemeines	94
8.6.2	Lasten infolge einer Abnahme der atmosphärischen Umgebungstemperaturen oder des Aufquellens des Produkts.....	95
8.6.3	Durch das Befüllen eines Silos mit heißem Schüttgut entstehende Drücke	96
8.7	Unterdruck durch unzureichende Belüftung	96
8.8	Lasten auf vertikale Wände von besonderen rechteckigen Silos	96
8.8.1	Rechtecksilos.....	96
8.8.2	Rechteckige Silos mit inneren Zuggliedern	97
8.8.3	Rechteckige Silos mit flexiblen Wänden	97
9	Symmetrische Lasten auf Siloböden und -trichter (grundlegende Silolastfälle)	99
9.1	Allgemeines	99
9.1.1	Physikalische Kennwerte	99
9.1.2	Allgemeine Regelungen.....	102
9.2	Steile Trichter	103
9.2.1	Mobilisierte Reibung.....	103
9.2.2	Fülllasten bei symmetrischen Bedingungen	103
9.2.3	Entleerungslasten bei symmetrischen Bedingungen.....	104
9.3	Flache Trichter	105
9.3.1	Mobilisierte Reibung.....	105
9.3.2	Fülllasten	106
9.3.3	Entleerungslasten.....	106
9.4	Waagerechte Siloböden.....	106
9.4.1	Vertikaldrücke auf waagerechte Siloböden in schlanken Silos.....	106
9.4.2	Vertikaldruckverteilung auf dem waagerechten Boden eines niedrigen Silos oder eines Silos mittlerer Schlankheit.....	107
10	Spezielle Silolastfälle für Trichter und Siloböden.....	108
10.1	Kreisförmige Silos mit innerem invertiertem Kegel	108
10.1.1	Allgemeines	108

10.1.2	Drücke auf die vertikale Wand und den Boden des Silos	109
10.1.3	Symmetrische Lasten auf den Kegel.....	110
10.1.4	Asymmetrische Lasten auf den Kegel	111
10.2	Schiefe konische Trichter.....	113
10.3	Entleerungslasten bei exzentrischem Schlotfluss in steilen konzentrischen oder schiefen Trichtern.....	115
10.3.1	Allgemeines	115
10.3.2	Exzentrisches Entleeren bei Schlotfluss in steilen konischen Trichtern.....	115
10.4	Trichter in Silos mit Gebläse	116
11	Lasten auf Flüssigkeitsbehälter	116
11.1	Allgemeines	116
11.2	Lasten infolge gelagerter Flüssigkeiten	117
11.3	Kennwerte der Flüssigkeiten.....	117
11.4	Lasten durch Luft-, Gas- oder Dampfdruck.....	117
11.5	Temperaturen des Flüssigkeitsbehälterinhalts.....	118
11.6	Bewertung von Ermüdungslastfällen.....	118
Anhang A (informativ)	Einwirkungen und Kombinationen von Einwirkungen auf Silos.....	119
A.1	Anwendung dieses Anhangs.....	119
A.2	Anwendungsbereich.....	119
A.3	Allgemeines	119
A.4	Einwirkungen auf Silos.....	120
A.4.1	Eigengewicht	120
A.4.2	Fülllasten	120
A.4.3	Entleerungslasten	120
A.4.4	Nutzlasten	120
A.4.5	Schneelasten.....	120
A.4.6	Windlasten.....	120
A.4.7	Temperatureinwirkungen	121
A.4.8	Zwangsverformungen.....	121
A.4.9	Seismische Lasten	121
A.4.10	Außergewöhnliche Einwirkungen	122
A.4.11	Einwirkungen während der Bauausführung.....	122
A.5	Geplante Nutzungsdauer	122
A.6	Bemessungssituationen für Silos.....	122
Anhang B (informativ)	Einwirkungen und Kombinationen von Einwirkungen auf Flüssigkeitsbehälter.....	124
B.1	Anwendung dieses Anhangs.....	124
B.2	Anwendungsbereich.....	124
B.3	Allgemeines	124
B.4	Einwirkungen auf Flüssigkeitsbehälter	125
B.4.1	Eigengewicht	125
B.4.2	Flüssigkeitsbehälterlasten.....	125
B.4.3	Nutzlasten	125
B.4.4	Schneelasten.....	125
B.4.5	Windlasten.....	126
B.4.6	Lasten aus Temperatur(-änderung).....	126
B.4.7	Lasten aus vibrierenden Maschinen.....	126
B.4.8	Zwangsverformungen.....	127
B.4.9	Seismische Lasten	127
B.4.10	Prüflasten.....	127
B.4.11	Außergewöhnliche Einwirkungen	128
B.4.12	Einwirkungen während der Bauausführung.....	128
B.5	Geplante Nutzungsdauer	128

Anhang C (normativ) Angabe von Schüttgutkennwerten.....	129
C.1 Anwendung dieses Anhangs	129
C.2 Anwendungsbereich.....	129
C.3 Angegebene Werte	129
Anhang D (normativ) Messung von Schüttgutkennwerten für die Ermittlung von Silolasten.....	134
D.1 Anwendung dieses Anhangs	134
D.2 Anwendungsbereich.....	134
D.3 Klassifizierung von granularen Materialien.....	134
D.3.1 Allgemeines	134
D.3.2 Fließfähigkeitskategorie A: grobe granulare Materialien, die nicht zu Kohäsion neigen.....	134
D.3.3 Fließfähigkeitskategorie B: Schüttgüter, die bei der Konsolidierung zur Ausbildung leichter Kohäsion neigen, die beim Fließen unter Scherdehnung verschwindet.....	135
D.3.4 Fließfähigkeitskategorie C: alle anderen relativ isotropen Schüttgüter, die signifikante Kohäsion ausbilden	135
D.3.5 Fließfähigkeitskategorie D: stark anisotrope Schüttgüter	135
D.4 Verhalten von Schüttgütern unterschiedlicher Fließfähigkeitskategorien in Silos	135
D.5 Gegenstand der Verfahren für die experimentelle Bestimmung von Kennwerten	137
D.6 Anwendung	137
D.7 Symbole	138
D.8 Definitionen.....	138
D.8.1 sekundärer Parameter	138
D.8.2 Probenahme	138
D.8.3 Referenzspannung	139
D.9 Probenahme und Probenvorbereitung.....	139
D.10 Schüttgutwichte γ	140
D.10.1 Kurzbeschreibung	140
D.10.2 Gerät	140
D.10.3 Durchführung.....	141
D.11 Wandreibung.....	141
D.12 Koeffizient der Wandreibung μ für die Ermittlung der Lasten (Wandreibungskoeffizient)..	142
D.12.1 Kurzbeschreibung	142
D.12.2 Gerät	142
D.12.3 Durchführung.....	142
D.13 Wandreibungswinkel ϕ_{wh} zur Beurteilung des Fließverhaltens.....	143
D.14 Horizontaldruckverhältnis K	143
D.14.1 Direkte Messung	143
D.14.2 Indirekte Messung.....	145
D.15 Festigkeitsparameter: Kohäsion c und Winkel der inneren Reibung ϕ_i	145
D.15.1 Direkte Messung	145
D.15.2 Indirekte Messung.....	148
D.16 Böschungswinkel ϕ_r	149
D.17 Effektiver Elastizitätsmodul E_s	149
D.17.1 Direkte Messung	149
D.17.2 Indirekte Abschätzung.....	152
D.18 Bestimmung der oberen und unteren charakteristischen Werte von Schüttgutparametern und Ermittlung des Umrechnungsfaktors a	153
D.18.1 Kurzbeschreibung	153
D.18.2 Methoden zur Abschätzung.....	154
Anhang E (normativ) Abschätzung der Schüttgutkennwerte für bestimmte Bedingungen	156
E.1 Anwendung dieses Anhangs	156
E.2 Anwendungsbereich.....	156
E.3 Abschätzung des Wandreibungskoeffizienten für eine gewellte Wand	156
E.4 Innere Reibung und Wandreibung eines grobkörnigen Schüttgutes ohne Feinanteile	157

E.5	Ermittlung der effektiven Wandreibung für Silowände mit inneren Aussteifungselementen	158
Anhang F (informativ) Einwirkungen infolge von Staubexplosionen.....		159
F.1	Anwendung dieses Anhangs.....	159
F.2	Anwendungsbereich.....	159
F.3	Explosionsfähige Stäube und ihre Kennwerte.....	159
F.4	Zündquellen	160
F.5	Schutzmaßnahmen	160
F.6	Bemessung der Bauteile	161
F.7	Bemessung für die Folgen einer Staubexplosion.....	161
Anhang G (informativ) Ablaufdiagramme als Hilfe für die Anwendung dieser Norm		162
G.1	Anwendung dieses Anhangs.....	162
G.2	Anwendungsbereich.....	162
Literaturhinweise.....		169

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (prEN 1991-4:2024) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 250 „Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau“ erarbeitet, dessen Sekretariat von BSI gehalten wird. CEN/TC 250 ist für alle Eurocodes des konstruktiven Ingenieurbaus zuständig. Die Verantwortung für alle Angelegenheiten der Tragwerks- und geotechnischen Planung wurde dem CEN/TC 250 von CEN übertragen.

Dieses Dokument ist derzeit zur CEN-Umfrage vorgelegt.

Dieses Dokument wird EN 1991-4:2006 und AC:2012 ersetzen.

Die erste Generation der EN Eurocodes wurde zwischen den Jahren 2002 und 2007 veröffentlicht. Dieses Dokument wurde als Teil der zweiten Generation der Eurocodes im Rahmen des Mandats M/515 erarbeitet, das die Europäische Kommission und die Europäische Freihandelsassoziation CEN erteilt haben.

Die Eurocodes wurden erarbeitet, um in Verbindung mit einschlägigen Ausführungs-, Werkstoff-, Produkt- und Prüfnormen angewendet zu werden und um Anforderungen an Ausführung, Werkstoffe, Produkte und Prüfung zu identifizieren, auf denen die Eurocodes beruhen.

Die Eurocodes erkennen die Verantwortlichkeit aller Mitgliedstaaten an und wahren deren Recht, sicherheitsbezogene Werte auf nationaler Ebene in Nationalen Anhängen festzulegen.

0 Einleitung

0.1 Einleitung zu den Eurocodes

Die Eurocodes des konstruktiven Ingenieurbaus umfassen die folgenden Normen, die in der Regel aus mehreren Teilen bestehen:

- EN 1990, *Eurocode — Grundlagen der Planung von Tragwerken und geotechnischen Bauwerken*
- EN 1991, *Eurocode 1 — Einwirkungen auf Tragwerke*
- EN 1992, *Eurocode 2 — Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken*
- EN 1993, *Eurocode 3 — Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten*
- EN 1994, *Eurocode 4 — Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton*
- EN 1995, *Eurocode 5 — Bemessung und Konstruktion von Holzbauten*
- EN 1996, *Eurocode 6 — Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten*
- EN 1997, *Eurocode 7 — Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik*
- EN 1998, *Eurocode 8 — Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben*
- EN 1999, *Eurocode 9 — Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken*
- Neue Teile befinden sich in der Entwicklung, z. B. Eurocode für die Bemessung von tragenden Konstruktionen aus Glas

Die Eurocodes sind für die Anwendung durch Tragwerksplaner, Bauherren, Hersteller, Ausführende, zuständige Behörden (bei der Wahrnehmung ihrer Aufgaben in Übereinstimmung mit nationalen oder internationalen Vorschriften), Lehrkräfte, Softwareentwickler und Normenausschüsse, in denen verwandte Produktnormen, Prüfnormen und Ausführungsnormen erarbeitet werden, gedacht.

ANMERKUNG Einige Entwurfs- und Bemessungsaspekte werden am zutreffendsten von den zuständigen Behörden festgelegt oder können, sofern keine Festlegungen getroffen wurden, für ein bestimmtes Bauvorhaben zwischen den beteiligten Parteien wie Tragwerksplanern und Bauherren vereinbart werden. In den Eurocodes werden solche Aspekte durch ausdrückliche Bezugnahme auf die zuständigen Behörden und die beteiligten Parteien gekennzeichnet.

0.2 Einleitung zu der Normenreihe EN 1991

(1) Die Normenreihe EN 1991 gibt die Einwirkungen an, die bei der Tragwerksplanung von Hochbauten, Brücken und anderen Ingenieurbauwerken oder deren Teilen, einschließlich Hilfstragwerken, in Zusammenhang mit EN 1990 und den anderen Eurocodes zu berücksichtigen sind.

(2) Die Normenreihe EN 1991 deckt nicht die besonderen Anforderungen an Einwirkungen ab, welche für die Erdbebenbemessung notwendig sind. Festlegungen im Zusammenhang mit derartigen Anforderungen werden in EN 1998 (alle Teile) getroffen und ergänzen EN 1991 in konsistenter Weise.

(3) Die Normenreihe EN 1991 ist auch anwendbar auf bestehende Tragwerke hinsichtlich:

- der Beurteilung ihres Tragverhaltens;
- der Bemessung von Instandsetzungs-, Ertüchtigungs- und Änderungsmaßnahmen;

— der Beurteilung von Nutzungsänderungen.

ANMERKUNG In diesen Fällen können zusätzliche oder abgeänderte Festlegungen notwendig sein.

(4) Die Normenreihe EN 1991 ist auch für die Planung von Tragwerken mit Baustoffen oder Einwirkungen anwendbar, die nicht in den Anwendungsbereich der anderen Eurocodes fallen.

ANMERKUNG In diesem Fall können zusätzliche oder abgeänderte Festlegungen notwendig sein.

0.3 Einleitung zu EN 1991-4

EN 1991-4 enthält Hinweise für die Beurteilung von Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter für die Tragwerksplanung.

0.4 In den Eurocodes verwendete Verbformen

Das Verb „muss“ beschreibt eine Anforderung, die zwingend zu befolgen ist, und von der bei Anwendung der Eurocodes keine Abweichung zulässig ist.

Das Verb „sollte“ beschreibt eine streng empfohlene Auswahl oder Vorgehensweise. In Abhängigkeit von nationalen Regeln und/oder relevanten Vertragsbestimmungen können alternative Lösungen verwendet/angenommen werden, wenn sie technisch gerechtfertigt sind.

Das Verb „darf“ beschreibt eine erlaubte Vorgehensweise innerhalb der Anwendungsgrenzen der Eurocodes.

Das Verb „kann“ beschreibt Möglichkeiten und Fähigkeiten; es wird für Tatsachenfeststellungen und Erklärungen verwendet.

0.5 Nationaler Anhang zu prEN 1991-4

Nationale Festlegungen sind in diesem Dokument erlaubt, insofern dies ausdrücklich in den Anmerkungen festgelegt ist. Zu den nationalen Festlegungen gehört auch die Auswahl von Werten für national festgelegte Parameter (NDP, en: nationally determined parameters).

Die jeweilige nationale Ausgabe von prEN 1991-4 kann einen Nationalen Anhang mit allen national festgelegten Parametern enthalten, die für den Entwurf und die Bemessung von Hoch- und Ingenieurbauten im jeweiligen Land Verwendung finden.

Wird keine nationale Festlegung angeführt, ist der in diesem Dokument angegebene Standardwert anzuwenden.

Wenn keine nationale Festlegung angeführt wird und kein Standardwert in diesem Dokument angegeben ist, kann die Festlegung durch eine zuständige Behörde getroffen werden, oder sofern keine Festlegungen getroffen wurden, können die beteiligten Parteien im Einzelfall eine Vereinbarung treffen.

Nationale Festlegungen sind in EN 1991-4 durch Anmerkungen zu den folgenden Abschnitten gestattet:

1.1 (4)	4.1 (2)	5.5.16 (2)	5.7 (7)
---------	---------	------------	---------

Nationale Festlegungen sind in EN 1991-4 bei der Anwendung der folgenden informativen Anhänge gestattet:

Anhang A	Anhang B	Anhang F	Anhang G
----------	----------	----------	----------

Der Nationale Anhang kann, direkt oder durch Verweisungen, ergänzende nicht widersprechende Angaben zur Erleichterung der Umsetzung enthalten, sofern dadurch keine Bestimmungen der Eurocodes geändert werden.

1 Anwendungsbereich

1.1 Anwendungsbereich von EN 1991-4

(1) EN 1991-4 enthält Hinweise für die Berechnung von Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter für die Tragwerksplanung.

ANMERKUNG 1 Silos werden für die Lagerung von Schüttgütern verwendet, Flüssigkeitsbehälter werden für die Lagerung von Flüssigkeiten verwendet.

ANMERKUNG 2 Einschränkungen der in diesem Dokument enthaltenen Regeln für Silos siehe 1.3.

ANMERKUNG 3 Einschränkungen der in diesem Dokument enthaltenen Regeln für Flüssigkeitsbehälter siehe 1.4.

(2) EN 1991-4 enthält auch einige Bestimmungen für Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter, die nicht nur in Zusammenhang mit den gelagerten Schüttgütern oder Flüssigkeiten stehen (z. B. Auswirkungen von Temperaturunterschieden), sondern die wesentlich von ihnen beeinflusst werden.

ANMERKUNG Die von Flüssigkeiten auf Flüssigkeitsbehälter ausgeübten Lasten sind sehr präzise definiert. Viele auf Silos wirkende Lasten sind nicht mit hoher Genauigkeit bekannt. Diese Norm bietet einen Leitfaden für zahlreiche praktische Situationen, in denen nur sehr wenig gesichertes Wissen vorhanden ist und die Informationen aus den verfügbaren begrenzten experimentellen und analytischen Informationen in Kombination mit Schlussfolgerungen aus der Untersuchung von Versagensfällen abgeleitet werden. Die Informationen basieren nicht auf einer robusten statistischen Verarbeitung experimenteller Daten.

(3) EN 1991-4 ist für Lagerbauwerke aus Beton, Stahl, Aluminium, Holz und FKV vorgesehen.

ANMERKUNG FKV ist das Standardakronym für Faser-Kunststoff-Verbundwerkstoffe.

(4) EN 1991-4 darf für die Tragwerksbewertung bereits ausgeführter Konstruktionen, die Bemessung bei Instandsetzung und Tragwerksänderung und die Beurteilung bei Nutzungsänderung verwendet werden.

ANMERKUNG Wenn die Bewertung eines bestehenden Tragwerks erwogen wird, kann im Hinblick auf die Relevanz der aktuellen Norm auf den Nationalen Anhang und den Kunden verwiesen werden.

1.2 Annahmen

(1) Es gelten die Annahmen von EN 1990.

(2) EN 1991-4 ist im Zusammenhang mit EN 1990, mit den weiteren Teilen der Reihen EN 1991, EN 1992, EN 1993, EN 1995, EN 1997, EN 1998 und EN 1999, sofern für die Bemessung von Silos und Flüssigkeitsbehältern maßgebend, anwendbar.

1.3 Einschränkungen bei Silos

1.3.1 Geometrische Einschränkungen

(1) Für die Anwendung der Bemessungsregeln für die von diesem Dokument behandelten Silos gelten folgende geometrische Einschränkungen:

- das hier definierte Silo ist entweder ein isoliertes Bauwerk oder kann Teil einer Silobatterie sein. Bei einer Silobatterie bezieht sich die Benennung „Silo“ in dieser Norm auf eine einzelne Silozelle innerhalb der Batterie;
- die Siloquerschnittsformen sind auf die in Bild 1.1c gezeigten begrenzt.

ANMERKUNG 1 Kleinere Abweichungen können unter der Voraussetzung akzeptiert werden, dass die Beachtung der möglichen Auswirkungen auf das Silotragwerk infolge sich durch diese Abweichungen ergebender Druckänderungen erwartet werden kann; Weitere Informationen zu Querschnittsgeometrien sind in Abschnitt 7 enthalten;

ANMERKUNG 2 Weitere Informationen zu Querschnittsgeometrien sind in Abschnitt 7 enthalten;

- die relevante Gesamthöhe h_b des Silos (Bild 1.1a) wird von der Höhe der äquivalenten Oberfläche des gelagerten Schüttgutes (siehe 3.2.17) bei vollständig gefülltem Silo bis zum Scheitelpunkt des Trichterkegels bzw. bei Fehlen eines Trichters bis zum waagerechten Boden gemessen;

ANMERKUNG Bestimmung von h_o für die Berechnung von h_b siehe (2).

- der effektive Silodurchmesser d_c sollte wie in Bild 1.1c angegeben bestimmt werden;
- hinsichtlich der Gesamthöhe h_b und der Schlankheit h_b/d_c gelten die folgenden Beschränkungen (siehe Bild 1.1):

$$h_b/d_c < 10 \quad (1.1)$$

$$h_b < 100 \text{ m} \quad (1.2)$$

$$d_c < 60 \text{ m} \quad (1.3)$$

- der Tragwerksübergang vom vertikalen Siloschaft in den Trichter erfolgt in einer einzigen horizontalen Ebene [siehe Bild 1.1 a)];
- die relevante Höhe des zylindrischen Bereichs des Silos h_c (Bild 1.1a) sollte von der Höhe der äquivalenten Oberfläche des gelagerten Schüttgutes (siehe 3.2.17) bei vollständig gefülltem Silo bis zum Übergang des Tragwerks in den Trichter (siehe Bild 1.1.a) bzw. bei Fehlen eines Trichters bis zum waagerechten Boden gemessen werden;

(2) Für einen symmetrisch gefüllten kreisförmigen Silo mit dem Durchmesser d_c sollte h_o wie folgt bestimmt werden:

$$h_o = \frac{d_c}{6} \tan \phi_r \quad (1.4)$$

und für einen symmetrisch gefüllten rechteckigen Silo mit dem charakteristischen Maß d_c sollte h_o wie folgt bestimmt werden:

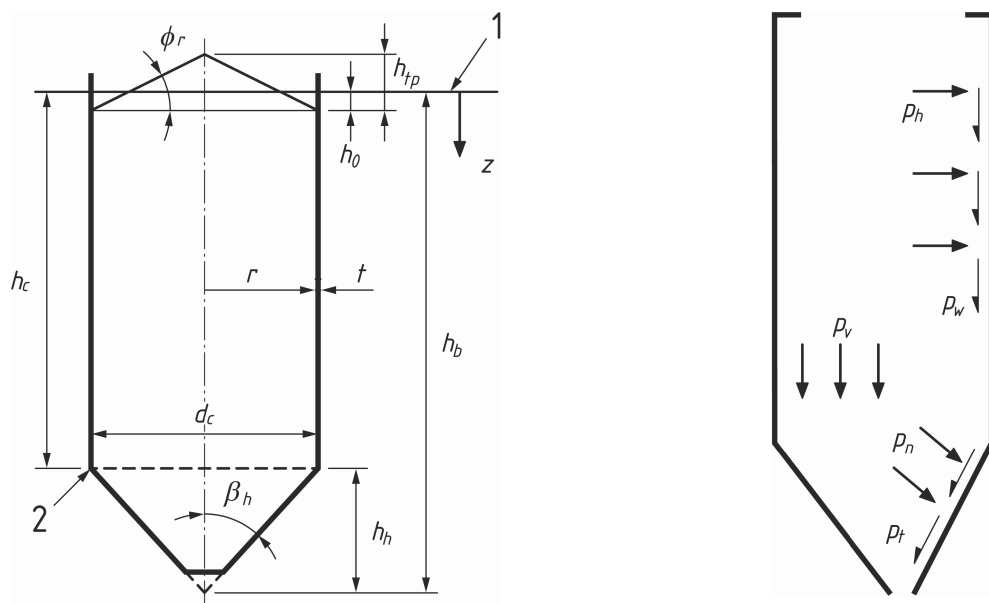
$$h_o = \frac{d_c}{4} \tan \phi_r \quad (1.5)$$

Dabei ist

ϕ_r der Böschungswinkel des Schüttgutes (siehe Tabelle C.1).

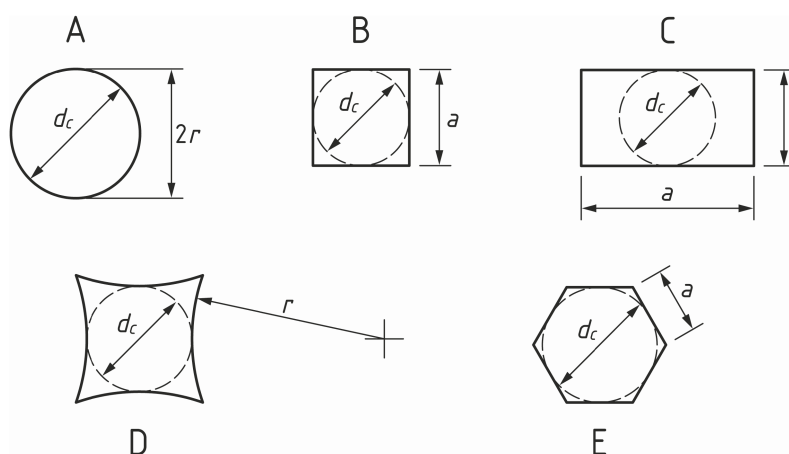
ANMERKUNG ϕ_r kann bei Schüttgütern, die sich beim Füllen fluidisieren können, auch null sein.

(3) Für staubförmiges Schüttgut darf üblicherweise $h_o = 0$ angesetzt werden, da das Schüttgut beim Ablagern natürlich belüftet wird. Der Entwurf von Silos für die Lagerung von staubförmigem Schüttgut sollte aufgrund dieses Effekts höhere Füllstände erlauben.



a) Geometrie

b) Drücke und Reibungslasten



c) Querschnittsformen und Definition von d_c

Legende

- 1 äquivalente Schüttgutoberfläche
- 2 Trichterübergang
- A kreisförmig
- B quadratisch
- C rechteckig
- D Zwischenform
- E sechseckig

Bild 1.1 — Siloformen mit Abmessungen und Druckbezeichnungen

(4) Die angegebenen Lastansätze auf Silotrichter gelten nur für konische (d. h. axialsymmetrisch geformte), pyramidenförmig mit rechteckigen Querschnitten ausgebildete, keilförmige (d. h. mit vertikalen Wänden an der Stirn- und Rückseite) und schiefe Trichter. Davon abweichende Trichterformen oder Trichter mit Einbauten erfordern spezielle, weitergehende Überlegungen.

(5) Diese Norm ist anwendbar auf Silos mit einem Trichter in Form eines schiefen Kegels, um die Auslauföffnung außerhalb der Mitte zu positionieren.

(6) Silos mit einem schiefen Trichter werden behandelt, allgemein sind Silos mit sich entlang der vertikalen Achse ändernden Symmetrieachsen der geometrischen Grundrissform jedoch kein spezifischer Gegenstand dieser Norm. Darunter fallen z. B. Silos mit einem von einer Zylinderform in eine Keilform übergehenden Trichter, einem Diamondback-Trichter oder einem Trichter mit einem vom Rechteck in einen Kreis übergehenden Querschnitt.

ANMERKUNG Ein Übergangstrichter für einen kreisförmigen Silo überführt den kreisförmigen Querschnitt in einen rechteckigen, ein Übergangstrichter für einen rechteckigen Silo überführt den rechteckigen Querschnitt vom Übergang zur Auslauföffnung in einen kreisförmigen Querschnitt. Diese Formen werden in dieser Norm nicht ausdrücklich behandelt, es wird jedoch davon ausgegangen, dass sich die Angaben für kreisförmige Trichter für die Tragwerksplanung eignen.

- Ein zylindrischer Silo hat außer dem invertierten Kegel am Boden keine Einbauten.
- Die von Austragsarmen, stationären und rotierenden Förderanlagen und ähnlichen Vorrichtungen eingeleiteten Lasten fallen nicht in den Anwendungsbereich dieser Norm. Informationen über solche Lasten sollten von den Herstellern der Vorrichtungen eingeholt werden.

1.3.2 Einschränkungen hinsichtlich der gelagerten Schüttgüter

(1) Für die Anwendung der in diesem Dokument enthaltenen Bemessungsregeln für Silozellen und Silobauwerke gelten hinsichtlich des gelagerten Schüttgutes folgende Anwendungsgrenzen:

- jeder Silo wird für einen definierten Bereich von Schüttguteigenschaften bemessen;
- das Schüttgut ist entweder von Natur aus frei fließend oder es kann sichergestellt werden, dass es sich im speziellen Fall wie ein frei fließendes Schüttgut verhält;
- für gelagerte Schüttgüter der Fließfähigkeitskategorie C (siehe Anhang C und Anhang D) können besondere Vorkehrungen erforderlich sein (siehe 5.4);
- gelagerte Schüttgüter der Fließfähigkeitskategorie D (siehe Anhang C und Anhang D) sind ausgenommen, außer wenn sie in von oben entleerten Silos gelagert werden (siehe Bild 5.3a und Bild 7.2.2);
- jeder Silo wird für eine festgelegte Betriebsart ausgelegt;
- die maximale Korngröße des Schüttgutes ist nicht größer als $0,03d_c$ (siehe Bild 1.1c).

ANMERKUNG 1 Die Relevanz des möglichen Bereichs an Schüttgutparametern für die Auslegung eines spezifischen Silos kann von den betreffenden Parteien vereinbart werden. Wo Unsicherheiten bestehen, kann der Kunde Rat von spezialisierten Gutachtern eines geeigneten Prüflabors einholen (siehe auch Anhang D).

ANMERKUNG 2 Für die Lagerung größerer Partikel muss die Auslauföffnung ausreichend groß sein, um sicherzustellen, dass keine mechanische Verzahnung erfolgt.

ANMERKUNG 3 Wenn die gelagerten Partikel groß im Vergleich zum charakteristischen Maß d_c des Silos sind, können erhebliche Probleme durch mechanische Verzahnung entstehen, die in dieser Norm nicht behandelt werden.

ANMERKUNG 4 Wenn die Partikel groß im Vergleich zur Wanddicke des Silos sind, kann ein einzelnes Partikel eine große lokale Kraft auf die Wand ausüben. Dieser Aspekt fällt nicht in den Anwendungsbereich dieser Norm.

(2) Die Phänomene schüttgutinduzierter Vibrationen, Schwingungen und Stöße (Silobeben, Hupen, Siloschlagen usw.) liegen außerhalb des Anwendungsbereichs dieser Norm. Silos, die für die Lagerung von Schüttgütern vorgesehen sind, die diese Effekte verursachen können, können besondere Lastberechnungen oder besondere Entwurfserwägungen erfordern, die außerhalb des Anwendungsbereichs dieser Norm liegen.

1.3.3 Einschränkungen hinsichtlich der Betriebsbedingungen beim Füllen und Entleeren

(1) Für die Anwendung der Bemessungsregeln für Silozellen und Silobauwerke gelten hinsichtlich der Betriebsbedingungen beim Füllen und Entleeren folgende Einschränkungen:

- beim Befüllen und/oder Entleeren entstehen nur geringfügige, vernachlässigbare Einwirkungen infolge von Trägheits- und Stoßkräften;
- bei Anwendung von Austrags- bzw. Entleerungshilfen (z. B. Förderanlagen oder Zentralrohre mit Schlucköffnungen, sog. „anti-dynamic tubes“) sollte der Schüttgutfluss nachgewiesenermaßen gleichmäßig und zuverlässig sein.

ANMERKUNG 1 Diese Norm enthält die Fülldrücke in quadratischen oder rechteckigen Silos mit inneren Zuggliedern zwischen den vertikalen Wänden.

ANMERKUNG 2 Extreme Füll- und Entleerungsraten können zu dynamischen Lasten führen, die in diesem Dokument nicht berücksichtigt werden [siehe auch (15)].

(2) Es kann notwendig sein, Entleerungshilfen zu verwenden, um einen freien Fluss zu erreichen (siehe 3.2.25 und Anhang D). Diese Norm enthält keine Regeln für die folgenden möglichen Merkmale eines Silos: Austragsförderer, Zentralrohre mit Schlucköffnungen, Entlastungskegel, Entlastungsbalken und Einbauten in den Bereich des Schüttgutflusses.

(3) Mögliche Variationen des Schüttgutaustrags, die auf durch Änderungen der Feuchtigkeit und der Temperatur im Silo und an der Wandoberfläche verursachte und zu Störungen des Fließprofils führende Fluktuationen der Schüttgutkennwerte zurückzuführen sind, liegen außerhalb des Anwendungsbereichs dieser Norm.

(4) Die von Austragsarmen, stationären und rotierenden Förderanlagen und ähnlichen Vorrichtungen eingeleiteten Lasten fallen nicht in den Anwendungsbereich dieser Norm. Informationen über solche Lasten sollten von den Herstellern der Vorrichtungen eingeholt werden.

ANMERKUNG Besondere Bedingungen können dazu führen, dass Feuchtigkeit kondensiert, wenn der Taupunkt an der Wandoberfläche erreicht wird. Schüttgut kann an nassen Wänden haften und zu Problemen beim Schüttgutfließen sowie höheren lokalen Drücken oder unsymmetrischen Lastmustern führen, die bei den Auslegungssituationen dieser Norm nicht berücksichtigt werden und außerhalb des Anwendungsbereichs dieser Norm liegen.

(5) Die in dieser Norm definierten Silolasten beruhen auf den Annahmen der isotropen oder orthotropen Schalentheorie mit resultierenden Membran- und Biegelasten auf die Silowand. Betonsilos gelten allgemein als dickwandige Silos, während Silos aus Metall und FKV allgemeine als dünnwandige Silos gelten. Bei anderen Bauformen wie etwa Holzdaubensilos sollten die Lastbedingungen sorgfältig und unter besonderer Berücksichtigung der Auswirkungen von unsymmetrischen Drücken (z. B. Ersatzlastregeln) betrachtet werden.

(6) Die verfahrenstechnische Bemessung von Silos fällt nicht in den Anwendungsbereich dieser Norm, die Verstopfung der Auslauföffnung bei Korngrößen von mehr als $d_o/8$ (wobei d_o das charakteristische Maß der Auslassöffnung ist) sollte jedoch beachtet werden.

(7) Lasten durch Silobeben, Stöße, Hupen oder Siloschlagen sind in dieser Norm nicht definiert. Die Regeln dieser Norm dürfen jedoch auf Silos angewendet werden, die zu solchen Phänomenen neigen, wobei dieser spezifische Entwurfsaspekt als AAC4 klassifiziert ist.

ANMERKUNG Diese Phänomene sind noch nicht hinreichend erforscht – es wird vermutet, dass sie eine Folge des Schüttgutflussmusters sind. Die Anwendung dieser Norm garantiert nicht, dass diese Phänomene nicht auftreten oder dass das geplante Bauwerk den durch sie eingeleiteten Kräften standhält.

(8) Die Auslegung von Silos für die Lagerung von Silage und Heulage fällt nicht in den Anwendungsbereich dieser Norm

(9) Silos der AAC4 (Versagensfolgeklasse 4) dürfen nach den Regeln dieser Norm entworfen werden, es können aber weitere Informationen notwendig sein, um die Sicherheit des Entwurfs zu garantieren.

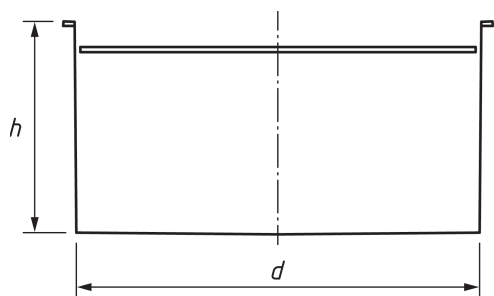
(10) Die Einwirkungen von Förder- und Einfüllanlagen auf das Silobauwerk sind in dieser Norm nicht spezifiziert. Dazu zählen solche durch nicht fest installierte Förderanlagen, die über das eingelagerte Schüttgut Lasten auf die Silostruktur übertragen können.

(11) Die Einwirkungen auf Laufstege, Leitern, Brücken, Förderanlagen und andere mit einem Silo verbundene Strukturen fallen nicht in den Anwendungsbereich dieser Norm.

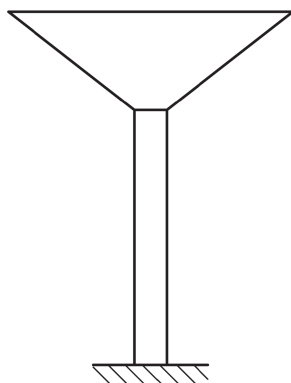
1.4 Einschränkungen für Flüssigkeitsbehälter

(1) Die Regeln dieser Norm gelten für ebenerdige Flüssigkeitsbehälter und (auf einem Sockel und/oder an Ständern oder Trägern befestigte) Hochbehälter (Bild 1.2).

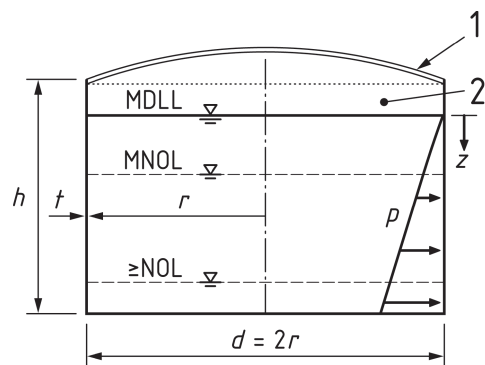
(2) Die Bemessungsregeln für Flüssigkeitsbehälter gelten nur für Flüssigkeitsbehälter, in denen Flüssigkeiten mit einem geringen Dampfdruck über der Oberfläche gelagert werden. Die Obergrenze für den Relativdruck im Dampfraum über der Flüssigkeit in einem Flüssigkeitsbehälter beträgt 500 mbar (= 50 kPa).



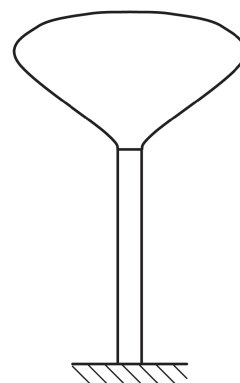
a) zylindrischer ebenerdiger Flüssigkeitsbehälter mit Schwimmdach



c) Hochbehälter mit konischer Form



b) zylindrischer ebenerdiger Flüssigkeitsbehälter mit Kuppeldach



d) Hochbehälter mit torisphärischer Form

Legende

- 1 Dach
- 2 Dampfraum

Bild 1.2 — Formen von Flüssigkeitsbehältern mit Abmessungen und Druckbezeichnungen

ANMERKUNG Aus Gründen der Vereinfachung und Verdeutlichung ist in Bild 1.2b nur der höchste Auslegungsfüllstand (MDLL) mit seiner Höhe h_L und der entsprechenden Tiefenkoordinate x_L angegeben. Die anderen definierten Füllstände MNOL und min. NOL sind gekennzeichnet, um ihre Position aufzuzeigen.

(3) Die in EN 1991-1-1, EN 1991-1-3 bis EN 1991-1-7 und EN 1991-3 definierten Einwirkungen auf die Dächer von Flüssigkeitsbehältern sollten berücksichtigt werden.

(4) Die Einwirkungen auf Laufstege, Leitern, Brücken, Rohrleitungen und andere mit einem Flüssigkeitsbehälter verbundene Strukturen fallen nicht in den Anwendungsbereich dieser Norm.

(5) Flüssigkeitsbehälter für die Lagerung von Flüssigkeiten, deren Dämpfe zur Explosion neigen (CC4), werden in dieser Norm nicht behandelt.

ANMERKUNG 1 Infolge einer Staubexplosion in einer Siloanlage auf benachbarte Gebäude oder Gebäudeteile wirkende Lasten können nach EN 1991-1-7 bewertet werden.

ANMERKUNG 2 Der Nationale Anhang kann Hinweise zur Behandlung der Staubexplosionsauswirkung auf benachbarte Bauwerke geben.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

ANMERKUNG In den Literaturhinweisen findet sich eine Liste weiterer in Bezug genommener Dokumente, bei denen es sich nicht um normative Verweisungen handelt, einschließlich Empfehlungen (d. h. „sollte“-Klauseln), Zulässigkeiten („darf“-Klauseln), Möglichkeiten („kann“-Klauseln) und Anmerkungen.

EN 1990:2023¹, *Eurocode — Grundlagen der Planung von Tragwerken und geotechnischen Bauwerken*

3 Begriffe und Symbole

3.1 Allgemeines

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach EN 1990:2023 und die folgenden Begriffe.

3.2 Begriffe

3.2.1

Anforderungsklasse

AAC, en: Action Assessment Class

Klassifizierung eines Silos oder Flüssigkeitsbehälters, die einen angemessenen Komplexitätsgrad der verschiedenen Arten der zu berücksichtigenden Einwirkungen einschließlich der Bewertung der Größenordnung der Einwirkung abbildet, um ein entsprechendes Zuverlässigkeitsniveau in Bezug auf die Größe eines Silos, die darin gelagerten granularen Materialien und die Betriebsart des Silos zu erreichen

1 Geändert durch EN 1990:2023/prA1:2024.

3.2.2

belüfteter Siloboden

Siloboden, in welchem Schlitze angeordnet sind, durch die Luft in das Schüttgut injiziert wird, um Schüttgutfließen im Bereich oberhalb des Silobodens zu aktivieren

3.2.3

Schlankheit (Silos)

Verhältnis zwischen der Höhe h_c des vertikalen Schüttgutlagerteils eines Silos (von der Oberkante des Schüttguthaufens bis zum Tragwerksübergang bzw. zum waagerechten Siloboden) und dem charakteristischen Maß d_c des Querschnitts

3.2.4

Schlankheit (Flüssigkeitsbehälter)

Verhältnis zwischen der Gesamthöhe h_T des Flüssigkeitslagerteils eines Flüssigkeitsbehälters (vom höchsten Füllstand bis zum Boden des Flüssigkeitsbehälters) und dem Durchmesser d des Querschnitts

3.2.5

charakteristische Abmessung des inneren Querschnittes

Durchmesser des größten eingeschriebenen Kreises des inneren Querschnittes einer Silozelle

3.2.6

kreisförmiger Silo

Silo, dessen Grundriss bzw. Schaftquerschnitt eine Kreisform aufweist

3.2.7

Kohäsion

Scherfestigkeit des Schüttgutes in dem Fall, dass in der Bruchebene keine Normalspannungen wirken

3.2.8

konischer Trichter

Trichter in Form eines geraden Kegels, bei dem die geneigten Seitenflächen in einem Punkt zusammenlaufen, der auf der zentralen vertikalen Achse liegt, womit bei einem Silo mit kreisförmigem Querschnitt in der Regel ein axialsymmetrisches Schüttgutfließen sichergestellt werden kann

3.2.9

Versagensfolgeklasse

CC, en: consequence class

Klassifizierung eines Silos oder Flüssigkeitsbehälters hinsichtlich der Folgen eines Tragwerksversagens

3.2.10

Durchmesser

Durchmesser eines Silos oder Flüssigkeitsbehälters, Durchmesser der mittleren Fläche einer zylindrischen Hohlstruktur oder bei Silos mit nicht-kreisförmigem Querschnitt der effektive Durchmesser des eingeschriebenen Kreises

3.2.11

Entleerungslast

auf die Wände eines Silos während des Entleerungsvorgangs wirkende Drücke unter der Annahme, dass der Silo sich noch in vollständig gefülltem Zustand befindet, das Fließprofil sich aber vollständig ausgebildet hat oder das Befüllen und Entleeren gleichzeitig erfolgen

3.2.12

Entleerungsvorgang

durch das Öffnen einer Auslauföffnung angestoßenes Fließprofil von granularen Materialien in einem Teil des Silos oder im kompletten Silo, das mit möglicherweise unterschiedlichen Fließprofilen anhält, bis der Silo leer ist

3.2.13

exzentrisches Entleeren

Fließprofil im Schüttgut mit einer in Bezug auf die vertikale Mittelachse unsymmetrischen Verteilung des sich bewegenden Schüttgutes, das üblicherweise durch eine exzentrisch angeordnete Auslauföffnung (siehe Bild 5.7b und c, Bild 5.8c und d und Bild 5.9c), aber auch durch andere zur Unsymmetrie führende Phänomene hervorgerufen wird

3.2.14

exzentrisches Füllen

Zustand, bei dem in irgendeiner Phase des Füllvorgangs die Spitze des Anschüttkegels nicht mehr in der vertikalen Mittelachse des Silos zentriert ist

3.2.15

effektiver Übergang

Höhe, in der in einem Silo, in dem das Schüttgut in einem gemischten Fließprofil fließt, die Grenze zwischen fließendem und ruhendem Schüttgut die Silowand trifft

3.2.16

effektiver Elastizitätsmodul

lokaler Wert der Änderungsrate der mittleren vertikalen Spannung mit lokaler vertikaler Dehnung bei einer gegebenen mittleren vertikalen Spannung in einem komprimierten granularen Material unter einaxialer Dehnung (Tangentenmodul der Elastizität)

3.2.17

äquivalente Schüttgutoberfläche

Höhe der gedachten eingeebneten (horizontalen) Schüttgutoberfläche, die sich aus der Volumenbilanz zwischen diesem gedachten und dem tatsächlichen Verlauf der Oberflächenform ergibt

3.2.18

Trichter für „erweitertes Fließen“ („expanded flow“)

Trichter, bei dem die Trichterseitenflächen im unteren Bereich des Trichters ausreichend steil ausgebildet sind, um einen Massenfluss zu erzeugen, während der Trichter im oberen Bereich flacher geneigte Seitenflächen aufweist, sodass ein Kernfluss entsteht und somit eine zuverlässige Entleerung sicherstellt ist und gleichzeitig ein größeres Silovolumen bei geringerer Trichterhöhe ermöglicht wird

3.2.19

Fülllast

während des Füllvorgangs und der Lagerung in vollständig gefülltem Zustand auf die Wände eines Silos wirkende Drücke

3.2.20

Füllvorgang

Einbringen von Schüttgut in ein Silo im freien Fall von einer Schurre oder einem Verteiler über der dem vollständig gefüllten Zustand entsprechenden Höhe, was zu einer Schüttung (Packung) des Schüttgutes führt, die die Schüttgutwichte, den Hohlraumanteil, die Orientierung und Anisotropie der Partikel und die Inhomogenität zwischen verschiedenen Zonen beeinflusst; alle diese Faktoren können das Fließprofil des Schüttgutes während der Entleerung und die auf die Silowände ausgeübten Drücke beeinflussen

3.2.21

waagerechter Boden

innere Grundfläche mit einer Neigung gegenüber der Horizontalen von weniger als 20° bei einem Silo oder von weniger als 5° bei einem Flüssigkeitsbehälter

3.2.22

Fließfähigkeitskategorie

FG, en: Flow Group

Kategorisierung eines Schüttgutes im Hinblick auf seine Fähigkeit, frei zu fließen, wenn eine Entleerungsöffnung geöffnet ist

3.2.23

Fließprofil

geometrische Form des sich bewegenden Schüttgutes, wenn sich diese bereits voll ausgebildet hat und der Silo dabei nahe dem vollständig gefüllten Zustand (maximaler Füllzustand) bleibt

3.2.24

fluidisiertes Schüttgut

Zustand eines gespeicherten staubförmigen Schüttgutes, in dem dieses entweder durch eine spezielle Belüftung oder durch den Füllvorgang eingetragene Luft einen großen Anteil von Luftporen enthält, mit einem Druckgradienten, der das Gewicht der Partikel ganz oder teilweise kompensiert

Anmerkung 1 zum Begriff: Ein Schüttgut wird als teilweise fluidisiert bezeichnet, wenn nur ein Teil des Gewichtes der Schüttgutpartikel durch den Porendruckgradienten kompensiert wird.

3.2.25

frei fließendes granulares Material

granulares Material, dessen Fließverhalten nicht merklich von Kohäsion oder der Kantigkeit der Partikel beeinflusst wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Ein Schüttgut kann mithilfe von Fließhilfen oder durch ein Massenflussdesign zum freien Fließen gebracht werden, siehe auch prEN 1991-4:2024, Anhang D.

3.2.26

vollständig gefüllter Zustand (Silos)

Zustand eines Silos, in dem sich die Oberfläche des Schüttgutes an der höchstmöglichen Position befindet, die sie innerhalb der geplanten Nutzungsdauer der Konstruktion während des Silobetriebs einnehmen kann

Anmerkung 1 zum Begriff: Dieser Zustand wird bei der Bemessung des Silos mit Berücksichtigung der Füll- und Entleerungslasten angenommen.

3.2.27

vollständig gefüllter Zustand (Flüssigkeitsbehälter)

Zustand eines Flüssigkeitsbehälters, in dem sich die Oberfläche der Flüssigkeit an der höchstmöglichen Position befindet, die sie innerhalb der geplanten Nutzungsdauer der Konstruktion während des Betriebs des Flüssigkeitsbehälters einnehmen kann

3.2.28

grundlegender Silolastfall

SFLC, en: Silo Fundamental Load Case

einfache, wesentliche und symmetrische Lastverhältnisse, die für alle Silos erforderlich sind

3.2.29

Kernfluss

Fließprofil, bei dem sich im Schüttgut ein Fließkanal über der Auslauföffnung entwickelt, während das Schüttgut im Bereich zwischen diesem Fließkanal und der Silowand in Ruhe verbleibt

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Fließkanal kann hierbei in Kontakt mit dem vertikalen Schaftsegment kommen („gemischtes Fließen“) oder sich bis zur Oberfläche hin erstrecken („Schlotfluss“ oder „Schachtfließen“).

3.2.30

granulares Material

Material, das sich aus einzelnen voneinander getrennten Körnern aus festen Partikeln zusammensetzt, mit Partikeln in etwa gleicher Größenordnung, bei dem bei der Ermittlung der Drücke die zwischen den Einzelkörnern befindliche Luft nur eine geringe Rolle spielt und auf das Schüttgutfließen nur geringen Einfluss hat

3.2.31

hohe Füllgeschwindigkeit

Bedingung in einem Silo, bei der die Geschwindigkeit des Einfüllens zu einem Lufteintrag in einer Größenordnung führen kann, sodass dadurch die Druckverhältnisse an der Wand beeinflusst werden

3.2.32

Homogenisierungssilo

Silo, in dem das Schüttgut unter Zuhilfenahme von Fluidisierung homogenisiert, d. h. durch Mischung vergleichmäßigt wird

3.2.33

Trichter

Siloboden mit geneigten Wänden

3.2.34

Trichterdruckverhältnis

F

Wert, der angibt, in welchem Verhältnis die Normallast p_n auf die geneigten Trichterwände und die mittlere Vertikallast p_v an dieser Stelle im Schüttgut zueinanderstehen

3.2.35

Silo mit mittlerer Schlankheit

Silo, dessen Verhältnis von Höhe zum Durchmesser zwischen $1,0 \leq h_c/d_c < 2,0$ liegt

3.2.36

innerer Schlotfluss (oder Schachtfließen)

Fließprofil mit Schlotfluss, in dem die Fließkanalgrenze sich bis zur Schüttgutoberfläche erstreckt, ohne dass es dabei zu Berührungen des Fließbereiches mit der Silowand kommt

3.2.37

invertierter Kegel

konischer Einbau am Siloboden mit nach oben gerichtetem Scheitelpunkt, der als Teil des Entleerungssystems verwendet wird

3.2.38

Horizontallastverhältnis

K

Wert, der angibt, in welchem Verhältnis die auf die vertikale Silowand wirkende lokale Horizontallast p_h in einer bestimmten Höhe und die mittlere Vertikallast p_v in derselben Höhe im Schüttgut zueinanderstehen

3.2.39

geringe Kohäsion

eine Schüttgutprobe weist eine geringe Kohäsion auf, wenn die Kohäsion c kleiner als 4 % der Vorkonsolidierungsspannung σ_r ist

3.2.40

Massenfluss

Fließprofil, bei dem alle sich im Silo befindenden Schüttgutpartikel beim Entleeren gleichzeitig in Bewegung sind

3.2.41

höchster Auslegungsfüllstand

MDLL, en: maximum design liquid level

höchster Füllstand in einem Flüssigkeitsbehälter, der als außergewöhnliche Bemessungssituation zu verwenden ist

Anmerkung 1 zum Begriff: Dieser ist höher als der maximale Betriebsfüllstand

3.2.42

maximaler Betriebsfüllstand

MNOL, en: maximum normal operating liquid level

höchster Füllstand in einem Flüssigkeitsbehälter unter üblichen Betriebsbedingungen

Anmerkung 1 zum Begriff: Dieser ist niedriger als der höchste Auslegungsfüllstand.

3.2.43

gemischtes Fließen

Kernflussprofil, bei dem der Fließkanal noch unterhalb des höchsten Kontaktpunkts zwischen Schüttgut und Wand (d. h. der Oberfläche an der Wand) mit der vertikalen Silowand in Berührung kommt

3.2.44

Kontiguitätskoeffizienten χ_L und χ_U des Moduls

Koeffizient der Komponente des effektiven Elastizitätsmoduls, der in einer linearen Beziehung zur mittleren Vertikallast steht (tiefgestelltes L für unter zunehmender Last, tiefgestelltes U für unter abnehmender Last)

3.2.45

nicht kreisförmiger Silo

Silo mit einem nicht kreisförmigen Querschnitt

3.2.46

schiefer konischer Trichter

am Boden eines Silos mit kreisförmigem Querschnitt angeordneter Trichter, dessen Mittelachse gegen die Vertikale geneigt ist, um die Auslauföffnung exzentrisch zur vertikalen Achse des Zylinders anzuordnen und es auf diese Weise zu ermöglichen, dass das im Silo gelagerte Schüttgut von einer außerhalb der vertikalen Hauptachse (der Querschnitt ist streng genommen elliptisch) gelegenen Position aus entnommen werden kann

3.2.47

Gesamtschlankheit (Silos)

Verhältnis zwischen der Gesamthöhe h_b des Schüttgutlagerteils eines Silos (von der Oberkante des Schüttguthaufens bis zum Trichterboden) und dem charakteristischen Maß d_c des Querschnitts

3.2.48

Schüttgut

Festkörper, der aus einer Vielzahl voneinander unabhängiger Einzelpartikel besteht

Anmerkung 1 zum Begriff: In der Literatur häufig auch als „Granulat“, „granulares Medium“ oder „granulare Materie“ bezeichnet

3.2.49

Ersatzlast

speziell definierte Last, die geeignete resultierende Lasten in die Silowand einleitet, die den wesentlichen Auswirkungen unsymmetrischer realer Lastmuster, die deutlich komplexer sind, entsprechen

3.2.50

Schlotfluss

Fließprofil, in dem das Schüttgut in einem vertikalen oder nahezu vertikalen Fließkanal oberhalb der Auslauföffnung in Bewegung ist, sich aber neben dem Fließkanal in Ruhe befindet, so dass der Schüttgutfluss üblicherweise im Inneren des Schüttgutes stattfindet, bei exzentrisch angeordneter Auslauföffnung oder wenn spezielle Faktoren dazu führen, dass der Fließkanal aus der vertikalen Achse über dem Auslauf abweicht jedoch auch an der Silowand stattfinden kann

3.2.51

ebenes Fließen

Fließprofil in einem Silo mit rechteckiger oder quadratischer Querschnittsfläche und einer schlitzförmigen Auslauföffnung, wobei der Auslaufschlitz parallel zu zwei Silowänden verläuft und seine Länge der Länge dieser beiden Silowände entspricht

3.2.52

staubförmiges Schüttgut

Schüttgut, dessen mittlere Korngröße kleiner als 0,05 mm wie in dieser Norm verwendet ist

3.2.53

Schüttgutdruck, -spannung

senkrecht auf eine Tragwerksfläche (z. B. Wand, Dach, Boden usw. eines Silos oder eines Flüssigkeitsbehälters) wirkende Kraft

3.2.54

Prozesssilo

Silo, der im Laufe des Jahres regelmäßig (mehr als 50-mal im Jahr) gefüllt und teilweise oder vollständig entleert wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Wert 50 soll auf eine regelmäßige Befüllung und Entleerung hinweisen.

3.2.55

rechteckiger Silo mit flexiblen Wänden

Silo mit quadratischem oder rechteckigem Querschnitt, der aus Platten zusammengesetzt ist, deren horizontale Biegesteifigkeit der Steifigkeit des gelagerten Schüttgutes ähnelt

3.2.56

rechteckiger Silo mit inneren Zuggliedern

quadratisches oder rechteckiges Silo mit Zuggliedern zwischen seinen Seiten, die die Biegemomente in den Wänden verringern

3.2.57

Stützwandsilo

Silo mit einem waagerechten Boden und einem Verhältnis von Höhe zu Durchmesser von $h_c/d_c \leq 0,4$ ($h_b = h_c$ bei Stützwandsilos)

3.2.58

flacher Trichter

Trichter, in dem nach dem Befüllen nicht der volle Betrag der Wandreibung mobilisiert wird

3.2.59

Silo

einzelne Behälterkonstruktion zur Speicherung von Schüttgütern (auch als Bunker, Lagerbehälter oder Silozelle bezeichnet)

Anmerkung 1 zum Begriff: Dieser Begriff bezeichnet auch eine einzelne Zelle einer Silobatterie.

3.2.60

Silobatterie

Gruppe von eng miteinander verbundenen Behälterbauwerken, in denen viele verschiedene Arten ähnlicher Schüttgüter getrennt voneinander gelagert werden können (Hinweis: in einigen Sprachen wird eine Silobatterie auch als Silo bezeichnet)

3.2.61

schlanker Silo

Silo, dessen Verhältnis von Höhe zum Durchmesser zwischen $2,0 \leq h_c/d_c < 4,0$ liegt

3.2.62

Schlankheit

Verhältnis h_c/d_c eines Silos (siehe Bild 3.1) oder h_T/d eines Flüssigkeitsbehälters

3.2.63

spezieller Silolastfall

SSLC, en: Silo Special Load Case

getrennt vom Rest der Norm definierter Lastfall, in dem unter Schüttgutfluss anspruchsvollere Lastbedingungen auftreten, die besondere Lastdefinitionen erfordern

3.2.64

niedriger Silo

Silo mit einem Verhältnis von Höhe zu Durchmesser von $0,4 \leq h_c/d_c < 1,0$ Bei einem Verhältnis von Höhe zu Durchmesser von $h_c/d_c < 0,4$ ist der Silo bei Vorhandensein eines Trichters ein niedriger Silo und bei einem waagerechten Boden ein Stützwandsilo

3.2.65

steiler Trichter

Trichter, in dem nach dem Befüllen der volle Betrag der Wandreibung mobilisiert wird (d. h. das Schüttgut gleitet beim Setzen nach dem Befüllen an der Trichterwand hinab)

3.2.66

Lagersilo

Silo, der weniger als 50-mal im Jahr gefüllt und teilweise oder vollständig entleert wird

3.2.67

Spannung im Schüttgut

Kraft je Flächeneinheit innerhalb des gespeicherten Schüttgutes

3.2.68

Tragwerksübergang

Position im Silobauwerk, an der die Trichterwand auf die vertikale Wand stößt

3.2.69

Flüssigkeitsbehälter

Behälterkonstruktion zur Lagerung von Flüssigkeiten

3.2.70

Flüssigkeitsbehälterlast

Einwirkungen von gelagerten Flüssigkeiten, Gasen, Dämpfen oder Luftdruck über der Flüssigkeitsoberfläche oder durch die Temperatur der Flüssigkeit, des Gases, des Dampfes oder der Luft

3.2.71

dickwandiger kreisförmiger Silo

Silo mit einem Verhältnis von Durchmesser zur Wanddicke bis einschließlich $d_c/t = 200$

Anmerkung 1 zum Begriff: Holzbaukonstruktionen siehe 1.2 (17).

3.2.72

dünnwandiger kreisförmiger Silo

kreisförmiger Silo mit einem Verhältnis von Durchmesser zur Wanddicke von größer als $d_c/t = 200$

Anmerkung 1 zum Begriff: Wenn die Silowand gewellt oder doppelwandig ist, wird die Dicke des Metallblechs als Wanddicke angesetzt.

Anmerkung 2 zum Begriff: Zwischen dick- und dünnwandigen Flüssigkeitsbehältern wird in EN 1991-4 nicht unterschieden.

3.2.73

Höhe des Anschüttkegelschwerpunkts

h_o

Höhe des Schwerpunkts des Anschüttkegels über dem höchsten Kontaktpunkt zwischen Schüttgut und Wand

3.2.74

Wandreibungslast

durch Scherspannungen im Schüttgut verursachte Kraft je Flächeneinheit entlang der (vertikalen oder geneigten) Silowand

3.2.75

Dampfraum eines Flüssigkeitsbehälters

Raum über der Oberfläche der gelagerten Flüssigkeit und unterhalb des Flüssigkeitsbehälterdachs

3.2.76

vertikales Schaftsegment

Teil mit vertikalen Wänden eines Silos oder Flüssigkeitsbehälters

3.2.77

sehr schlanker Silo

Silo mit h_c/d_c größer gleich 4,0

3.2.78

Wandtyp

Klassifizierung der Reibungseigenschaften der Silo- oder Trichterwand im Verhältnis zum jeweiligen gelagerten Schüttgut

3.2.79

keilförmiger Trichter

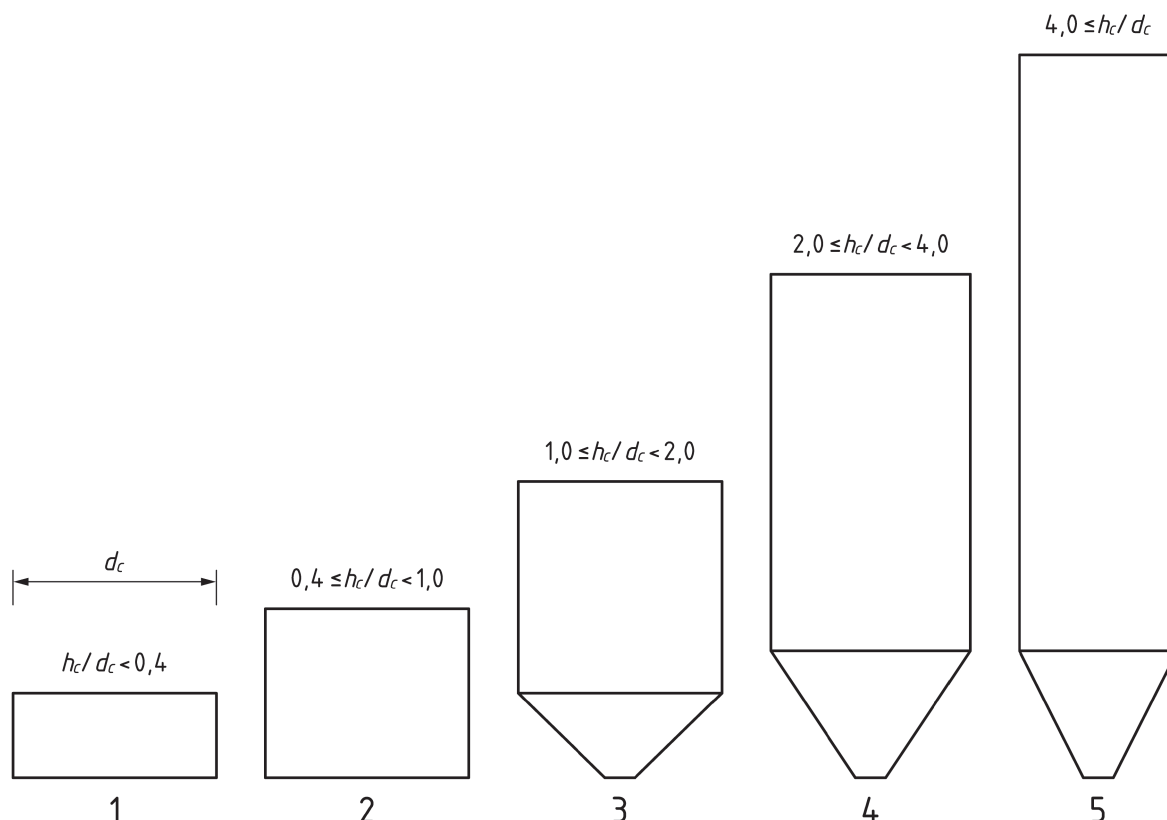
Trichter mit vertikalen Enden, bei dem die geneigten Flächen zu einem Schlitz mit dem Ziel eines ebenen Schüttgutflusses konvergieren

3.2.80

allgemein bekanntes Schüttgut

Schüttgut, das umfangreich getestet wurde und für das erfolgreich zahlreiche Silos gebaut wurden, sodass zuverlässige Schüttgutkennwerte allgemein anerkannt sind

Anmerkung 1 zum Begriff: Von dieser Norm als allgemein bekannt anerkannte Schüttgüter sind in Tabelle C.2 mit „W“ gekennzeichnet.



Legende

- 1 Stützwandsilo
- 2 niedriger Silo
- 3 Silo mit mittlerer Schlankheit
- 4 schlanker Silo
- 5 sehr schlanker Silo

ANMERKUNG Die Bilder der Silos sind nicht maßstäblich.

Bild 3.1 — Definitionen der Schlankheit

3.3 Symbole und Abkürzungen

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Symbole nach EN 1990:2023 und die folgenden Symbole. Die verwendeten Symbole basieren auf den Konventionen von ISO 3898.

3.3.1 Lateinische Großbuchstaben

A	Querschnittsfläche des vertikalen Schaftsegments
A_c	Querschnittsfläche des Fließkanals beim exzentrischen Entleeren (große Exzentrizitäten)
A_s	Querschnittsfläche des ruhenden Schüttgutes beim exzentrischen Entleeren (große Exzentrizitäten)
C_{ohf}	Fülldruckfaktor schiefer Trichter
C_{ohe}	Entleerungsdruckfaktor schiefer Trichter
C_p	Ersatzlastfaktor
C_T	Lastvergrößerungsfaktor bei der Berücksichtigung von Temperaturunterschieden bzw. -änderungen
E_{sL}	effektiver Elastizitätsmodul eines gespeicherten Schüttgutes bei Belastung und relevantem Spannungsniveau

E_{sLo}	effektiver Basis-Elastizitätsmodul eines gespeicherten Schüttgutes bei Belastung
E_{sU}	effektiver Elastizitätsmodul eines gespeicherten Schüttgutes bei Entlastung und relevantem Spannungsniveau
E_{sUo}	effektiver Basis-Elastizitätsmodul des gespeicherten Schüttgutes bei Entlastung
E_w	Elastizitätsmodul der Silowand
F	Verhältnis zwischen den Drücken senkrecht auf die Trichterwand und der mittleren Vertikalspannung im Schüttgut an dieser Stelle
F_e	Normaldruckverhältnis im Trichter während der Entleerung (Verhältnis zwischen Drücken senkrecht auf die Trichterwand und mittleren Vertikaldrücken im Schüttgut)
F_f	Normaldruckverhältnis im Trichter nach dem Füllen (Verhältnis zwischen Lasten senkrecht auf die Trichterwand und mittleren Vertikaldrücken im Schüttgut)
G	Verhältnis zwischen dem Radius des Fließkanals und dem Radius des inneren Querschnittes eines kreisförmigen Silos
K	charakteristischer Wert des Horizontaldruckverhältnisses (Verhältnis zwischen mittlerem Horizontaldruck und mittlerer Vertikalspannung im Schüttgut)
K_m	Mittelwert des Horizontaldruckverhältnisses
K_o	Wert von K bei Ausschluss von horizontalen Dehnungen sowie horizontal und vertikal gerichteten bzw. verlaufenden Hauptspannungen
S	Geometriefaktor für die Trichterlasten (= 2 bei konisch geformten Trichtern, = 1 bei keilförmigen Trichtern)
U	innerer Umfang des Querschnittes des vertikalen Schaftsegments
U_{sc}	(innere) Umfangslänge des Fließkanals im Kontaktbereich zum nichtfließenden Bereich des Schüttgutes bei der Entleerung mit großen Exzentrizitäten
U_{wc}	(innere) Umfangslänge des Fließkanals im Kontaktbereich mit der Silowand bei der Entleerung mit großen Exzentrizitäten
U_{ws}	(innere) Umfangslänge des Kontaktbereichs des Schüttgutes mit der Silowand bei der Entleerung mit großen Exzentrizitäten
Y	Tiefenvariationsfunktion: Funktion zur Beschreibung der Lastzunahme mit zunehmender Tiefe im Silo
Y_J	Tiefenvariationsfunktion der Janssen-Theorie für schlanke Silos
Y_R	Tiefenvariationsfunktion bei niedrigen Silos und Silos mit mittlerer Schlankheit

3.3.2 Lateinische Kleinbuchstaben

a	Seitenlänge eines Silos mit quadratischer oder hexagonaler Querschnittsfläche oder lange Seite eines rechteckigen Silos
a	Streukoeffizient (-faktor) bzw. Umrechnungsfaktor zur Berechnung der oberen und unteren charakteristischen Schüttgutkennwerte aus den Mittelwerten, siehe folgende Definitionen:
a_K	Streukoeffizient bzw. Umrechnungsfaktor für das Horizontaldruckverhältnis
a_γ	Streukoeffizient bzw. Umrechnungsfaktor für die Schüttgutwichte
a_ϕ	Streukoeffizient bzw. Umrechnungsfaktor für den Winkel der inneren Reibung
a_μ	Streukoeffizient (-faktor) bzw. Umrechnungsfaktor für den Wandreibungskoeffizienten
b	Länge der kurzen Seite eines rechteckigen Silos

c	Kohäsion des Schüttgutes
d	Durchmesser eines zylindrischen Flüssigkeitsbehälters
d_c	charakteristisches horizontales Maß des inneren Siloquerschnittes
d_o	charakteristische Abmessung der Auslauföffnung
e_e	globale Exzentrizität für Berechnung der Entleerung, definiert als der größere der Werte für e_r bzw. e_o
e_c	Exzentrizität der Mittelachse des Fließkanals beim Entleeren mit großen Exzentrizitäten
e_f	maximale Exzentrizität beim Füllen des Silos
e_o	Exzentrizität des Mittelpunktes der Auslauföffnung
e_t	Exzentrizität des Mittelpunktes des Anschüttkegels
h_b	Gesamthöhe eines Silos mit Trichter, gemessen von der gedachten Trichterspitze bis zur äquivalenten Schüttgutoberfläche
h_c	Höhe des vertikalen Siloschaftes, gemessen vom Trichterübergang bis zur äquivalenten Schüttgutoberfläche
h_h	Höhe des Trichters in einem Silo, gemessen von der Spitze bis zum Übergang
h_L	Höhe der Flüssigkeitsoberfläche in einem Flüssigkeitsbehälter, wenn dieser bis zum höchsten Auslegungsfüllstand (MDLL) gefüllt ist
h_{MNOL}	Höhe über Flüssigkeitsoberfläche über dem Boden des Flüssigkeitsbehälters bei maximalem Betriebsfüllstand (MNOL)
h_o	Höhe des Anschüttkegelschwerpunkts: der vertikale Abstand zwischen äquivalenter Schüttgutoberfläche und der am tiefsten liegenden Stelle der Wand, die sich nicht in Kontakt mit dem Schüttgut befindet
h_{test}	Flüssigkeitsstand über dem Boden des Flüssigkeitsbehälters unter den Bedingungen der hydrostatischen Druckprüfung
h_{tp}	Gesamthöhe des Anschüttkegels an der Schüttgutoberfläche (vertikaler Abstand vom am tiefsten gelegenen Punkt der Silowand, der bei einem bestimmten Füllzustand nicht in Kontakt mit dem gespeicherten Schüttgut ist, bis zur Spitze des Aufschüttkegels)
h_T	Gesamthöhe der vertikalen Wand eines Flüssigkeitsbehälters vom Boden bis zur Traufe oder zum Dachanschluss
h_{TL}	geringste Höhe einer möglichen Position über dem Scheitelpunkt des Trichters für den effektiven Übergang bei gemischtem Fließen
n	Parameter in den Bestimmungsgleichungen der Trichterdrücke
n_{zSk}	charakteristischer Wert der Resultierenden der Kräfte in der Silowand je laufendem Meter in Umfangsrichtung der Wand
p	Last (vom Schüttgut auf eine Bauwerksfläche ausgeübte Normalspannung)
p_h	vom gelagerten Schüttgutdruck ausgeübter Horizontaldruck
$p_{h,b}$	charakteristischer Gesamthorizontaldruck in der Bandlast
p_{hae}	Horizontaldruck im sich in Ruhe befindlichen Bereich des Schüttgutes neben dem Fließkanal bei einer Entleerung mit großen Exzentrizitäten
p_{hce}	Horizontaldruck im Fließkanal bei einer Entleerung mit großen Exzentrizitäten
p_{hco}	asymptotischer Horizontaldruck in großer Tiefe im Fließkanal bei einer Entleerung mit großen Exzentrizitäten

p_{he}	Horizontaldruck beim Entleeren
p_{hf}	Horizontaldruck nach dem Füllen und während der Lagerung
p_{hfb}	Horizontaldruck nach dem Füllen am unteren Ende des vertikalen Schaftsegments
p_{ho}	asymptotischer Horizontaldruck in großer Tiefe aus gespeichertem Schüttgut
p_{hse}	Horizontaldruck im sich in Ruhe befindlichen Schüttgut in größerem Abstand zum Fließkanal während einer Entleerung mit großen Exzentrizitäten
p_{hT}	Zunahme des Horizontaldrucks aufgrund eines Temperaturunterschieds in niedrigen Silos und Silos mit mittlerer Schlankheit
p_{hTs}	Zunahme des Horizontaldrucks aufgrund eines Temperaturunterschieds in schlanken Silos
p_n	Lasten senkrecht auf die Trichterwände aus dem gelagerten Schüttgut
p_{nc}	Lasten senkrecht zum inneren invertierten Kegel
p_{ne}	Lasten senkrecht auf die Trichterwände während der Entleerung
$p_{ne,sym}$	senkrecht auf die Wand eines zu einem schiefen Trichter äquivalenten symmetrischen Trichters wirkende Lasten während der Entleerung
$p_{ne\theta}$	Lasten senkrecht auf die Wände des schiefen Trichters während der Entleerung bei Winkelkoordinate θ
p_{nf}	Druck senkrecht auf die Trichterwände nach dem Füllen und während der Lagerung
$p_{nf,sym}$	senkrecht auf die Wand eines zu einem schiefen Trichter äquivalenten symmetrischen Trichters wirkender Druck nach dem Füllen
$p_{nf\theta}$	Druck senkrecht auf die Wände des schiefen Trichters nach dem Füllen bei Winkelkoordinate θ
p_t	Reibungsdrücke im Trichter
p_{te}	Reibungsdrücke im Trichter beim Entleeren
$p_{te\theta}$	Reibungsdrücke auf die Wände des schiefen Trichters beim Entleeren bei Winkelkoordinate θ
p_{tf}	Reibungsdrücke im Trichter nach dem Füllen und während der Lagerung
$p_{tf\theta}$	Reibungsdrücke auf die Wände des schiefen Trichters nach dem Füllen bei Winkelkoordinate θ
p_v	Vertikalspannung im Schüttgut
p_{vb}	Vertikaldruck auf den Boden eines Silos mit waagerechtem Boden
p_{vf}	Vertikalspannung im Schüttgut nach dem Füllen und während der Lagerung
p_{vft}	Vertikalspannung nach dem Füllen am Trichterübergang (Fußpunkt des vertikalen Schaftsegments)
p_{vsq}	Vertikaldruck auf dem waagerechten Boden eines niedrigen Silos oder Silos mittlerer Schlankheit
p_w	Wandreibungslasten entlang der vertikalen Silowand (Scherkraft infolge Reibung je Flächeneinheit)
p_{wc}	Wandreibungslasten auf den inneren invertierten Kegel
p_{wae}	Wandreibungslasten im sich in Ruhe befindlichen Schüttgut unmittelbar neben dem Fließkanal während der Entleerung mit großen Exzentrizitäten (am Übergang vom ruhenden zum fließenden Schüttgut)
p_{wce}	Wandreibungslasten im Fließkanal während der Entleerung mit großen Exzentrizitäten
p_{we}	Wandreibungslasten während der Entleerung
p_{wf}	Wandreibungslasten nach dem Füllen und während der Lagerung
p_{wse}	Wandreibungslasten im sich in Ruhe befindlichen Schüttgut fern vom Fließkanal während der Entleerung mit großen Exzentrizitäten (am Übergang vom ruhenden zum fließenden Schüttgut)

r	äquivalenter Siloradius ($r = 0,5d_c$)
r_c	Radius eines exzentrischen Fließkanals im gelagerten Schüttgut
r_T	Innenradius der vertikalen Wand eines Flüssigkeitsbehälters
s	Abmessung der mit der Ersatzlast belasteten Fläche ($s = \pi d_c / 16 \cong 0,2d_c$)
t	Dicke der Flüssigkeitsbehälter- oder Silowand
x	vertikale Koordinate im Trichter mit dem Ursprung in der Trichterspitze
x_L	globale vertikale Koordinate in einem Flüssigkeitsbehälter, gemessen von der Oberfläche der Flüssigkeit h_L nach unten
z	Tiefe unterhalb der äquivalenten Schüttgutoberfläche im vollständig gefüllten Zustand
z_o	charakteristische Tiefe nach der Janssen-Theorie
z_{oc}	charakteristische Tiefe nach der Janssen-Theorie für den Fließkanal bei der Entleerung mit großen Exzentrizitäten
z_s	Tiefe unterhalb der höchstliegenden Kontaktstelle zwischen Schüttgut und Silowand
z_T	Tiefe des effektiven Übergangs bei gemischtem Fließen
$z_{T,max}$	Tiefe der niedrigsten möglichen Position des effektiven Übergangs bei gemischtem Fließen
z_V	Maß für die Tiefe beim Ansatz der Vertikalspannung in niedrigen Silos

3.3.3 Griechische Großbuchstaben

ΔT	Temperaturunterschied zwischen gespeichertem Schüttgut und der Silowand
Δv	bei Materialuntersuchungen gemessene inkrementelle Vertikalverschiebung
$\Delta \sigma$	bei Materialuntersuchungen inkrementelle auf eine Probe aufgebrachte Spannung

3.3.4 Griechische Kleinbuchstaben

α	Horizontaldruck-Verteilungsfaktor für rechteckige dünnwandige Silos
α_w	thermischer Ausdehnungskoeffizient der Silowand
β_c	Neigung eines invertierten Kegels in einem Silo bezogen auf die Vertikale
β_h	Neigungswinkel der Trichterwand bezogen auf die Vertikale bzw. der steilste Winkel der Trichterwände bei einem quadratischen oder rechteckigen Trichter
$\beta_{ho,eq}$	Neigungswinkel eines zu einem schiefen Trichter äquivalenten symmetrischen Trichters
$\beta_{h,mass}$	größter Winkel in Grad, bei dem der Massenfluss sichergestellt ist
$\beta_{ho,max}$	größter Neigungswinkel im schiefen Trichter, bezogen auf die Vertikale
$\beta_{ho,min}$	steilster Neigungswinkel im schiefen Trichter, bezogen auf die Vertikale
β_n	Schnittwinkel eines Fließkanals im Schüttgut mit der Silowand
γ	oberer charakteristischer Wert der Wichte des gespeicherten Schüttgutes
γ_1	Schüttgutwichte des Schüttgutes im fluidisierten Zustand
γ_U	oberer charakteristischer Wert der Wichte (des spezifischen Gewichts) der Flüssigkeit
δ	Variationskoeffizient einer Eigenschaft (= Standardabweichung/Mittelwert)
θ	Zylinderkoordinate: Winkel in Umfangsrichtung

θ_c	Umfangswinkel des Fließkanals beim Entleeren mit großen Exzentrizitäten bezogen auf die Mittelachse des Siloschaftes
κ_{AAC}	Lastmodifikationsfaktor für die Anforderungsklasse
κ_{ar}	Lastmodifikationsfaktor für die Schlankheit (h_c/d_c)
κ_H	Lastmodifikationsfaktor für senkrecht auf vertikale Silowände wirkende Drücke
$\kappa_{H,M}$	Lastmodifikationsfaktor für senkrecht auf vertikale Silowände wirkende Drücke bei Massenfluss
$\kappa_{H,X}$	Lastmodifikationsfaktor für senkrecht auf vertikale Silowände wirkende Drücke bei gemischtem Fließen
κ_{FG}	Lastmodifikationsfaktor für die Fließfähigkeitskategorie des gelagerten Schüttgutes
κ_{ee}	Lastmodifikationsfaktor für die Entleerungsexzentrizität
κ_{ef}	Lastmodifikationsfaktor für die Füllexzentrizität
κ_T	Lastmodifikationsfaktor für Reibungsdrücke auf vertikale Silowände
$\kappa_{T,M}$	Lastmodifikationsfaktor für Reibungsdrücke auf vertikale Silowände bei Massenfluss
$\kappa_{T,X}$	Lastmodifikationsfaktor für Reibungsdrücke auf vertikale Silowände bei gemischtem Fließen
κ_U	Lastmodifikationsfaktor für die Nutzung des Silos (Lagerung oder Prozess)
κ_V	Lastmodifikationsfaktor für Vertikalspannungen im Schüttgut
κ_Z	kombinierter Lastmodifikationsfaktor für κ_{AAC} , κ_U und κ_{ar} (zur Vereinfachung)
μ	charakteristischer Wert des Wandreibungskoeffizienten einer vertikalen Wand
μ_{heff}	effektiver oder mobilisierter Wandreibungskoeffizient in einem flachen Trichter
μ_h	Wandreibungskoeffizient im Trichter
μ_m	Mittelwert des Wandreibungskoeffizienten zwischen Schüttgut und Silowand
ν	Poissonzahl des Schüttgutes
σ_r	Bezugs- bzw. Referenzspannung für die Versuche zur Bestimmung der Schüttgutkennwerte
ϕ_c	charakteristischer Wert des Winkels der inneren Reibung eines vorverdichteten Schüttgutes bei Entlastung
ϕ	charakteristischer Wert des Winkels der inneren Reibung eines vorverdichteten Schüttgutes bei Belastung
ϕ_{im}	Mittelwert des Winkels der inneren Reibung
ϕ_r	Böschungswinkel eines Schüttgutes (konischer Schütthaufen)
ϕ_w	Wandreibungswinkel ($= \arctan(\mu)$) zwischen Schüttgut und Silowand
ϕ_{wh}	Wandreibungswinkel im Trichter ($= \arctan(\mu_h)$) zwischen Schüttgut und Trichterwand
$\phi_{wh, mass}$	größter Wandreibungswinkel im Trichter ϕ_{wh} , bei dem ein Massenfluss im Silo sichergestellt ist
χ_L	Kontiguitätskoeffizient des Belastungsmoduls
χ_U	Kontiguitätskoeffizient des Entlastungsmoduls
ψ	Wandkontaktwinkel des exzentrischen Fließkanals bezogen auf die Mittelachse des Fließkanals

4 Klassifizierung von Silos

4.1 Anforderungsklassen für Silos

(1) In Abhängigkeit von der Angemessenheit des verwendeten Lastmodells, der strukturellen Ausbildung und der Empfindlichkeit hinsichtlich unterschiedlicher Versagensformen sollten bei der Bewertung der Lasten auf Silostrukturen verschiedene Stufen der Genauigkeit verwendet werden.

ANMERKUNG In allen folgenden Klassifizierungen bezieht sich die Bezeichnung Silo auf eine isolierte Struktur oder eine einzelne Zelle einer Silobatterie (siehe 3.2.60).

(2) Um die Unsicherheit bei der ausreichend präzisen Bestimmung von Einwirkungen zu berücksichtigen, sollten Silos je nach ihrer Empfindlichkeit gegenüber verschiedenen Versagensformen in Anforderungsklassen eingeteilt werden.

ANMERKUNG 1 Diese Klassifizierung kann abhängen von:

- der Gesamtgeometrie des Silos (schlank, niedrig usw.);
- der Exzentrizität der Schüttgutflughbahn beim Befüllen und ggf. ihres Auftreffens auf die Wand;
- der Exzentrizität der Auslauföffnung und ihre Auswirkung auf die Fließkanäle;
- der Querschnittsform des Silos, der entsprechenden Form des Trichters, der Flexibilität von Wänden bei nicht-kreisförmigem Querschnitt und den Auswirkungen von Exzentrizitäten auf das Füllen und die Entleerung;
- die Dauer der Lagerung (kurz- oder langfristig);
- die Form der Austragsvorrichtungen (Fluidisierung, Förderer, Schneckenförderer, freier Fall usw.).

ANMERKUNG 2 Die aufgelisteten Kriterien dienen dazu, die verschiedenen gelagerten Schüttgüter, unterschiedliche Korngrößen und -formen, unterschiedliche Schlankheiten, unterschiedliche Betriebsarten der Einrichtung, unterschiedliche Nutzungsfrequenzen und die verschiedenen Versagensarten von aus unterschiedlichen Werkstoffen gefertigten Silos mit unterschiedlichen Bauwerksstrukturen abzudecken.

ANMERKUNG 3 Tabelle 4.1 enthält anschauliche Beispiele für Silos verschiedener Anforderungsklassen.

ANMERKUNG 4 Tabelle 4.2 (NDP) enthält Beschreibungen mit quantifizierten Grenzen für verschiedene Fließfähigkeitskategorien, sofern nicht der Nationale Anhang andere Beschreibungen und quantifizierte Grenzen enthält. Zur Klassifizierung eines Schüttgutes in eine Fließfähigkeitskategorie siehe Anhang D.

Tabelle 4.1 — Anforderungsklassen (AAC) für Silos

Anforderungsklasse	Beschreibung	Anschauliche Beispiele
Anforderungsklasse 4	höchste Anforderungen	Silos oder Eigenschaften von Silos, die außerhalb der in 1.3 definierten Einschränkungen liegen, für die besondere Erwägungen oder ergänzende Informationen benötigt werden
Anforderungsklasse 3	höhere Anforderungen	große Silos mit großer Schlankheit große Silos mit extremer Exzentrizität beim Füllen oder Entleeren große Silos für die Lagerung von staubförmigem Schüttgut oder von Schüttgut, das aufgrund schlechter Fließeigenschaften Schwierigkeiten bereitet — große, niedrige Silos mit stark exzentrischer Oberfläche
Anforderungsklasse 2	mittlere Anforderungen	übliche Silos mit begrenzter Exzentrizität beim Füllen und Entleeren
Anforderungsklasse 1	geringere Anforderungen	kleine Silos für die Lagerung von frei fließendem Schüttgut, mit konzentrischer Füllung und Entleerung
Anforderungsklasse 0	sehr geringe Anforderungen	Silos mit einer sehr kleinen gelagerten Masse

Tabelle 4.2 (NDP) — Beschreibungen und quantifizierte Grenzen für Anforderungsklassen für Silos

Anforderungsklasse (AAC)	Beschreibungen und quantifizierte Grenzen
Anforderungsklasse 4	Silos, bei denen die Bewertung der Einwirkungen zusätzliche Erwägungen erfordert, die nicht im Anwendungsbereich dieser Norm (außerhalb der in 1.3 angegeben Einschränkungen) liegen, einschließlich Schüttgüter der Fließfähigkeitskategorie D (siehe Anhang C und Anhang D)
Anforderungsklasse 3	Silos, die die in 1.2 beschriebenen Einschränkungen nicht überschreiten, die aber die folgenden Bedingungen erfüllen: Silos für die Lagerung von Schüttgütern der Fließfähigkeitskategorien A und B mit einem Fassungsvermögen von mehr als 10 000 t sehr schlanke Silos für die Lagerung von Schüttgütern der Fließfähigkeitskategorien A und B mit einem Fassungsvermögen von mehr als 500 t schlanke Silos für die Lagerung von Schüttgütern der Fließfähigkeitskategorien A und B mit einem Fassungsvermögen von mehr als 1 000 t und einer exzentrischen Entleerung mit $e_o/d_c > 0,125$ Silos für die Lagerung von Schüttgütern der Fließfähigkeitskategorien A und B mit einem Fassungsvermögen von mehr als 200 t und einer exzentrischen Entleerung mit $e_o/d_c > 0,25$ Silos für die Lagerung von Schüttgütern der Fließfähigkeitskategorie C mit einem Fassungsvermögen von mehr als 200 t niedrige Silos mit einer Exzentrizität der Schüttgutoberfläche von $e_t/d_c > 0,25$
Anforderungsklasse 2	Alle Silos, die durch diese Lastnorm abgedeckt sind und nicht in den anderen beiden Klassen enthalten sind
Anforderungsklasse 1	Silos mit einem Fassungsvermögen zwischen 2 t und 50 t, unabhängig von Exzentrizitäten und der Fließfähigkeitskategorie des gelagerten Schüttgutes
Anforderungsklasse 0	Silos mit einem Fassungsvermögen von weniger als 2 t, unabhängig von Exzentrizitäten und der Fließfähigkeitskategorie des gelagerten Schüttgutes
ANMERKUNG Die in dieser Tabelle angeführte Differenzierung in die unterschiedlichen Anforderungsklassen ist unter Berücksichtigung der Unsicherheiten einer genauen Bestimmung der Einwirkungen festgelegt worden. Die Regelungen für kleine Silos sind einfach und konservativ auf der sicheren Seite, weil sie eine ihnen eigene strukturelle Robustheit besitzen und die hohen Kosten z. B. für eine Bestimmung von Schüttgutkennwerten nicht gerechtfertigt sind. Die Auswirkungen auf die Standsicherheit und die Risiken in Hinblick auf Leben und Eigentum werden in den Einteilungen in die Versagensfolgeklassen von EN 1990 berücksichtigt.	

(3) Für Silos der Anforderungsklasse 1 (AAC1) dürfen vereinfachte Verfahren angewendet werden, wo dies in dieser Norm angegeben ist.

(4) Auf Silos der Anforderungsklasse 0 (AAC0) dürfen die Regeln für die Anforderungsklasse 1 angewendet werden, dies ist jedoch nicht formal vorgeschrieben.

(5) Für Silos der Anforderungsklasse 4 (AAC4) müssen ergänzende Informationen eingeholt werden, die über die in dieser Norm genannten hinausgehen.

(6) Wenn dies zweckdienlich ist, dürfen eine höhere Anforderungsklasse als unter (2) gefordert und jeder Teil der beschriebenen Vorgehensweise (Lastansätze) zugrunde gelegt werden.

(7) Die Wahl der Anforderungsklasse darf von der zuständigen Behörde getroffen oder, wenn dies nicht erfolgt, für ein bestimmtes Projekt zwischen den beteiligten Parteien vereinbart werden.

4.2 Siloverwendungsklassen

(1) Silos sollten nach der Häufigkeit, mit der extreme Lastfälle auftreten können, klassifiziert werden.

ANMERKUNG 1 Die Klassifizierung bezieht sich auf den Füll- und den Entleerungsvorgang, die beide die vom gelagerten Schüttgut eingebrachten Lasten beeinflussen, und auf die Wahrscheinlichkeit, mit der Silo bei Eintreten einer Bemessungswindlast leer ist.

ANMERKUNG 2 Da Sicherheitsbewertungen von Eurocode-Normen auf der Eintrittswahrscheinlichkeit einer bestimmten Bemessungssituation innerhalb einer definierten Zeitspanne beruhen, muss diese Unterscheidung vorgenommen werden, um eine ausreichende Sicherheit des Silos angesichts eines statistisch häufigen Auftretens einer Bemessungssituation sicherzustellen und gleichzeitig die Wirtschaftlichkeit für Fälle angemessen zu berücksichtigen, in denen die Eintrittswahrscheinlichkeit von Bemessungssituationen deutlich geringer ist.

(2) Es sollte zwischen Lager- und Prozesssilos unterschieden werden.

ANMERKUNG Die Definitionen sind 3.2 zu entnehmen.

(3) Silos, die wiederholt teilweise gefüllt und teilweise entleert werden und deren Inhalt sich regelmäßig ändert, sollten nicht als Lagersilos klassifiziert werden.

(4) Die Klassifizierung eines Silos als Lagersilo oder als Prozesssilo darf für ein bestimmtes Projekt zwischen den beteiligten Parteien vereinbart werden.

5 Bemessungssituationen und Modellierung der Einwirkungen

5.1 Allgemeines

(1) Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter sollten bestimmt werden, indem die verschiedenen Bemessungssituationen betrachtet werden, die im Betrieb der Einrichtung auftreten können, einschließlich vorübergehender und dauerhafter Lasten im Zusammenhang mit dem Füllen und Entleeren.

5.2 Darstellung von Lasten auf Silos

5.2.1 Allgemeines

(1) Lastfälle von Silos müssen in Abhängigkeit von ihren Auswirkungen auf das Tragwerk und den potentiellen Versagensarten des Silos ausgewählt werden.

(2) Größenordnung und Verteilung der Einwirkungen auf Silos sollten unter Berücksichtigung der Silostruktur, der Eigenschaften der gespeicherten Schüttgüter, des Füllvorgangs und der sich beim Entleeren der Silos einstellenden Fließprofile ermittelt werden.

ANMERKUNG Die Größenordnung und die Verteilung der Bemessungslasten hängen von der Form des Silobauwerks, von den Materialkennwerten der gelagerten Schüttgüter, dem Füllvorgang und von den Fließprofilen ab, die sich beim Entleeren ausbilden. Die inhärenten Unterschiede in den Eigenschaften der Schüttgüter und die Vereinfachungen in den in dieser Norm verwendeten Lastmodellen führen zu Abweichungen zwischen den tatsächlich auftretenden Silolasten und den Lastannahmen (Bemessungslasten). Eine genaue Vorhersage des vorherrschenden mittleren Drucks, seiner Streuung und seiner zeitlichen Veränderlichkeit ist z. B. mit den heutigen Erkenntnissen nicht möglich.

(3) In prEN 1991-4 definierte Silolasten sollten als charakteristische Lasten behandelt werden.

ANMERKUNG 1 Die charakteristischen Werte der Einwirkungen auf Silos dieser Norm sind so zu verstehen, dass sie mit einer Wahrscheinlichkeit von 98 % während einer Bezugsdauer von einem Jahr nicht überschritten werden.

ANMERKUNG 2 Die charakteristischen Werte von Silolasten sind Nennwerte. Sie basieren nicht auf einer formalen statistischen Berechnung, da solche Daten gegenwärtig nicht verfügbar sind. Sie basieren auf in früheren Normen verwendeten historischen Werten, Erfahrungen aus der Praxis und der Interpretation von Forschungsergebnissen. Die obige Beschreibung entspricht der in EN 1990, die die Verwendung von Nennwerten zulässt.

ANMERKUNG 3 Die Definitionen in EN 1990 beziehen sich in erster Linie auf natürliche Ereignisse, deren Eintrittswahrscheinlichkeit nicht durch menschliches Handeln beeinflusst wird. Im Gegensatz dazu werden die Lasten in einem Silo im Wesentlichen nicht von natürlichen Ereignissen beeinflusst, sondern von Entscheidungen im Betrieb. Täglich gefüllte und entleerte Silos werden mit einer höheren Wahrscheinlichkeit den für die Bemessung angesetzten charakteristischen Lastwerten ausgesetzt als solche, die nur einmal jährlich oder unregelmäßig vollständig gefüllt und entleert werden.

ANMERKUNG 4 Die für ein Silo zu berücksichtigenden Lastfälle hängen von den Auswirkungen auf das Tragwerk und den potentiellen Versagensarten des Silos ab.

5.2.2 Darstellung von Lasten auf Siloinnenflächen

(1) Die Lasten auf die Silowandflächen sollten durch räumlich veränderliche Drücke und Reibungsdrücke dargestellt werden, die vom Spannungszustand im Schüttgut verursacht werden.

ANMERKUNG In dieser Norm wird der Spannungszustand im Schüttgut als „Spannung“ bezeichnet. Die auf die Silowandflächen verteilt wirkende Kraft wird als „Druck“ bezeichnet.

(2) Die vom Schüttgut auf Silowände ausgeübten Lasten sollten durch horizontale Druckanteile p_h auf die inneren Oberflächen der senkrechten Silowand, durch einen senkrecht auf eine geneigte Wand wirkenden Druck p_n , durch auf die Wand wirkende Reibungsdrücke p_w und p_t und durch die Vertikalspannung im gelagerten Schüttgut p_v angesetzt werden.

ANMERKUNG Die auf waagerechte Böden und Zugstangen in Silos wirkenden Lasten werden aus den obigen grundlegenden Komponenten abgeleitet.

(3) Die Lastansätze für das Befüllen und Entleeren sollten als Lastfälle bei der Betrachtung von Bemessungssituationen für die Tragsicherheitsnachweise als auch die Gebrauchstauglichkeitsnachweise verwendet werden.

(4) Die Lastfälle sollten auf der Fließcharakteristik der gespeicherten Schüttgüter entsprechend Anhang D basieren. Die angemessenen Lastfälle sollten für alle relevanten Bemessungssituationen bestimmt werden.

(5) Lasten auf Silos infolge der gelagerten Schüttgüter sollten üblicherweise berücksichtigt werden, wenn sich der Silo im vollständig befüllten Zustand befindet.

ANMERKUNG In Situationen mit hoher Exzentrizität beim Füllen kann die kritischste Bemessungssituation auftreten, wenn der Silo nicht voll ist.

5.2.3 Einstufung der Einwirkungen auf Silos

(1) Falls nicht etwas anderes angegeben ist, sollten beim Füllen oder Entleeren vom Schüttgut auf das Silos ausgeübte Lasten für die in 7, 8, 9 und 10 angegebenen Lastfälle als veränderliche, ortsfeste, quasistatische Einwirkungen klassifiziert werden.

(2) In 7.2.4 angegebene Entleerungslasten (Bandlasten) sollten als veränderliche freie quasistatische Einwirkungen klassifiziert werden.

(3) In 8.3 angegebene Entleerungslasten (Ersatzlasten) sollten als veränderliche freie quasistatische Einwirkungen klassifiziert werden.

(4) In 8.4 angegebene Entleerungslasten (große Exzentrizität des Fließkanals) sollten als veränderliche freie quasistatische Einwirkungen im Hinblick auf den Umfangswinkel des Fließkanals klassifiziert werden, es sei denn, es kann eine bestimmte Position relativ zu einer festen Position der Auslauföffnung sichergestellt werden.

(5) Lasten aus Luft- bzw. Gasdrücken in Verbindung mit pneumatischen Förderungsanlagen sollten als veränderliche ortsfeste statische Einwirkungen klassifiziert werden.

(6) Lasten infolge von Staubexplosionen sollten als veränderliche ortsfeste außergewöhnliche dynamische Einwirkungen klassifiziert werden.

(7) Lasten infolge von unterschiedlicher Wärmeausdehnung sollten als veränderliche ortsfeste außergewöhnliche statische Einwirkungen klassifiziert werden.

(8) Lasten durch das Füllen des Silos mit heißem Schüttgut sollten als veränderliche ortsfeste quasistatische Einwirkungen klassifiziert werden.

(9) Lasten durch das Füllen des Silos mit aufquellendem Schüttgut sollten als außergewöhnliche veränderliche ortsfeste quasistatische Einwirkungen klassifiziert werden.

(10) Lasten infolge eines aufgrund von unzureichender Entlüftung erhöhten oder verringerten Luftdrucks sollten als außergewöhnliche veränderliche ortsfeste quasistatische Einwirkungen klassifiziert werden.

(11) Wenn eine Entleerungshilfe (zum Beispiel ein Zentralrohr mit Schlucköffnungen an der Wand) eingebaut ist, sollte der Silo für das Fließprofil ausgelegt werden, das der Hersteller der Fließhilfe garantiert. Wenn zwischen den beteiligten Parteien vereinbart, sollte eine Fehlfunktion von Sicherheitsventilen durch einen geeigneten, als außergewöhnlich klassifizierten Lastfall berücksichtigt werden.

(12) Wenn eine Entleerungs-Fließhilfsvorrichtung eingebaut ist, sollte der Silo für das Fließprofil ausgelegt werden, das der Hersteller der Fließhilfe garantiert. Wenn zwischen den beteiligten Parteien vereinbart, sollte eine Fehlfunktion der Entleerungshilfe durch einen geeigneten, als außergewöhnlich behandelten Lastfall berücksichtigt werden.

5.2.4 Bewertung von auf Silos wirkenden Lasten

(1) Bei der Bewertung von Silolasten infolge von Schüttgut sollten folgende Einflüsse berücksichtigt werden:

- die Silogeometrie;
- die Streuung der Schüttgutkennwerte;
- die Variation des Reibungskoeffizienten an verschiedenen Teilen der Silowand;
- die Befüll- und Entleerungsverfahren.

(2) Bei der Ermittlung der Lasten sollten immer die oberen charakteristischen Werte der Schüttgutwichte γ verwendet werden.

(3) Lasten auf innere Oberflächen des Silobauwerks sollten zunächst als symmetrisch behandelt und anhand der mechanischen Eigenschaften des konkreten zu lagernden Schüttgutes bewertet werden.

(4) Da sich die Eigenschaften eines jeden Schüttgutes zwangsläufig von Zeit zu Zeit ändern, sollte eine Bandbreite an Eigenschaften wie in 6.1 (9) definiert verwendet werden, um die resultierenden Spannungen, die sich an den Silowänden ausbilden können, abzudecken.

(5) Für Silos der AAC1 darf ein vereinfachter Umgang mit der Variabilität der Schüttgutkennwerte erfolgen, bei dem Mittelwerte aller Schüttgutkennwerte mit Ausnahme der Wichte angesetzt, jedoch ein größerer Lastmodifikationsfaktor (Gleichung 5.14) verwendet wird, um sicherzustellen, dass die Variabilität des Schüttgutes erfasst wird.

(6) Die Ermittlung der Lasten eines Lastfalles sollte immer für eine bestimmte Kombination von zusammengehörigen Schüttgutkennwerten (Wandreibungskoeffizient μ , Horizontaldruckverhältnis K und Winkel der inneren Reibung ϕ_i) erfolgen, so dass jedem Grenzzustand eine spezielle, definierte Beschaffenheit eines Schüttgutes zugeordnet ist (siehe 6.1).

(7) Die Größenordnung der auf Silos wirkenden Lasten muss auf der Fließcharakteristik der gespeicherten Schüttgüter entsprechend Anhang C und Anhang D basieren.

(8) Da die auf Silowände wirkenden Lasten nicht vollständig symmetrisch sind, sollte der Verlust der Symmetrie bei der Bemessung berücksichtigt werden.

(9) Wenn das Füllen und/oder die Entleerung mit lediglich geringer Exzentrizität erfolgen, wird der Umfang dieses Symmetrieverlusts durch Änderungen der Lastmodifikationsfaktoren berücksichtigt, die von der spezifischen Geometrie und dem gelagerten Schüttgut abhängen (siehe 5.6).

(10) Wenn die wohldefinierten Bedingungen geringer Exzentrizität nach 5.3.3 nicht erfüllt sind, sollten die Auswirkungen auftretender unsymmetrischer Druckmuster durch besondere Silolastfälle wie in 5.5 definiert dargestellt werden.

(11) Reagiert die gewählte Form der Silostruktur empfindlich gegenüber Änderungen der anzusetzenden Lastvorgaben, sollte dies durch entsprechende Untersuchungen berücksichtigt werden.

(12) Besondere Aufmerksamkeit sollte Lasten in bestimmten, in 5.5 definierten Silobauwerksformen bzw. Silos unter besonderen Bedingungen geschenkt werden.

(13) Wenn von Maschinen verursachte Vibrationen auf das Schüttgut übertragen werden können oder wo klar ist, dass die Schüttgutwichte durch andere äußere Einflüsse zunehmen kann, sollte der Ansatz einer Schüttgutwichte erwogen werden, die größer ist als der obere charakteristische Wert für das Schüttgut. Ggf. sollten Vibrationstests an einer Schüttgutprobe vorgenommen werden, um das Potential solcher Zunahmen zu bestimmen.

5.2.5 Grundlegende und spezielle Silolastfälle

(1) In Abhängigkeit von ihren Auswirkungen auf das Tragwerk und von den potentiellen Arten eines Tragwerksversagens des Silos wird zwischen grundlegenden und speziellen Lastfällen unterschieden. Grundlegende Silolastfälle beziehen sich auf vergleichsweise einfache Silos mit symmetrischer Füllung und Entleerung, in denen Schüttgut mit guten Handhabungseigenschaften gelagert wird. Spezielle Silolastfälle beziehen sich auf komplexere Situationen, die sich in nicht konzentrisch gefüllten und nicht konzentrisch entleerten Silos ergeben können.

(2) Grundlegende Silolastfälle sollten für alle Silos angesetzt werden, auch wenn ebenfalls ein spezieller Silolastfall gilt.

(3) In bestimmten Silos können besondere Umstände eintreten, die zu Lastfällen führen, die sich sehr von üblichen symmetrischen Lastverhältnissen unterscheiden und angewendet werden sollten, wenn die Möglichkeit besteht, dass die entsprechenden Bedingungen erfüllt sind. Diese werden als „spezielle Silolastfälle“ (SSLC, en: Silo Special Load Cases) bezeichnet und die zugehörigen Lastverhältnisse werden in Abschnitt 8 und Abschnitt 10 für die Verwendung in dem Fall definiert, dass die entsprechenden besonderen Umstände ausschließlich in den Anforderungsklassen 2 und 3 eintreten. Diese Lastfälle werden für Silos der Anforderungsklasse 1 sowie konventionelle Silos, die konzentrisch gefüllt und entleert werden, nicht benötigt. Auch für Silos mit einer Schlankheit von weniger als $h_c/d_c = 4,0$, in denen keine Schüttgüter der Fließfähigkeitskategorien C und D (siehe Abschnitt D.2 und Abschnitt D.3) gelagert werden, werden sie nicht benötigt. Einige dieser speziellen Lastfälle gelten nur für Silos mit kreisförmigem Querschnitt.

(4) Die sich ergebende Tragfähigkeit des Silobauwerks ist extrem empfindlich gegenüber Lastfällen, die mit einem beabsichtigten oder unbeabsichtigten Verlust an Symmetrie einhergehen. Diese Bedingungen sollten bei der Auslegung sorgfältig berücksichtigt werden, besonders bei einer größeren Schlankheit, oder wenn das Schüttgut schwierig handzuhaben und/oder der Silo groß ist. Um auf diese Herausforderung zu reagieren, bietet diese Norm die drei im Folgenden umrissenen und klar unterscheidbaren Pfade:

(5) Im ersten Pfad für symmetrische oder nahezu symmetrische Lastfälle (siehe Tabelle 5.2) wird das einfache klassische Lastmodell beibehalten, aber durch die Verwendung von Teilsicherheitsbeiwerten angepasst, die vom Schüttgut, von der Schlankheit, den geringfügigen Exzentrizitäten beim Füllen und bei der Entleerung und von der Betriebsart abhängen. Diese Bedingungen werden als grundlegende Silolastfälle bezeichnet. Die entsprechenden Berechnungen werden in Abschnitt 7 und Abschnitt 9 erläutert. Dieses unkomplizierte Verfahren sollte angewendet werden, wenn es relevant ist, um die nachfolgende Tragwerksplanung einfach zu halten.

(6) Wenn die Exzentrizität der Füllung oder Entleerung den für kleine Exzentrizitäten in Tabelle 5.2 definierten Wert überschreitet und als mittlere Exzentrizität klassifiziert wird, wird auf komplexere Bedingungen wie in 5.4 beschrieben Bezug genommen. Je nach Schüttgut ist es zulässig, dass ein einfaches unsymmetrisches Lastmodell als Ersatz für die deutlich kompliziertere reale Last fungiert. Die unsymmetrischen Ersatzlasten werden als einfache spezielle Silolastfälle definiert und in Abschnitt 8 und Abschnitt 10 behandelt. Dieser zweite Pfad ist jedoch vollkommen ungeeignet für Fälle mit großen Exzentrizitäten (siehe Tabelle 5.2). Diese Pfade sollten verfolgt werden, wenn die entsprechenden Bedingungen vorliegen.

(7) Der dritte Pfad wird ebenfalls als spezieller Silolastfall bezeichnet, er bezieht sich jedoch auf Fälle mit größeren Exzentrizitäten beim Füllen oder Entleeren (siehe Tabelle 5.2) sowie andere deutlich abweichende Situationen, und für diese sollten die speziellen mechanischen Lastmodelle angewendet werden. Dies wird ebenfalls in Abschnitt 8 und Abschnitt 10 behandelt.

(8) Die sachgemäßen Pfade durch die Norm sind separat für vertikale Wände und Trichter klar und deutlich in den entsprechenden Fließdiagrammen in Anhang G dargestellt.

5.2.6 Bemessungssituationen für spezielle Konstruktionsformen von Silos

(1) Besondere Aufmerksamkeit sollte bestimmten Silobauwerksformen unter besonderen Bedingungen geschenkt werden.

ANMERKUNG In diesem Unterabschnitt werden viele separate Punkte für unterschiedliche Bedingungen behandelt.

(2) In allen kreisförmigen Silos, die unsymmetrischen Druckverhältnissen ausgesetzt sind, sollten sorgfältige Vorkehrungen getroffen werden, um sicherzustellen, dass die Oberkante einer zylindrischen Wand durch Befestigung an einem starren Dach oder durch einen Versteifungsring kreisförmig gehalten wird.

ANMERKUNG Bei unsymmetrischen Lasten kann die Verzerrung des kreisförmigen Querschnitts zu einer beträchtlichen Verringerung der Tragfähigkeit führen.

(3) Bei der Bemessung von Stahlbetonsilos für den Gebrauchszustand sollten die Rissbreiten auf ein geeignetes Maß beschränkt werden. Die Kontrolle der Rissbreite sollte die Nachweise zur Rissbreitenbeschränkung nach EN 1992 unter Berücksichtigung der sich aus den Umgebungsbedingungen des Silos ergebenden Expositionsklassen erfüllen.

(4) Bei Metallsilos, die maßgeblich aus Konstruktionen mit Schraub- oder Nietverbindungen bestehen, sollte die räumliche Anordnung dieser Lasten bei der Anwendung der Ausführungen für freie Lasten (Ersatzlasten und Bandlasten) berücksichtigt werden.

(5) Bei Metallsilos mit rechteckigem Querschnitt, die innerhalb des Siloschaftes Zugbänder zur Reduzierung der Wandbiegemomente enthalten, sollten die Ausführungen von 8.8.2 beachtet werden.

(6) Für die Bewertung der Ermüdung sollte die geplante Nutzungsdauer angesetzt werden. Ein Lastzyklus sollte eine vollständige Befüllung und Entleerung eines Silos, oder im Falle eines mit Lufteinblasen beaufschlagten Silos (Bild 5.9c), eine vollständige Abarbeitung (Rotation) der mit Lufteinblasen beaufschlagten Sektoren umfassen. Ermüdungseffekte sollten auch bei Silos berücksichtigt werden, die von schwingenden Maschinen/Anlagenkomponenten beeinflusst werden.

(7) Vorgefertigte Silos sollten auch für Einwirkungen bei der Herstellung, beim Transport und bei der Montage bemessen werden.

(8) Bei Schlupf- und Einstiegsöffnungen in den Silo- oder Trichterwänden sollten die Lasten auf die Verschlussdeckel mit dem doppelten Wert der auf die angrenzenden Wandabschnitte anzusetzenden maximalen Drücke berücksichtigt werden. Dieser Druck sollte nur für die Bemessung des Verschlussdeckels und seine Auflagerung bzw. Befestigungskonstruktionen angesetzt werden.

(9) Wenn das Silodach Lasten von Staubfilteranlagen, Zyklonen, mechanischen Transportvorrichtungen oder sonstigen Anlagenteilen aufzunehmen hat, sollten diese Lasten als Eigengewicht behandelt werden, wenn sie dauerhaft sind, und als Nutzlast, wenn sie nur vorübergehender Natur sind.

(10) Wenn pneumatische Beförderungssysteme zur Befüllung oder Entleerung von Silos verwendet werden, sollte der resultierende Gasüberdruck oder Gasunterdruck im Inneren berücksichtigt werden. Wenn zwischen den beteiligten Parteien vereinbart, sollte eine Fehlfunktion der Sicherheitsventile bei der Bemessung unter Anwendung eines als außergewöhnlich eingestuften Lastfalls berücksichtigt werden.

ANMERKUNG Diese Drücke werden üblicherweise über in der Bemessungsdokumentation festgelegte Einstellungen der Sicherheitsventile gesteuert. Silos sollten mit geeigneten Entlastungsvorrichtungen für solche unvorhergesehenen Ereignisse ausgestattet sein, wenn solche Ereignisse nicht durch die Silokonstruktion ausgeschlossen werden können.

(11) Beim Einsatz von Schwingungseinrichtungen, Förderanlagen, Luftkanonen oder rotierenden Entnahmearmen am Siloboden sollten die dadurch bedingten Laständerungen im Hinblick auf den Grenzzustand der Ermüdung untersucht werden. Die für die Bemessungsberechnungen relevanten Informationen sollten von den beteiligten Parteien vereinbart werden.

(12) Bei einem Umbau eines bestehenden Silos durch Einsetzen einer Auskleidung der Silowände sollten die Folgen einer veränderten Wandreibung auf die Silobemessung betrachtet werden, einschließlich der möglichen Konsequenzen infolge eines sich möglicherweise einstellenden veränderten Fließprofils.

5.3 Bewertung der Füll- und Entleerungsbedingungen von Silos

5.3.1 Allgemeines

(1) Unterschiedliche Siloschlankheiten (Verhältnis von Höhe zu Durchmesser), Trichtergeometrien und Anordnungen der Auslauföffnungen führen sowohl für das Füllen als auch das Entleeren zu unterschiedlichen Bemessungssituationen, die betrachtet werden sollten.

(2) Bei der Bemessung sollten die Auswirkungen der sich beim Entleeren einstellenden Fließprofile beachtet werden, die in folgende grundlegende Kategorien eingeteilt werden können (symmetrische Profile siehe Bild 5.1):

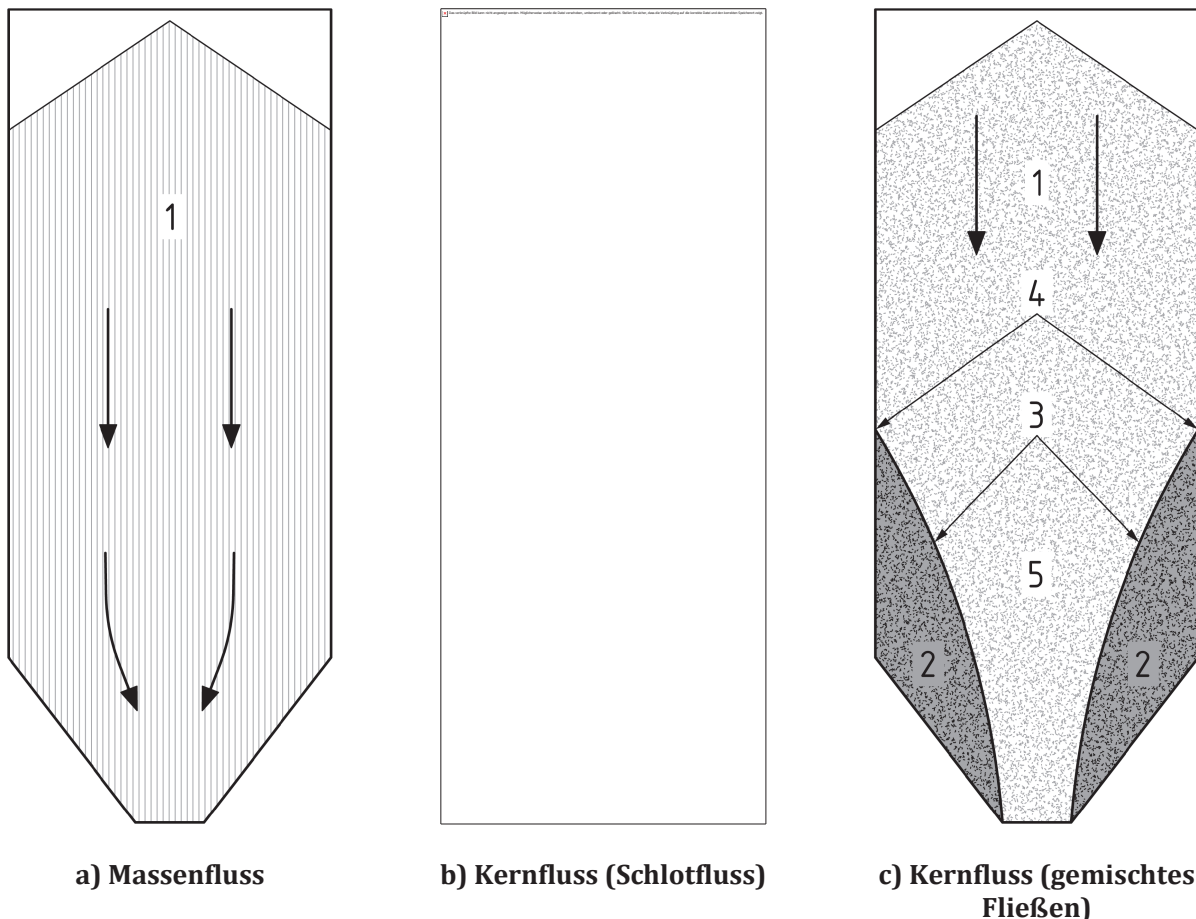
- Massenfluss;
- Schlotfluss;
- gemischtes Fließen.

(3) Da die Relevanz der verschiedenen Fließprofile sehr stark von der Schlankheit des Silos (siehe Bild 5.2) abhängt, sollte die Schlankheit in Abhängigkeit von den funktionellen Anforderungen an das Silo, den Standortbedingungen und der Notwendigkeit einer Abdeckung komplexerer Lastverhältnisse gewählt werden (siehe 5.5).

(4) Die Art des symmetrischen Fließprofils (Massen- oder Kernfluss, gemischtes Fließen oder Schlotfluss) sollte wie in 5.3.2 angegeben ermittelt werden.

ANMERKUNG Wenn ein symmetrischer Schlotfluss sichergestellt ist, erfolgt üblicherweise keine wesentliche Zunahme des symmetrischen Drucks über die Werte für das Füllen hinaus. Wenn ein symmetrischer Massenfluss sichergestellt ist, kommt es üblicherweise nur zu geringen Zunahmen des symmetrischen Drucks über die Werte für das Füllen hinaus. Wenn jedoch ein nahezu symmetrisches gemischtes Fließen erfolgt (siehe Bild 5.1c), findet an verschiedenen Stellen der Wand eine signifikante Zunahme der symmetrischen Drücke und der Kompression der vertikalen Wände über die Werte für das Füllen hinaus statt.

(5) Wenn die Steuerung des Fließprofils wesentlich für die verfahrenstechnische Bemessung ist, sollten spezielle Wandreibungsmessungen nach Abschnitt D.12 in Erwägung gezogen werden.



Legende

- 1 gesamtes Schüttgut in Bewegung
- 2 Schüttgut ruht
- 3 Fließkanalgrenze
- 4 effektiver Übergang
- 5 effektiver Trichter

ANMERKUNG Sowohl Schlotfluss als auch gemischtes Fließen zählen zum Kernfluss.

Bild 5.1 — Allgemeine symmetrische Fließprofile

ANMERKUNG 1 Obwohl für Massenfluss üblicherweise steilere Trichter benötigt werden und flachere Trichter Kernfluss erzeugen, haben alle Trichter in Bild 5.1 dieselbe Steilheit, um die Abhängigkeit des Fließprofils vom Wandreibungskoeffizienten des Trichters und vom Winkel der inneren Reibung des Schüttgutes zu unterstreichen.

ANMERKUNG 2 Anhang D enthält weitere Informationen über die Auswirkungen der Schüttguteigenschaften auf die Ausbildung des Fließprofils.

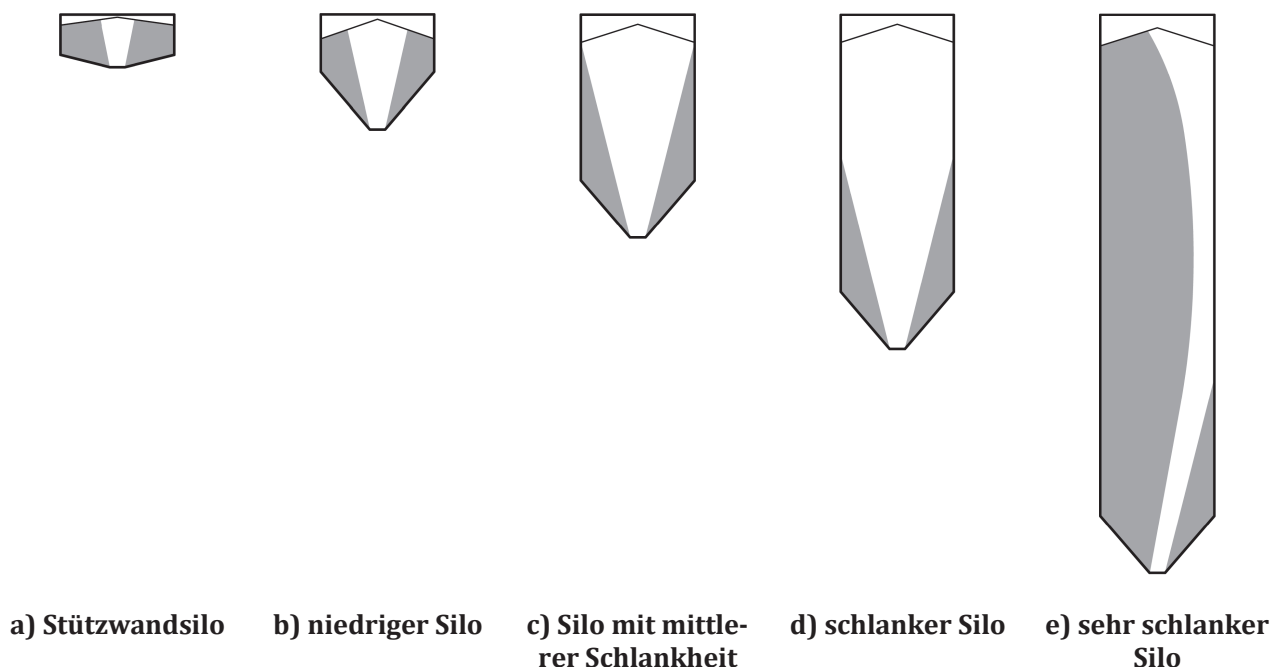


Bild 5.2 — Auswirkung der Schlankheit (Verhältnis Höhe zu Durchmesser) auf den Schlotfluss und das gemischte Schüttgutfließen

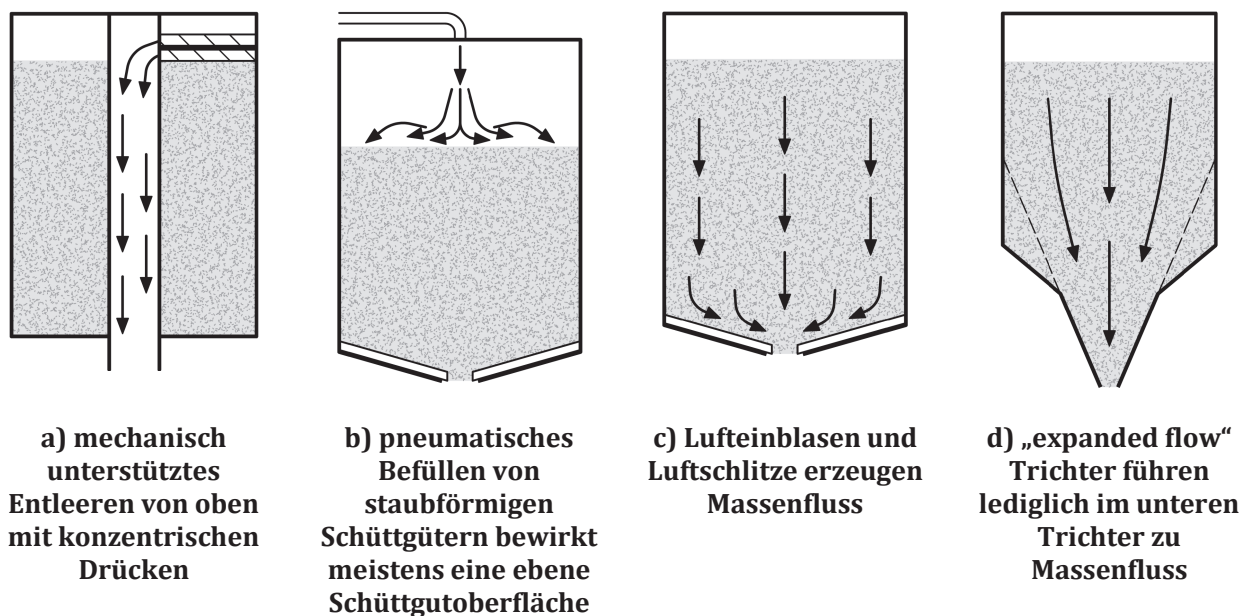


Bild 5.3 — Einige weniger übliche symmetrische Füll- und Entleerungsanordnungen

5.3.2 Vorhersage von symmetrischen Fließprofilen

(1) Massenfluss (Bild 5.1a) darf als sichergestellt gelten, wenn der Wandreibungswinkel im Trichter ϕ_{wh} (in Grad) kleiner als der Grenzwert $\phi_{wh, mass}$ ist, der mit dem halben Scheitelwinkel des Trichters β_h (in Grad) (Bild 5.4) zusammenhängt und gegeben ist durch:

$$\phi_{wh, mass} = f_0 + f_1 \beta_h + f_2 \beta_h^2 \quad (5.1)$$

Dabei ist

$$f_0 = 22 + 0,28 \phi_i \quad (5.2)$$

$$f_1 = 1,03 - \frac{\phi_i}{16} + \left(\frac{\phi_i}{36}\right)^2 \quad (5.3)$$

$$f_2 = -0,027 + \frac{\phi_i}{760} - \left(\frac{\phi_i}{220}\right)^2 \quad (5.4)$$

Dabei ist

$\phi_{wh, mass}$ der größte Wert für ϕ_{wh} in Grad, bei dem Massenfluss sichergestellt ist;

β_h der Trichterneigungswinkel in Grad, gemessen in Bezug zur vertikalen Achse (halber Scheitelwinkel);

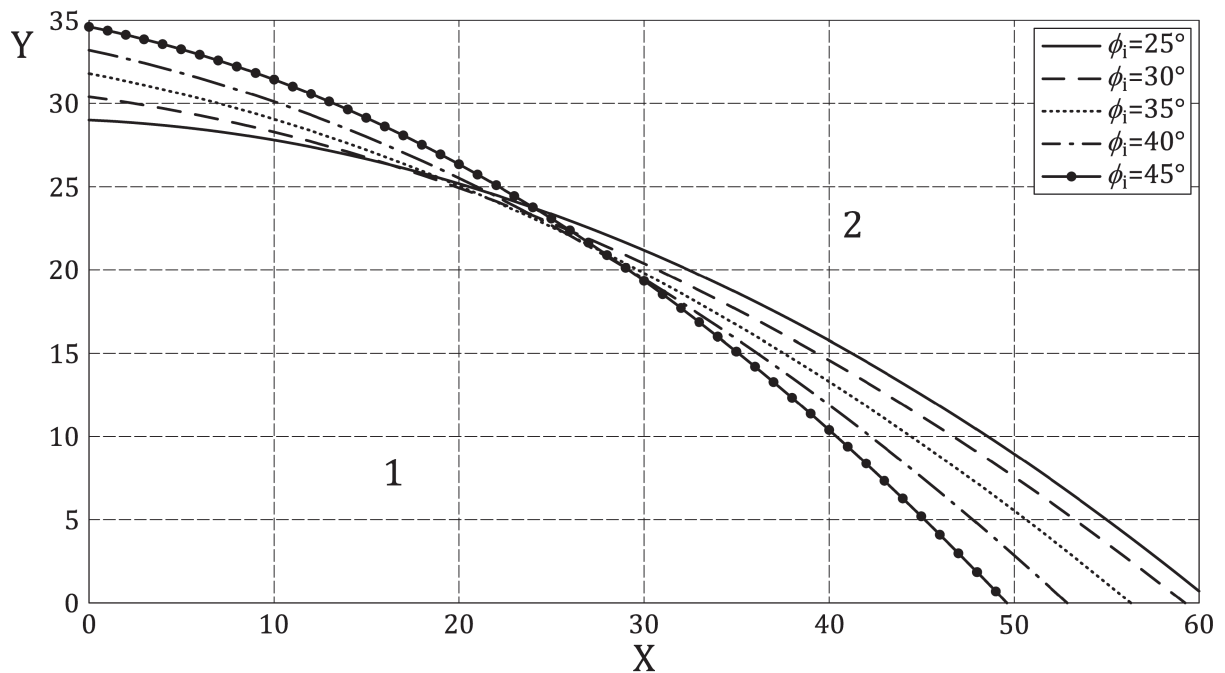
ϕ_i der in (15) definierte Winkel der inneren Reibung des gespeicherten Schüttgutes in Grad.

ANMERKUNG 1 Wenn die Wandreibung des Schüttgutes am Trichter durch den zugehörigen Wandreibungskoeffizienten μ_h des Trichters (siehe Anhang C) angegeben wird, kann der entsprechende Wert für ϕ_{wh} über $\phi_{wh} = \arctan(\mu_h)$.

ANMERKUNG 2 Wenn der Wert für ϕ_{wh} unter Einhaltung der Regeln von 6.1 (9) vom Wert für μ_h in Anhang C abgeleitet wird, muss anhand des oberen charakteristischen Werts für μ_h bestimmt werden, ob Massenfluss erzielt werden kann.

(2) Wenn der halbe Trichterwinkel β_h größer ist als 22° , sollte der obere charakteristische Wert für ϕ angesetzt werden. Wenn der halbe Trichterwinkel β_h kleiner ist als 22° , sollte der untere charakteristische Wert für ϕ angesetzt werden (siehe 6.1 und Anhang C).

ANMERKUNG Die Wahl unterschiedlicher charakteristischer Werte für verschiedene Variationsbreiten der Trichtersteilheit führt zu einer sicheren Abschätzung der Bedingungen, unter denen sich ein Massenfluss verlässlich vorhersagen lässt.



Legende

- X Neigungswinkel der Trichterwand bezogen auf die Vertikale bzw. der flachste Winkel der Trichterwände im Falle eines quadratischen oder rechteckigen pyramidenartigen Trichters (resultierender Innenwinkel β_h (in Grad))
- Y Wandreibungswinkel ϕ_{wh} des Trichters (in Grad)
- 1 Massenfluss
- 2 Kernfluss (siehe Bild 5.1b und c)

ANMERKUNG In der der Grenze zum Massenfluss nächsten Zone ist das Fließprofil schwieriger vorherzusagen [siehe auch 1.2 (18)].

Bild 5.4— Abgrenzung von Massen- und Kernflussbedingungen bei konischen Trichtern

(3) Bei einem keilförmigen (nur in einer Dimension konvergierenden) Trichter darf Massenfluss als sichergestellt gelten (Bild 5.5), wenn die Trichtersteilheit, ausgedrückt durch den halben Scheitelwinkel β_h in Grad kleiner als $\beta_{h,mass}$, gegeben durch:

$$\beta_{h,mass} = \frac{(446^\circ - 1,52\phi_i)}{(228^\circ + \phi_i)} \{37,6^\circ + 0,165\phi_i - \phi_{wh}\} \quad (5.5)$$

ist, wobei ϕ_i und ϕ_{wh} jeweils in Grad angegeben werden und der Einschränkung unterliegen, dass der in Gleichung (5.5) angesetzte Wert für ϕ_{wh} nicht größer als $\phi_{wh,lim}$ sein sollte, wobei $\phi_{wh,lim}$ gegeben ist durch:

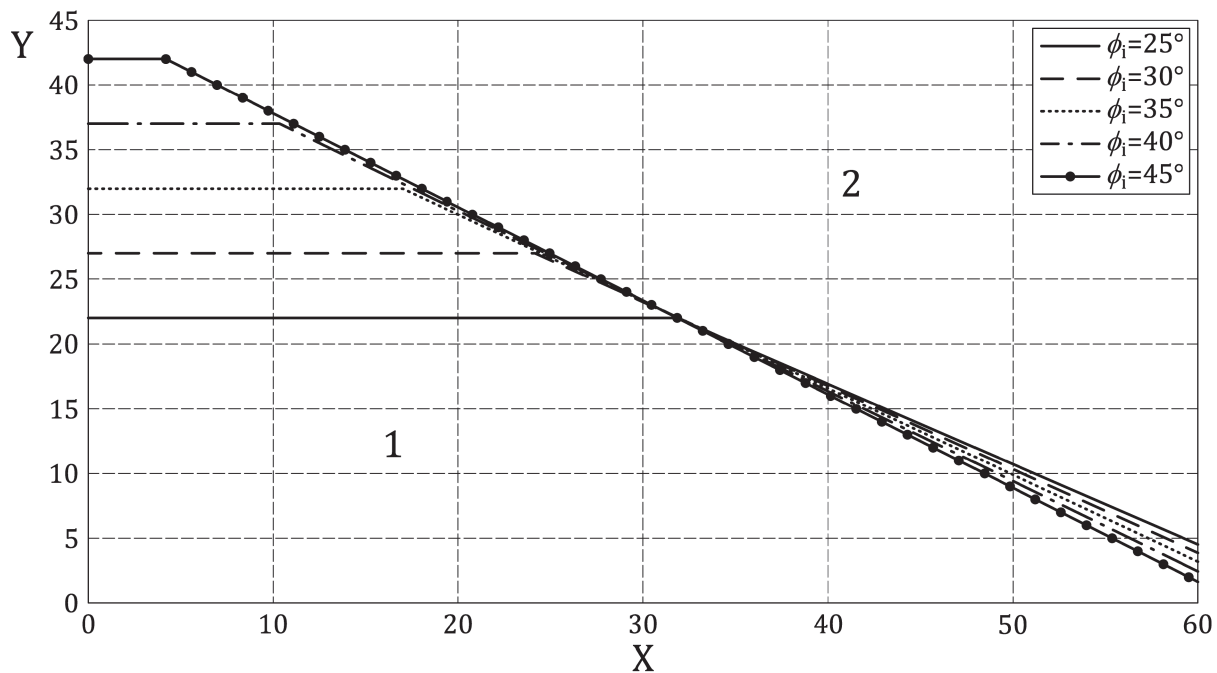
$$\phi_{wh,lim} = \phi_i - 3^\circ \quad (5.6)$$

Dabei ist

ϕ_i der untere charakteristische Wert des Winkels der inneren Reibung ϕ_i in Grad;

ϕ_{wh} der obere charakteristische Wert des Wandreibungswinkels im Trichter ϕ_{wh} in Grad.

(4) Schlotfluss darf in keilförmigen Trichtern nur als sichergestellt gelten, wenn der halbe Scheitelwinkel des Trichters größer als 65° ist.



Legende

X Neigungswinkel β_h der Trichterwände bezogen auf die Vertikale (in Grad)

Y Wandreibungswinkel ϕ_{wh} des Trichters (in Grad)

1 Massenfluss

2 Kernfluss (siehe Bild 5.1b und c)

ANMERKUNG In der der Grenze zum Massenfluss nächsten Zone ist das Fließprofil schwieriger vorherzusagen [siehe auch 1.2 (18)].

Bild 5.5— Abgrenzung von Massen- und Kernflussbedingungen bei keilförmigen Trichtern

5.3.3 Bewertung der Exzentrizitäten beim Befüllen und Entleeren

(1) Für die Exzentrizität e_o der Auslauföffnung sollte die Exzentrizität des Mittelpunkts der Auslauföffnung wie in Bild 5.6c gezeigt angesetzt werden.

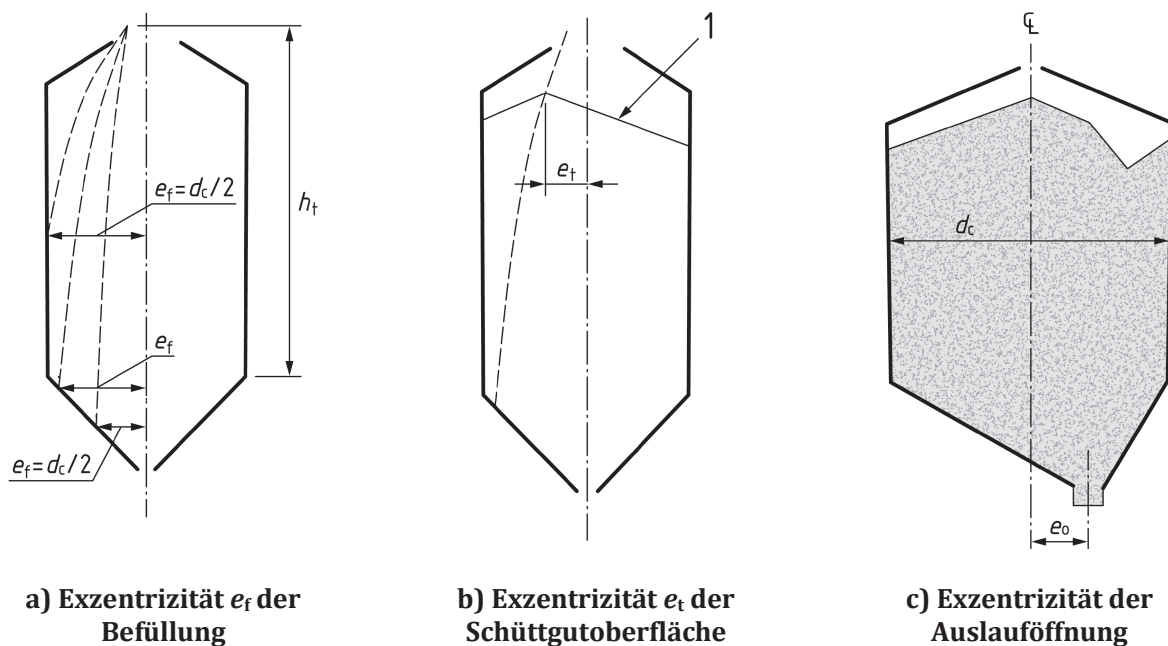
(2) Die Exzentrizität der Befüllung sollte wie unten definiert auf Grundlage der Flugbahn des einfallenden Schüttgutes wie in Bild 5.6a und Bild 5.6b bewertet werden.

(3) Wenn das Befüllen über eine vertikale Schurre erfolgt, sollte für die Exzentrizität e_f der Befüllung die Exzentrizität x_i der Schurre angesetzt werden.

(4) Für alle anderen Befüllungsanordnungen sollte die Flugbahn des in den Silo fallenden Schüttgutes wie folgt bestimmt werden: Der horizontale Abstand des Punkts, an dem der Schüttgutestrom die Schurre verlässt, von der Mittellinie des Silos sei x_i (Bild 5.7), die vertikale Position sei der Koordinatenursprung für die Berechnung der Schüttgutflugbahn und die horizontale und vertikale Geschwindigkeit des Schüttgutes am Ende der Schurre sei u_o bzw. v_o (Bild 5.7).

ANMERKUNG 1 In irgendeiner Höhe auf die Wand auftreffendes Schüttgut kann zu einer signifikanten Erhöhung der Asymmetrie der Wanddrücke durch Glätten oder Aufräuen sowie eine höhere Schüttgutwichte nahe der Wand an der betreffenden Stelle führen.

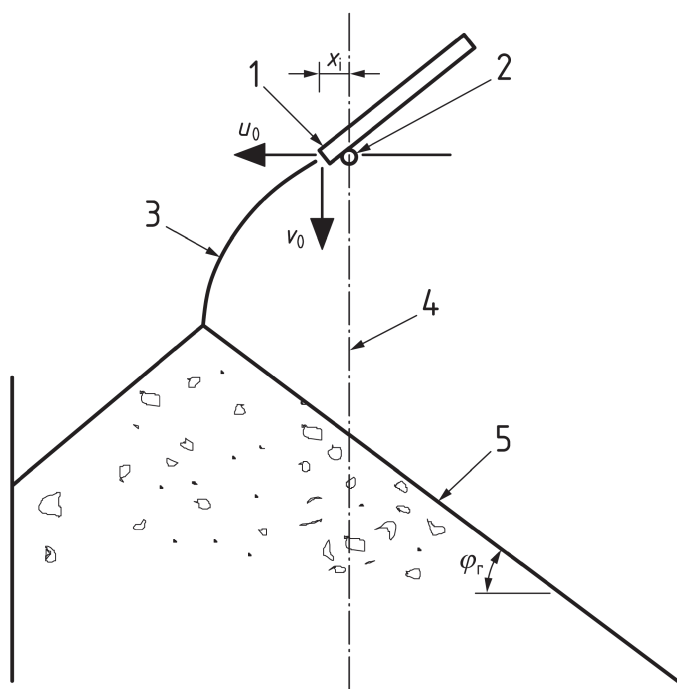
ANMERKUNG 2 Das Ausmaß der Exzentrizität der Befüllung wirkt sich signifikant auf die Lasten und damit auf die Sicherheit des Silos aus, und es ist wichtig, dass die beteiligten Parteien in einem frühen Stadium der Bemessung Informationen über die beabsichtigte Befüllungsflugbahn während des Betriebs austauschen.



Legende

- 1 Schüttgutoberfläche bei vollem Silo

Bild 5.6 — Exzentrizitäten beim Befüllen und Entleeren



Legende

- 1 Ende der Schurre
2 Koordinatenursprung
3 Schüttgutflugbahn
4 Mittellinie des Silos
5 Schüttgutkegel

Bild 5.7 — Bezeichnungen für die Bewertung der Exzentrizität der Befüllung

(5) Bei hoher horizontaler Geschwindigkeit und hohem Silo trifft der Schüttgutestrom die vertikale Wand, wenn

$$h_t > h_{t,\text{lim}} \quad (5.7)$$

Dabei ist

$$t_t = \frac{(d_c/2) - x_i}{u_0} \quad (5.8)$$

$$h_{t,\text{lim}} = v_0 t_t + g t_t^2 / 2 \quad (5.9)$$

und

g die Erdbeschleunigung und

h_t die Höhe des Schurrenendes über dem Trichterübergang ist (Bild 5.6a).

(6) Wenn Ungleichung (5.7) erfüllt ist, sollte die Exzentrizität der Befüllung angesetzt werden als

$$e_f = d_c/2 \quad (5.10)$$

und die Regeln von 8.3 im Hinblick auf Ersatzlasten für die Simulation signifikanter Symmetrieverluste sollten angewendet werden.

(7) Wenn Ungleichung (5.7) nicht erfüllt ist, darf die Exzentrizität der Befüllung angesetzt werden als

$$e_f = x_i + \frac{u_0 v_0}{g} \left[\left(1 - \frac{2gh_t}{v_0^2} \right)^{1/2} - 1 \right] \quad (5.11)$$

Dabei ist

x_i die Exzentrizität des Endes des Befüllrohrs;

u_0 die horizontale Geschwindigkeit am Ende des Befüllrohrs;

v_0 die vertikale Geschwindigkeit am Ende des Befüllrohrs;

(8) Die ermittelte Exzentrizität e_f der Befüllung sollte zusammen mit den Kriterien für exzentrisches Befüllen in Tabelle 5.2 angewendet werden.

(9) Wenn Tabelle 5.2 die Anwendung eines speziellen Silolastfalls für eine kleine oder große Exzentrizität der Befüllung nicht fordert, darf die Befüllung als konzentrisch betrachtet werden und die vereinfachten Regeln von Abschnitt 7 für das konzentrische Füllen dürfen angewendet werden.

(10) Wenn der Silo niedrig oder von mittlerer Schlankheit ist, sollte die ermittelte Exzentrizität e_f der Befüllung nach Tabelle 5.2 verwendet werden, um zu bestimmen, ob der spezielle Silolastfall der exzentrischen Befüllung erforderlich ist.

5.3.4 Silos für die Lagerung von staubförmigem Schüttgut

(1) Bei Silos mit pneumatisch beförderten staubförmigen Schüttgütern sollten die folgenden beiden Bemessungssituationen für den vollständig gefüllten Zustand betrachtet werden:

- das eingefüllte Schüttgut kann einen Schüttkegel ausbilden, wie dies bei den anderen Schüttgütern der Fall ist;
- die Schüttgutoberfläche kann horizontal sein (siehe Bild 5.3b, c und d), unabhängig vom Böschungswinkel und der Exzentrizität des Füllvorgangs.

(2) Wenn die Schüttgutoberfläche als horizontal angesehen wird, dürfen die Exzentrizitäten beim Befüllen e_f und e_t (Bild 5.6a und b) mit null angesetzt werden und der Füllstand sollte mit seinem größtmöglichen Wert angesetzt werden.

5.4 Grundlegende Silolastfälle (SFLC)

5.4.1 Übliche Versagensformen

(1) Im Allgemeinen sollten für die grundlegenden Lastfälle mindestens vier verschiedene Bedingungen betrachtet werden, die den vier üblichen Versagensformen im Hinblick auf vertikale Wände und Trichterwände entsprechen:

- Bersten oder Reißen durch übermäßige, senkrecht auf eine vertikale Silowand wirkende Drücke;
- Knicken oder Nachgeben durch übermäßige vertikale Druckspannungen in der Silowand;
- Reißen des Trichterkörpers durch übermäßige, vom gelagerten Schüttgut senkrecht auf die Trichterwand wirkende Drücke;
- Reißen der Trichteroberkante durch von der Gesamtmasse des gelagerten Schüttgutes ausgeübte übermäßige Lasten oder Reißen von horizontalen Trichternähten durch übermäßige, auf die Trichterwand wirkende Reibungskräfte.

ANMERKUNG 1 Diese Regeln gelten nur für Bedingungen, unter denen die Symmetrie sorgfältig durch die Füll- und Entleerungsanordnungen sichergestellt ist.

ANMERKUNG 2 Situationen, die zu systematisch unsymmetrischen Drücken führen, werden in 5.2.3 und 5.5 erläutert.

5.4.2 Exzentrizitätsgrenzen für grundlegende Silolastfälle

(1) Die Einschränkungen der Exzentrizität beim Füllen und Entleeren eines Silos, das nur grundlegenden Silolastfällen unterworfen wird, sind in Tabelle 5.1 angegeben und hängen von der relativen Schlankheit des Silos ab.

(2) Bei Silos in AAC2 und AAC3, die die in Tabelle 5.1 definierten Exzentrizitätsgrenzen nicht einhalten, sollten die in 5.5 definierten zusätzlichen Lastfälle berücksichtigt werden.

(3) Die Fülllasten werden nur von der in 5.3.3 definierten Exzentrizität e_f der Befüllung beeinflusst.

(4) Die Entleerungsexzentrizität e_e sollte der größere der Werte für die Füll- und Entleerungsexzentrizität sein:

$$e_e = \max(e_f, e_o) \quad (5.12)$$

Tabelle 5.1 — Exzentrizitätsgrenzen für grundlegende Silolastfälle

	Schlanke und sehr schlanke Silos	Silos mit mittlerer Schlankheit	Niedrige Silos
geringe Exzentrizität der Befüllung	$e_f < 0,30d_c$	$e_f < 0,20d_c$	$e_f < 0,20d_c$
geringe Exzentrizität der Entleerung	$e_e < 0,15d_c$	$e_e < 0,20d_c$	$e_e < 0,30d_c$

(5) Für die folgenden, von dieser Norm nicht behandelten Situationen (AAC4) sollten zusätzliche Informationen eingeholt werden:

- bestimmte Umweltbedingungen im Hinblick auf Feuchtigkeit sowie Luftporen- und Wandoberflächentemperatur können die Schüttgutkennwerte und den Wandreibungskoeffizienten beeinflussen,
- das Erreichen des Taupunkts an der Wand kann zum Anhaften von Schüttgut an der Wand und dadurch zu einem uneinheitlichen und exzentrischen Fließen beim Entleeren des Silos führen.

5.4.3 Unsicherheit und Veränderlichkeit von Schüttgutkennwerten

(1) Wenn Unsicherheiten im Hinblick auf die Schüttgutkennwerte bestehen, sollten eine geeignete Schüttgutprobe auf die Auswirkungen von Temperatur, Feuchtigkeit und zeitlicher Veränderlichkeit untersucht und die möglichen Veränderungen bei der Bemessung berücksichtigt werden.

ANMERKUNG Beispiele für Schüttgüter, die sich infolge von derartigen Parameteränderungen auf unerwartete Weise verhalten, sind Sojamehl, Tierfutterpellets, Kohle mit einem signifikanten Tongehalt und Zement.

(2) Die Veränderlichkeit eines Schüttgutes bedeutet, dass beim Umgang mit den in (1) aufgeführten Versagensformen unterschiedliche Extreme für die einzelnen Eigenschaften angesetzt werden sollten.

(3) Für Silos der AAC1 darf ein vereinfachter Umgang mit der Veränderlichkeit der Schüttgutkennwerte erfolgen, bei dem Mittelwerte aller Schüttgutkennwerte mit Ausnahme der Wichte angesetzt, jedoch ein größerer Lastmodifikationsfaktor (Gleichung 5.14) verwendet wird, um sicherzustellen, dass die Variabilität des Schüttgutes erfasst wird.

5.4.4 Arten von grundlegenden Silolastfällen

(1) Für jede vertikale Wand sollten zwei getrennte grundlegende Silolastfälle betrachtet werden:

- maximaler Druck senkrecht auf die vertikale Wand;
- maximale vertikale Wandreibungslast (flächenbezogene Scherkraft) auf die vertikale Silowand.

(2) Für jede Trichterwand sollten zwei getrennte grundlegende Silolastfälle betrachtet werden:

- maximaler Druck senkrecht auf die Trichterwand;
- Maximale Wandreibungslast auf die Trichterwand.

(3) Für die Bemessung eines waagerechten Silobodens sollte nur der folgende grundlegende Silolastfall betrachtet werden:

- maximaler vertikaler Druck auf den Boden.