

DIN EN 1991-4



ICS 91.010.30; 91.040.01

Ersatzvermerk
siehe unten

**Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke –
Teil 4: Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter;
Deutsche Fassung EN 1991-4:2006**

Eurocode 1: Actions on structures –
Part 4: Silos and tanks;
German version EN 1991-4:2006

Eurocode 1: Actions sur les structures –
Partie 4: Silos et réservoirs;
Version allemande EN 1991-4:2006

Ersatzvermerk

Ersatz für DIN EN 1991-4:2006-12;
mit DIN EN 1991-4/NA:2010-12 Ersatz für die 2010-04 zurückgezogene Norm DIN 1055-6:2005-03 und die
2010-04 zurückgezogene Norm DIN 1055-6 Berichtigung 1:2006-02

Gesamtumfang 122 Seiten

Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN



Nationales Vorwort

Diese Europäische Norm EN 1991-4:2006 ist in der Verantwortung von CEN/TC 250 „Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau“ (Sekretariat BSI, Vereinigtes Königreich) entstanden.

Die Arbeiten wurden auf nationaler Ebene vom NA 005-51-02 AA „Einwirkungen auf Bauten (Sp CEN/TC 250/SC 1)“ begleitet.

Die Norm EN 1991-4:2006 wurde am 2005-10-12 angenommen.

Die Norm ist Bestandteil einer Reihe von Einwirkungs- und Bemessungsnormen, deren Anwendung nur im Paket sinnvoll ist. Dieser Tatsache wird durch die Richtlinie der Kommission der Europäischen Gemeinschaft für die Anwendung der Eurocodes Rechnung getragen, indem dort Übergangsfristen für die verbindliche Umsetzung der Eurocodes in den Mitgliedstaaten vorgesehen sind. Die Übergangsfristen sind im Vorwort der EN angegeben.

Die Anwendung dieser Norm gilt in Deutschland in Verbindung mit dem Nationalen Anhang.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Texte dieses Dokuments Patentrechte berühren können. Das DIN [und/oder die DKE] sind nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Änderungen

Gegenüber DIN V ENV 1991-4:1996-12 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) der Vornormcharakter wurde aufgehoben;
- b) die Stellungnahmen der nationalen Normungsinstitute wurden eingearbeitet und der Text vollständig überarbeitet.

Gegenüber DIN EN 1991-4:2006-12, DIN 1055-6:2005-03 und DIN 1055-6 Berichtigung 1:2006-02 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) auf europäisches Bemessungskonzept umgestellt;
- b) Ersatzvermerke berichtigt;
- c) redaktionelle Änderungen vorgenommen.

Frühere Ausgaben

DIN 1055-6: 1964-11, 1987-05, 2005-03
DIN 1055-6 Berichtigung 1: 2006-02
DIN V ENV 1991-4: 1996-12
DIN EN 1991-4: 2006-12

Deutsche Fassung

**Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke —
Teil 4: Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter**

Eurocode 1: Actions on structures —
Part 4: Silos and tanks

Eurocode 1: Actions sur les structures —
Partie 4: Silos et réservoirs

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 12. Oktober 2005 angenommen.

Die CEN-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist. Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim Management-Zentrum oder bei jedem CEN-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CEN-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Management-Zentrum mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CEN-Mitglieder sind die nationalen Normungsinstitute von Belgien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, der Schweiz, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.



EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG
EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION
COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION

Management-Zentrum: rue de Stassart, 36 B- 1050 Brüssel

© 2006 CEN Alle Rechte der Verwertung, gleich in welcher Form und in welchem Verfahren, sind weltweit den nationalen Mitgliedern von CEN vorbehalten.

Ref. Nr. EN 1991-4:2006 D

Inhalt

	Seite
Vorwort	7
Hintergrund des Eurocode-Programms	7
Status und Gültigkeit der Eurocodes	8
Nationale Fassungen der Eurocodes	9
Verbindung zwischen den Eurocodes und den harmonisierten Technischen Spezifikationen für Bauprodukte (ENs und ETAs)	10
Zusätzliche Informationen insbesondere für EN 1991-4.....	10
Nationaler Anhang für EN 1991-4.....	10
1 Allgemeines	11
1.1 Anwendungsbereich	11
1.1.1 Anwendungsbereich von EN 1991 — Eurocode 1.....	11
1.1.2 Anwendungsbereich von EN 1991-4 — Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter.....	11
1.2 Normative Verweisungen	14
1.3 Annahmen	15
1.4 Unterscheidung zwischen Prinzipien und Anwendungsregeln	15
1.5 Definitionen	15
1.6 Formelzeichen	20
1.6.1 Große lateinische Buchstaben	20
1.6.2 Kleine lateinische Buchstaben	21
1.6.3 Große griechische Buchstaben	24
1.6.4 Kleine griechische Buchstaben	24
1.6.5 Indizes	25
2 Darstellung und Klassifikation der Einwirkungen	25
2.1 Darstellung von Einwirkungen in Silos	25
2.2 Darstellung der Einwirkung auf Flüssigkeitsbehälter	26
2.3 Einstufung der Einwirkung auf Silozellen	27
2.4 Einstufung der Einwirkungen auf Flüssigkeitsbehälter	27
2.5 Anforderungsklassen	27
3 Bemessungssituationen	28
3.1 Allgemeines	28
3.2 Bemessungssituationen für in Silos gelagerte Schüttgüter	29
3.3 Bemessungssituationen für unterschiedliche geometrische Ausbildungen der Silogeometrie	31
3.4 Bemessungssituationen für spezielle Konstruktionsformen von Silos	35
3.5 Bemessungssituationen für in Flüssigkeitsbehältern gelagerte Flüssigkeiten	36
3.6 Bemessungsprinzipien für Explosionen	36
4 Schüttgut	37
4.1 Allgemeines	37
4.2 Schüttgutkennwerte	38
4.2.1 Allgemeines	38
4.2.2 Ermittlung der Schüttgutkennwerte	39
4.2.3 Vereinfachte Vorgehensweise	40
4.3 Messung der Schüttgutkennwerte in Versuchen	41
4.3.1 Experimentelle Ermittlung (Messverfahren)	41
4.3.2 Schüttgutwichte γ	41
4.3.3 Wandreibungskoeffizient μ	41
4.3.4 Winkel der inneren Reibung ϕ_i	42
4.3.5 Horizontalverhältnis K	42
4.3.6 Kohäsion c	43

4.3.7	Schüttgutbeiwert für die Teilflächenlast C_{Op}	43
5	Lasten auf vertikale Silowände	43
5.1	Allgemeines	43
5.2	Schlanke Silos	44
5.2.1	Fülllasten auf vertikale Silowände	44
5.2.2	Entleerungslasten auf vertikale Wände	49
5.2.3	Gleichförmige Erhöhung der Lasten als Ersatz für die Teilflächenlasten der Lastfälle Füllen und Entleeren bei kreisförmigen Silos	54
5.2.4	Entleerungslasten für kreisförmige Silos mit großen Exzentrizitäten bei der Entleerung	55
5.3	Niedrige Silos und Silos mit mittlerer Schlankheit	59
5.3.1	Fülllasten auf die vertikalen Wände	59
5.3.2	Entleerungslasten auf die vertikalen Silowände	62
5.3.3	Große Exzentrizitäten beim Befüllen von kreisförmigen niedrigen Silos und kreisförmigen Silos mit mittlerer Schlankheit	64
5.3.4	Große Entleerungsexzentrizitäten in kreisförmigen niedrigen Silos und kreisförmigen Silos mit mittlerer Schlankheit	65
5.4	Stützwandsilos	66
5.4.1	Fülllasten auf vertikale Wände	66
5.4.2	Entleerungslasten auf vertikale Wände	67
5.5	Silos mit Gebläse	67
5.5.1	Allgemeines	67
5.5.2	Lasten in Silos zur Lagerung von fluidisiertem Schüttgut	67
5.6	Temperaturunterschiede zwischen Schüttgut und Silokonstruktion	68
5.6.1	Allgemeines	68
5.6.2	Lasten infolge einer Abnahme der atmosphärischen Umgebungstemperaturen	69
5.6.3	Lasten infolge heiß eingefüllter Schüttgüter	69
5.7	Lasten in rechteckigen Silos	70
5.7.1	Rechtecksilos	70
5.7.2	Silos mit inneren Zuggliedern	70
6	Lasten auf Silotrichter und Siloböden	70
6.1	Allgemeines	70
6.1.1	Physikalische Kennwerte	70
6.1.2	Allgemeine Regelungen	72
6.2	Waagerechte Siloböden	74
6.2.1	Vertikallasten auf waagerechte Siloböden in schlanken Silos	74
6.2.2	Vertikallasten auf ebene Siloböden in niedrigen Silos und Silos mit mittlerer Schlankheit	74
6.3	Steiler Trichter	75
6.3.1	Mobilisierte Reibung	75
6.3.2	Fülllasten	75
6.3.3	Entleerungslasten	76
6.4	Flacher Trichter	77
6.4.1	Mobilisierte Reibung	77
6.4.2	Fülllasten	77
6.4.3	Entleerungslasten	78
6.5	Trichter in Silos mit Gebläse	78
7	Lasten auf Flüssigkeitsbehälter	78
7.1	Allgemeines	78
7.2	Lasten infolge gelagerter Flüssigkeiten	78
7.3	Kennwerte der Flüssigkeiten	79
7.4	Soglasten infolge von unzureichender Belüftung	79
Anhang A (informativ) Grundlagen der Tragwerksplanung — Regeln in Ergänzung zu EN 1990 für Silos und Flüssigkeitsbehälter		80
A.1	Allgemeines	80
A.2	Grenzzustand der Tragfähigkeit	80
A.2.1	Teilsicherheitsbeiwerte γ	80

	Seite
A.2.2 Kombinationsbeiwerte ψ	80
A.3 Einwirkungskombinationen	81
A.4 Bemessungssituation und Einwirkungskombinationen für die Anforderungsklassen 2 und 3	81
A.5 Einwirkungskombinationen für die Anforderungsklasse 1	86
Anhang B (informativ) Einwirkungen, Teilsicherheitsfaktoren und Kombinationsbeiwerte der Einwirkungen auf Flüssigkeitsbehälter	87
B.1 Allgemeines	87
B.2 Einwirkungen	87
B.2.1 Lasten aus gelagerten Flüssigkeiten	87
B.2.2 Lasten aus Innendrücken	87
B.2.3 Lasten aus Temperatur(-änderung)	87
B.2.4 Eigengewichtslasten	87
B.2.5 Lasten aus Dämmung	88
B.2.6 Verteilte Nutzlasten	88
B.2.7 Konzentrierte Nutzlasten	88
B.2.8 Schnee	88
B.2.9 Wind	88
B.2.10 Unterdruck durch unzureichende Belüftung	89
B.2.11 Seismische Lasten	89
B.2.12 Lasten aus Verbindungsbauten	89
B.2.13 Lasten aus ungleichförmigen Setzungen	90
B.2.14 Katastrophenlasten	90
B.3 Teilsicherheitsbeiwerte der Einwirkungen	90
B.4 Kombinationen von Einwirkungen	90
Anhang C (normativ) Messung von Schüttgutkennwerten für die Ermittlung von Silolasten	91
C.1 Allgemeines	91
C.2 Anwendung	91
C.3 Symbole	91
C.4 Begriffe	92
C.5 Probenahme und Probenvorbereitung	92
C.6 Bestimmung der Schüttgutwichte γ	93
C.6.1 Kurzbeschreibung	93
C.6.2 Prüfgerät	93
C.6.3 Durchführung	94
C.7 Wandreibung	94
C.7.1 Allgemeines	94
C.7.2 Wandreibungskoeffizient μ_m zur Ermittlung der Lasten	95
C.7.3 Wandreibungswinkel ϕ_{wh} für Untersuchungen zum Fließverhalten	96
C.8 Horizontallastverhältnis K	97
C.8.1 Direkte Messung	97
C.8.2 Indirekte Messung	98
C.9 Festigkeitsparameter: Kohäsion c und Winkel der inneren Reibung ϕ_i	99
C.9.1 Direkte Messung	99
C.9.2 Indirekte Messung	101
C.10 Effektiver Elastizitätsmodul E_s	102
C.10.1 Direkte Messung	102
C.10.2 Indirekte Abschätzung	104
C.11 Bestimmung der oberen und unteren charakteristischen Werte von Schüttgutparametern und Ermittlung des Umrechnungsfaktors a	105
C.11.1 Kurzbeschreibung	105
C.11.2 Methoden zur Abschätzung	106
Anhang D (normativ) Abschätzung der Schüttgutkennwerte für die Ermittlung der Silolasten	108
D.1 Ziel	108
D.2 Abschätzung des Wandreibungskoeffizienten für eine gewellte Wand	108

D.3	Innere Reibung und Wandreibung eines grobkörnigen Schüttgutes ohne Feinanteile	109
Anhang E (normativ)	Angabe von Schüttgutkennwerten	110
E.1	Allgemeines	110
E.2	Angegebene Werte	110
Anhang F (informativ)	Bestimmung der Fließprofile	112
F.1	Massen- und Kernfluss	112
Anhang G (normativ)	Alternative Regeln zur Ermittlung von Trichterlasten	113
G.1	Allgemeines	113
G.2	Symbole	113
G.3	Begriffe	113
G.4	Bemessungssituation	113
G.5	Ermittlung des Bodenlastvergrößerungsfaktors C_b	114
G.6	Fülllasten auf waagerechte und nahezu waagerechte Böden	114
G.7	Fülllasten auf die Trichterwände	115
G.8	Entleerungslasten auf waagerechte und nahezu waagerechte Böden	116
G.9	Entleerungslasten auf die Trichterwände	116
G.10	Alternative Gleichungen für den Trichterlastbeiwert F_e für den Lastfall Entleeren	117
Anhang H (normativ)	Einwirkungen infolge von Staubexplosionen	118
H.1	Allgemeines	118
H.2	Anwendung	118
H.3	Symbole	118
H.4	Explosionsfähige Stäube und ihre Kennwerte	118
H.5	Zündquellen	119
H.6	Schutzmaßnahmen	119
H.7	Bemessung der Bauteile	120
H.8	Bemessung für Explosionsüberdruck	120
H.9	Bemessung für Unterdruck	120
H.10	Sicherung der Abschlusselemente der Entlastungsöffnungen	120
H.11	Rückstoßkräfte durch Druckentlastung	120
 Bilder		
Bild 1.1	— Darstellung von Silozellen mit Benennung der geometrischen Kenngrößen und Lasten	13
Bild 3.1	— Grundlegende Fließprofile	32
Bild 3.2	— Fließprofile mit Schlotfluss	33
Bild 3.3	— Fließprofile mit gemischtem Schüttgutfließen	33
Bild 3.4	— Auswirkung der Schlankheit (Verhältnis Höhe zu Durchmesser) auf das gemischte Schüttgutfließen und den Schlotfluss	34
Bild 3.5	— Spezielle Füll- und Entleerungsanordnungen	34
Bild 4.1	— Bedingungen, unter denen Drücke infolge Massenfluss auftreten	37
Bild 5.1	— Symmetrische Fülllasten im Bereich der vertikalen Silowände	45
Bild 5.2	— Längs- und Querschnitt mit Darstellung der Lastbilder der Teilflächenlasten	47
Bild 5.3	— Längs- und Querschnitt mit Darstellung der Lastbilder der Teilflächenlasten für nicht kreisförmige Silos	49
Bild 5.4	— Längs- und Querschnitt mit Darstellung der Lastbilder der Teilflächenlasten bei Entleerung	52
Bild 5.5	— Fließkanal und Druckverteilung bei der Entleerung mit großen Exzentrizitäten	57
Bild 5.6	— Lasten in einem niedrigen Silo oder Silo mit mittlerer Schlankheit nach dem Füllen (Fülllasten)	61

Bild 5.7 — Fülldrücke bei exzentrisch gefüllten niedrigen Silos oder Silos mit mittlerer Schlankheit ..	64
Bild 5.8 — Fülldrücke in einem Stützwandsilo	66
Bild 6.1 — Grenze zwischen steilem und flachem Trichter	71
Bild 6.2 — Verteilung der Fülldrücke in einem steilen und flachen Trichter	72
Bild 6.3 — Bodenlasten in niedrigen Silos und in Silos mit mittlerer Schlankheit.....	75
Bild 6.4 — Entleerungsdrücke in einem steilen und einem flach geneigten Trichter	77
Bild B.1 — Druckkoeffizienten für Windlasten auf einem kreisförmigen zylindrischen Flüssigkeitsbehälter	89
Bild C.1 — Vorrichtung zur Bestimmung von γ	94
Bild C.2 — Prüfverfahren zur Bestimmung des Wandreibungskoeffizienten	96
Bild C.3 — Prüfverfahren zur Bestimmung von K_0	98
Bild C.4 — Prüfverfahren zur Bestimmung der Winkel der inneren Reibung ϕ_i und ϕ_c und der Kohäsion c basierend auf der beim Vorverdichten aufgetragenen Spannung σ_r	100
Bild C.5 — Prüfverfahren zur Bestimmung der Elastizitätsmoduli bei Be- und Entlastung	103
Bild D.1 — Abmessungen der Profilierung der Wandoberfläche	109
Bild F.1 — Abgrenzung von Massen- und Kernflussbedingungen bei konischen und keilförmigen Trichtern	112
Bild G.1 — Alternative Anordnung für die Trichterlasten.....	116

Tabellen

Tabelle 2.1 — Klassifikation von Bemessungssituationen	28
Tabelle 3.1 — Maßgebliche Kennwerte für die unterschiedlichen Lastansätze.....	30
Tabelle 4.1 — Kategorien der Wandoberflächen	40
Tabelle A.1 — Zu betrachtende Bemessungssituationen und Kombinationen von Einwirkungen	82
Tabelle A.2 — „Allgemeiner“ Grenzzustand der Tragfähigkeit („Ordinary“ ULS) — Zu betrachtende Bemessungssituationen und Kombinationen von Einwirkungen.....	83
Tabelle A.3 — Grenzzustand der Tragfähigkeit für außergewöhnliche Lasten („Accidental“ ULS) — Zu betrachtende Bemessungssituationen und Kombinationen von Einwirkungen	83
Tabelle A.4 — Grenzzustand der Tragfähigkeit bei seismischer Beanspruchung („Seismic“ ULS) — Zu betrachtende Bemessungssituationen und Kombinationen von Einwirkungen	84
Tabelle A.5 — Grenzzustand der Gebrauchsfähigkeit (SLS) — Zu betrachtende Bemessungssituationen und Kombinationen von Einwirkungen.....	85
Tabelle C.1 — Versuchsparameter.....	100
Tabelle C.2 — Typische Werte der Variationskoeffizienten für die Schüttgutkennwerte	107
Tabelle E.1 — Schüttgutkennwerte.....	111

Vorwort

Dieses Dokument (EN 1991-4:2006) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 250 „Structural Eurocodes“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom BSI gehalten wird.

Diese Europäische Norm muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis November 2006, und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis März 2010 zurückgezogen werden.

Dieses Dokument ersetzt ENV 1991-4:1995.

Entsprechend der CEN/CENELEC-Geschäftsordnung sind die nationalen Normungsinstitute der folgenden Länder gehalten, diese Europäische Norm zu übernehmen: Belgien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Schweden, Schweiz, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechische Republik, Ungarn, Vereinigtes Königreich und Zypern.

Hintergrund des Eurocode-Programms

Im Jahre 1975 beschloss die Kommission der Europäischen Gemeinschaften, für das Bauwesen ein Programm auf der Grundlage des Artikels 95 der Römischen Verträge durchzuführen. Das Ziel des Programms war die Beseitigung technischer Handelshemmnisse und die Harmonisierung technischer Normen.

Im Rahmen dieses Programms leitete die Kommission die Bearbeitung von harmonisierten technischen Regelwerken für die Tragwerksplanung von Bauwerken ein, die im ersten Schritt als Alternative zu den in den Mitgliedsländern geltenden Regeln dienen und diese schließlich ersetzen sollten.

15 Jahre lang leitete die Kommission mit Hilfe eines Steuerungskomitees mit Repräsentanten der Mitgliedsländer die Entwicklung des Eurocode-Programms, das zu der ersten Eurocode-Generation in den 80er-Jahren führte.

Im Jahre 1989 entschieden sich die Kommission und die Mitgliedsländer der Europäischen Union und der EFTA, die Entwicklung und Veröffentlichung der Eurocodes über eine Reihe von Mandaten an CEN zu übertragen, damit diese den Status von Europäischen Normen (EN) erhielten. Grundlage war eine Vereinbarung¹⁾ zwischen der Kommission und CEN. Dieser Schritt verknüpft die Eurocodes de facto mit den Regelungen der Ratsrichtlinien und Kommissionsentscheidungen, die die Europäischen Normen behandeln (z. B. die Ratsrichtlinie 89/106/EEC zu Bauprodukten, die Bauproduktenrichtlinie (CPD), die Ratsrichtlinien 93/37/EEC, 92/50/EEC und 89/440/EEC zur Vergabe öffentlicher Aufträge und Dienstleistungen und die entsprechenden EFTA-Richtlinien, die zur Einrichtung des Binnenmarktes eingeleitet wurden).

1) Vereinbarung zwischen der Kommission der Europäischen Gemeinschaften und dem Europäischen Komitee für Normung (CEN) zur Bearbeitung der Eurocodes für die Tragwerksplanung von Hochbauten und Ingenieurbauwerken (BC/CEN/03/89).

Das Eurocode-Programm umfasst die folgenden Normen, die in der Regel aus mehreren Teilen bestehen:

EN 1990	Eurocode:	Grundlagen der Tragwerksplanung
EN 1991	Eurocode 1:	Einwirkung auf Tragwerke
EN 1992	Eurocode 2:	Entwurf, Berechnung und Bemessung von Stahlbetonbauten
EN 1993	Eurocode 3:	Entwurf, Berechnung und Bemessung von Stahlbauten
EN 1994	Eurocode 4:	Entwurf, Berechnung und Bemessung von Stahl-Beton-Verbundbauten
EN 1995	Eurocode 5:	Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauten
EN 1996	Eurocode 6:	Entwurf, Berechnung und Bemessung 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:	Entwurf, Berechnung und Bemessung von Aluminiumkonstruktionen

Die Europäischen Normen berücksichtigen die Verantwortlichkeit der Bauaufsichtsorgane in den Mitgliedsländern und hat deren Recht zur Festlegung sicherheitsbezogener Werte auf nationaler Ebene sichergestellt, so dass diese Werte von Land zu Land unterschiedlich bleiben können.

Status und Gültigkeit der Eurocodes

Die Mitgliedsländer der EU und von EFTA betrachten die Eurocodes als Bezugsdokumente für folgende Zwecke:

- als Mittel zum Nachweis der Übereinstimmung der Hoch- und Ingenieurbauten mit den wesentlichen Anforderungen der Richtlinie 89/106/EEC, besonders mit der wesentlichen Anforderung Nr. 1: Mechanischer Widerstand und Stabilität und der wesentlichen Anforderung Nr. 2: Brandschutz;
- als Grundlage für die Spezifizierung von Verträgen für die Ausführung von Bauwerken und dazu erforderlichen Ingenieurleistungen;
- als Rahmenbedingung für die Herstellung harmonisierter Technischer Spezifikationen für Bauprodukte (ENs und ETAs).

Die Eurocodes haben, soweit sie sich auf Bauwerke beziehen, eine direkte Beziehung zu den Grundlagendokumenten²⁾, auf die in Artikel 12 der Bauproduktenrichtlinie hingewiesen wird, wenn sie auch anderer Art sind als die harmonisierten Produktnormen³⁾. Daher sind die technischen Gesichtspunkte, die sich aus den Eurocodes ergeben, von den Technischen Komitees von CEN und den Arbeitsgruppen von EOTA, die an Produktnormen arbeiten, zu beachten, damit diese Produktnormen mit den Eurocodes vollständig kompatibel sind.

Die Eurocodes liefern Regelungen für den Entwurf, die Berechnung und Bemessung sowohl von vollständigen Tragwerken als auch von Tragwerksteilen, die sich für die alltägliche Anwendung eignen. Sie gehen auf traditionelle Bauweisen und Aspekte innovativer Anwendungen ein, liefern aber keine vollständigen Regelungen für ungewöhnliche Baulösungen und Entwurfsbedingungen, wofür weitere Überlegungen durch Fachleute erforderlich sind.

Nationale Fassungen der Eurocodes

Die nationale Fassung eines Eurocodes enthält den vollständigen Text des Eurocodes (einschließlich aller Anhänge), wie er von CEN veröffentlicht wird, der durch eine nationale Titelseite und ein nationales Vorwort sowie einen nationalen Anhang ergänzt werden darf.

Der nationale Anhang darf nur Hinweise zu denjenigen Parametern geben, die im Eurocode für nationale Entscheidungen offen gelassen wurden. Diese national festlegbaren Parameter (NDP) gelten für die Tragwerksplanung von Hochbauten und Ingenieurbauten in dem Land, in dem diese errichtet werden. Sie umfassen:

- Zahlenwerte und/oder Klassen in Fällen, in denen die Eurocodes Alternativen eröffnen;
- Zahlenwerte in Fällen, in denen die Eurocodes nur Symbole angeben;
- Landesspezifische, geographische und klimatische Daten, die nur für ein Mitgliedsland gelten, z. B. Schneekarten;
- Vorgehensweise, wenn die Eurocodes hierfür mehrere zur Wahl anbieten.

Des Weiteren dürfen enthalten sein:

- Entscheidungen über die Anwendung von informativen Anhängen;
- Verweise zu ergänzenden nicht sich widersprechenden Informationen, die dem Anwender bei der Benutzung des Eurocodes helfen.

2) Entsprechend Artikel 3.3 der Bauproduktenrichtlinie sind die wesentlichen Angaben in Grundlagendokumenten zu konkretisieren, um damit die notwendigen Verbindungen zwischen den wesentlichen Anforderungen und den Mandaten für die Erstellung harmonisierter Europäischer Normen und Richtlinien für die europäischen Zulassungen selbst zu schaffen.

3) Nach Artikel 12 der Bauproduktenrichtlinie hat das Grundlagendokument

- a) die wesentliche Anforderung zu konkretisieren, in dem die Begriffe und, soweit erforderlich, die technischen Grundlagen für Klassen und Anforderungshöhen vereinheitlicht werden,
- b) die Methode zur Verbindung dieser Klassen oder Anforderungshöhen mit Technischen Spezifikationen anzugeben, z. B. rechnerische oder Testverfahren, Entwurfsregeln,
- c) als Bezugsdokument für die Erstellung harmonisierter Normen oder Richtlinien für europäische technische Zulassungen zu dienen.

Die Eurocodes spielen de facto eine ähnliche Rolle für die wesentliche Anforderung Nr. 1 und einen Teil der wesentlichen Anforderung Nr. 2.

Verbindung zwischen den Eurocodes und den harmonisierten Technischen Spezifikationen für Bauprodukte (ENs und ETAs)

Es besteht die Notwendigkeit, dass die harmonisierten Technischen Spezifikationen für Bauprodukte und die technischen Regelungen für die Tragwerksplanung⁴⁾ konsistent sind. Insbesondere sollten Hinweise, die mit den CE-Zeichen an den Bauprodukten verbunden sind und die die Eurocodes in Bezug nehmen, klar erkennen lassen, welche national festgelegten Parameter (NDP) zugrunde liegen.

Zusätzliche Informationen insbesondere für EN 1991-4

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

EN 1991-4 ist bestimmt für Bauherrn, Tragwerksplaner, Bauausführende und einschlägige Behörden.

EN 1991-4 ist im Zusammenhang mit EN 1990, mit den weiteren Teilen der Reihe EN 1991, mit EN 1992 und EN 1993 sowie mit den anderen für die Bemessung von Silos und Flüssigkeitsbehältern maßgebenden Teilen der Norm EN 1994 bis EN 1999 anwendbar.

Nationaler Anhang für EN 1991-4

Diese Norm enthält alternative Methoden und Werte sowie Empfehlungen für Klassen mit Hinweisen, an welchen Stellen nationale Festlegungen getroffen werden. Dazu sollte die jeweilige nationale Ausgabe von EN 1991-4 einen nationalen Anhang mit den national festzulegenden Parametern erhalten, mit dem die Tragwerksplanung von Hochbauten und Ingenieurbauwerken, die in dem Ausgabeland gebaut werden sollen, möglich ist.

Für EN 1991-4 bestehen nationale Wahlmöglichkeiten in:

- 2.5 (5)
- 3.6 (2)
- 5.2.4.3.1 (3)
- 5.4.1 (3)
- 5.4.1 (4)
- A.4 (3)
- B.2.14 (1)

4) Siehe Artikel 3.3 und Art. 12 der Bauproduktenrichtlinie, ebenso wie die Abschnitte 4.2, 4.3.1, 4.3.2 und 5.2 des Grundlegendokumentes Nr. 1.

1 Allgemeines

1.1 Anwendungsbereich

1.1.1 Anwendungsbereich von EN 1991 — Eurocode 1

(1)P Die Reihe EN 1991 macht Angaben zu allgemeinen Prinzipien und zu Einwirkungen für die Bemessung von Bauten und Ingenieurbauwerken, einschließlich einer Reihe von geotechnischen Fragen. Die Norm ist in Verbindung mit EN 1990 sowie den Normen der Reihen EN 1992 bis EN 1999 anzuwenden.

(2) Die Reihe EN 1991 deckt darüber hinaus Einwirkungen während der Bauausführung und Einwirkungen auf Bauwerke mit begrenzter Standzeit ab. Die Reihe bezieht sich auf alle Umstände unter denen das Tragwerk ein angemessenes Verhalten erfordert.

(3) Die Reihe EN 1991 ist nicht unmittelbar für die Anwendung auf bereits ausgeführte Konstruktion bzw. die Bemessung bei Instandsetzung und Tragwerksänderung und die Beurteilung bei Nutzungsänderung vorgesehen.

(4) Die Reihe EN 1991 deckt nicht vollständig besondere Bemessungssituationen ab, die außergewöhnliche Zuverlässigkeitsbetrachtungen erfordern, wie z. B. für Tragwerke aus dem Kerntechnikbereich, bei denen besondere Überlegungen bei der Bemessung angestellt werden müssen.

1.1.2 Anwendungsbereich von EN 1991-4 — Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter

(1)P Diese Norm enthält allgemeine Prinzipien und Angaben zu den Einwirkungen für den Entwurf und die Bemessung von Silos für die Lagerung von Schüttgütern und von Flüssigkeitsbehältern. Sie ist in Verbindung mit EN 1990, mit den anderen Teilen der Reihe EN 1991 sowie mit den Normen der Reihen EN 1992 bis EN 1999 anzuwenden.

(2) Diese Norm enthält auch einige Bestimmungen für Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter, die über die unmittelbaren Einwirkungen infolge von den gelagerten Schüttgütern oder Flüssigkeiten hinausgehen (z. B. Auswirkungen von Temperaturunterschieden).

(3) Für die Anwendung der Bemessungsregeln für Silozellen und Silobauwerke gelten folgende geometrische Einschränkungen:

— Die Querschnittsformen von Silozellen sind auf die in Bild 1.1d) dargestellte Fälle begrenzt. Kleinere Abweichungen sind unter der Voraussetzung erlaubt, dass die möglichen Auswirkungen auf das Silotragwerk infolge sich durch diese Abweichungen ergebenden Druckänderungen beachtet werden.

— Für die geometrischen Abmessungen gelten folgende Einschränkungen:

$$\begin{aligned}h_b/d_c &< 10 \\h_b &< 100 \text{ m} \\d_c &< 60 \text{ m}\end{aligned}$$

— Der Übergang vom vertikalen Siloschaft in den Trichter erfolgt in einer einzigen horizontalen Ebene (siehe Bild 1.1a)).

— Einflüsse auf die Silodrücke infolge von Einbauten oder spezielle Querschnittseinengungen bzw. Einbauten, wie Entlastungskegel, Entlastungsbalken usw. werden nicht erfasst. Ein rechteckiger Silo kann jedoch innere Zugbänder beinhalten.

(4) Für die Anwendung der 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 frei fließend oder es kann sichergestellt werden, dass es sich im speziellen Fall wie ein frei fließendes Schüttgut verhält (siehe 1.5.12 und Anhang C).
- Die maximale Korngröße des Schüttgutes ist nicht größer als $0,03d_c$ (siehe Bild 1.1d)).

ANMERKUNG Wenn die Schüttgutpartikel im Vergleich zur Dicke der Silowand groß sind, sind die Auswirkungen des Kontaktes einzelner großer Schüttgutpartikel mit der Wand in Form eines Ansatzes von Einzellasten zu berücksichtigen.

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

- Beim Befüllen entstehen nur geringfügige, vernachlässigbare Einwirkungen infolge von Trägheits- und Stoßkräften.
- Bei Anwendung von Austrags- bzw. Entleerungshilfen (z. B. Förderanlagen (feeders) oder Zentralrohre mit Schlucköffnungen) ist der Schüttgutfluss gleichmäßig ungestört und zentral.

(6) Die angegebenen Lastansätze auf Silotrichter gelten nur für konische (i. Allg. axialsymmetrisch geformte, oder pyramidenförmig mit quadratischen bzw. rechteckigen Querschnitten ausgebildete) und keilförmig (i. Allg. mit vertikalen Wänden an der Stirn- und Rückseite) ausgebildete Trichter. Davon abweichende Trichterformen oder Trichter mit Einbauten erfordern spezielle, weitergehende Überlegungen.

(7) Silos, mit entlang der vertikalen Achse sich ändernden Symmetrieachsen der geometrischen Grundrissform sind nicht Gegenstand dieser Norm. Darunter fallen z. B. Silos mit einem von einer Zylinderform in eine Keilform übergehenden Trichter unterhalb eines zylindrischen Silos und **diamond-back** Trichter.

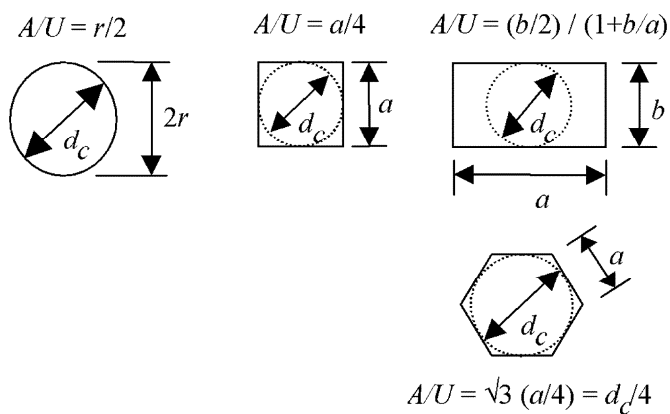
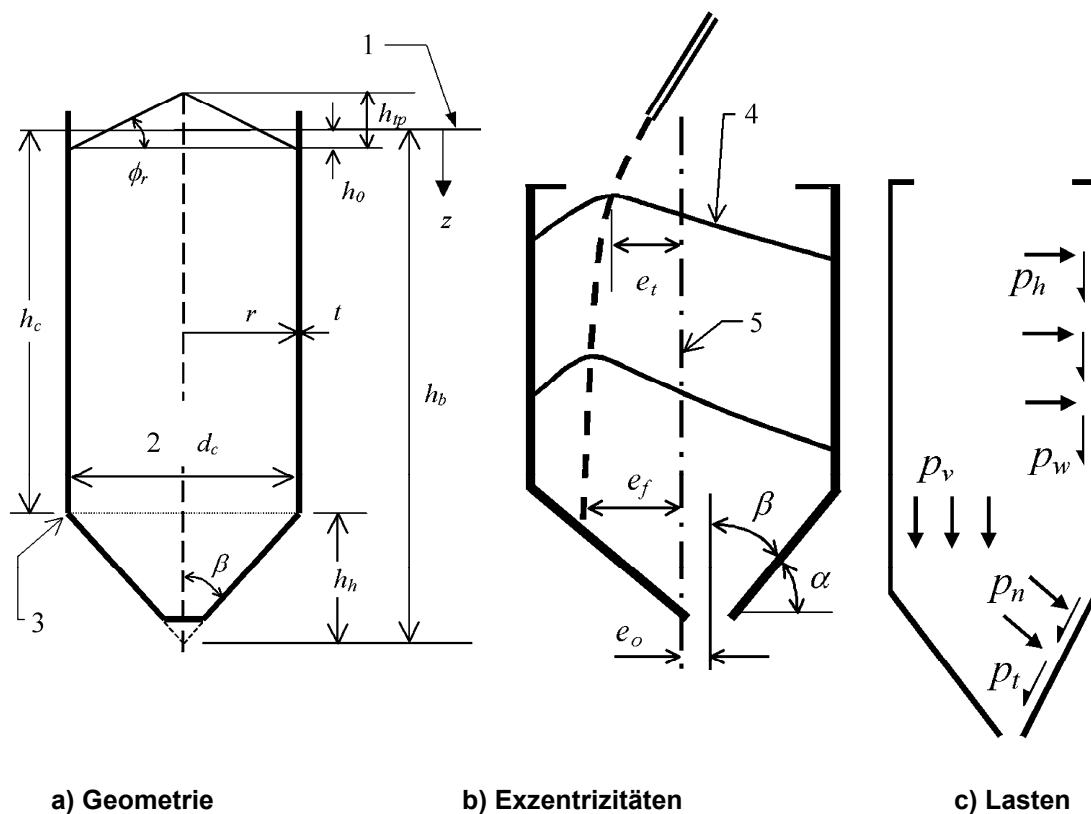
(8) Die Bemessungsregeln für Flüssigkeitsbehälter gelten nur für Flüssigkeiten unter üblichem atmosphärischem Druck.

(9) Lasten auf die Dächer von Silos und Flüssigkeitsbehältern sind in geeigneter Weise den entsprechenden Normen EN 1991-1-1, EN 1991-1-3 bis EN 1991-1-7 und EN 1991-3 zu entnehmen.

(10) Die Bemessung von Silos mit Umlaufbetrieb ist außerhalb des Anwendungsbereiches dieser Norm.

(11) Die Bemessung von Silos gegen dynamische Beanspruchungen, die beim Entleeren auftreten können, wie z. B. Silobeben, Stöße, Hupen oder Siloschlagen ist außerhalb des Anwendungsbereichs dieser Norm.

ANMERKUNG Diese Phänomene sind bis heute noch nicht ganz geklärt, so dass bei Anwendung dieser Norm weder sichergestellt werden kann, dass diese nicht auftreten werden, noch dass die Silostruktur für die daraus resultierende Beanspruchung ausreichend dimensioniert ist.



d) Querschnittsformen

Legende

- 1 äquivalente Schüttgutoberfläche
- 2 Innenmaß
- 3 Übergang
- 4 Oberflächenprofil bei vollem Silo
- 5 Silomittelachse

Bild 1.1 — Darstellung von Silozellen mit Benennung der geometrischen Kenngrößen und Lasten

1.2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. 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).

ISO 3898:1997, *Basis for design of structures — Notations — General symbols*

ANMERKUNG Folgende veröffentlichte oder in Vorbereitung befindliche Europäische Normen werden an jeweiligen Stellen im Text zitiert:

EN 1990, *Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung*

EN 1991-1-1, *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke — Teil 1.1: Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau*

EN 1991-1-2, *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke — Teil 1.2: Allgemeine Einwirkungen — Brandeinwirkungen auf Tragwerke*

EN 1991-1-3, *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke — Teil 1.3: Allgemeine Einwirkungen — Schneelasten*

EN 1991-1-4, *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke — Teil 1.4: Allgemeine Einwirkungen — Windlasten*

EN 1991-1-5, *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke — Teil 1.5: Allgemeine Einwirkungen — Temperatureinwirkungen*

EN 1991-1-6, *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke — Teil 1.6: Allgemeine Einwirkungen — Einwirkungen während der Bauausführung*

EN 1991-1-7, *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke — Teil 1.7: Allgemeine Einwirkungen — Außergewöhnliche Einwirkungen*

EN 1991-2, *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke — Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken*

EN 1991-3, *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke — Teil 3: Einwirkungen infolge von Kranen und Maschinen*

EN 1992, *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken*

EN 1992-4, *Eurocode 2: Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken — Teil 4: Stütz- und Behälterbauwerke aus Beton*

EN 1993, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten*

EN 1993-1-6, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten: Allgemeine Bemessungsregeln — Teil 1.6: Ergänzende Regeln für Schalenkonstruktionen*

EN 1993-4-1, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 4.1: Silos, Tankbauwerke und Rohrleitungen — Silos*

EN 1993-4-2, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 4.2: Silos, Tankbauwerke und Rohrleitungen — Tankbauwerke*

EN 1994, *Eurocode 4: Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton*

EN 1995, *Eurocode 5: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken*

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*

1.3 Annahmen

(1)P Die Annahmen, die in EN 1990, 1.3 aufgezählt werden, können in dieser Norm angewandt werden.

1.4 Unterscheidung zwischen Prinzipien und Anwendungsregeln

(1) Je nach Art der einzelnen Absätze, wird in diesem Teil der Lastnorm zwischen Prinzipien und Anwendungsregeln unterschieden.

(2) Die Prinzipien bestehen aus:

- allgemeine Festlegungen und Definitionen für die es keine Alternative gibt, sowie
- Anforderungen und Rechenmodelle, für die keine Alternativen erlaubt werden, außer wenn dies ausdrücklich erwähnt wird.

(3) Die Prinzipien sind durch einen zusätzlichen Buchstaben P gekennzeichnet, der der Nummer des Absatzes folgt.

(4) Die Anwendungsregeln stellen allgemein anerkannte Regeln der Technik dar, die den Prinzipien folgen und deren Anforderungen erfüllen.

(5) Es ist zulässig, alternative Regeln in Abweichung zu den Anwendungsregeln dieses Eurocodes zu verwenden, vorausgesetzt es wird nachgewiesen, dass die alternativen Regeln sich in Übereinstimmung mit den einschlägigen Prinzipien befinden und mindestens das gleiche Sicherheitsniveau aufweisen.

(6) In diesem Teil werden die Anwendungsregeln von einer in Klammern geschriebenen Zahl, z. B. wie in diesem Absatz, kenntlich gemacht.

1.5 Definitionen

Für die Anwendung dieser Norm gelten die Definitionen von EN 1990, 1.5. Die folgenden zusätzlichen Definitionen sind speziell auf diesen Teil der Lastnorm bezogen.

1.5.1

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 (siehe Bild 3.5b))

1.5.2

charakteristische Abmessung des inneren Querschnittes

die charakteristische Abmessung d_c ist der Durchmesser des größten eingeschriebenen Kreises des inneren Querschnittes einer Silozelle (siehe Bild 1.1d))

1.5.3

kreisförmiger Silo

Silo, dessen Grundriss bzw. Schaftquerschnitt eine Kreisform aufweist (siehe Bild 1.1d))

1.5.4

Kohäsion

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

1.5.5

konischer Trichter

Trichter, bei dem die geneigten Seitenflächen in einem Punkt zusammenlaufen, womit in der Regel ein axialsymmetrisches Schüttgutfließen sichergestellt werden kann

1.5.6

exzentrisches Entleeren

Fließprofil im Schüttgut mit einer in Bezug auf die vertikale Mittelachse unsymmetrischen Verteilung des sich bewegenden Schüttgutes. Dies ist üblicherweise die Folge einer exzentrisch angeordneten Auslauföffnung (siehe Bilder 3.2c) und 3.2d), 3.3b) und 3.3c)). Es kann aber auch durch andere zur Unsymmetrie führenden Phänomene hervorgerufen sein (siehe Bild 3.4d)).

1.5.7

exzentrisches Füllen

Zustand während bzw. nach dem Befüllen des Silos, bei dem die Spitze der angeschütteten Schüttgutoberfläche (Spitze des Anschüttkegels) nicht mehr in der vertikalen Mittelachse des Silos zentriert ist (siehe Bild 1.1b))

1.5.8

äquivalente Schüttgutoberfläche

Höhe der gedachten eingeebneten (horizontalen) Schüttgutoberfläche, die sich aus der Volumenbilanz zwischen diesem gedachten und dem tatsächlichen Verlauf der Oberflächenform ergibt (siehe Bild 1.1a))

1.5.9

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, wodurch dort Kernfluss zu erwarten ist (siehe Bild 3.5d)). Diese Anordnung reduziert die Trichterhöhe bei gleichzeitiger Sicherstellung einer zuverlässigen Entleerung.

1.5.10

waagerechter Siloboden

innere Grundfläche eines Silos mit einer Neigung von weniger als 5 %

1.5.11

Fließprofil

geometrische Form des ausfließenden Schüttgutes, wenn sich diese bereits voll ausgebildet hat (siehe Bilder 3.1 bis 3.4). Der Silo ist dabei nahe dem gefüllten Zustand (maximaler Füllzustand)

1.5.12

fluidisiertes Schüttgut

Zustand eines gespeicherten staubförmigen Schüttgutes, in dem dieses einen großen Anteil von Luftporen enthält, mit einem Druckgradienten, der dem Gewicht der Partikel entgegenwirkt und dieses kompensiert. Die Luft kann entweder durch eine spezielle Belüftung oder durch den Füllprozess eingetragen sein. Ein Schüttgut wird als teilweise fluidisiert bezeichnet, wenn nur ein Teil des Gewichtes der Schüttgutpartikel durch den Porendruckgradienten kompensiert wird.

1.5.13

frei fließendes granulares Material

granulares Schüttgut, dessen Fließverhalten nicht merklich von Kohäsion beeinflusst ist

1.5.14

vollständig gefüllter Zustand

ein Silo ist im vollständig gefüllten Zustand, wenn sich die Oberfläche des Schüttgutes an ihrer höchstmöglichen Position befindet, die sie innerhalb der Nutzungsdauer der Konstruktion während des Silobetriebs einnehmen kann. Dieser Zustand wird für den Silo als die maßgebliche Bemessungsbedingung angenommen.

1.5.15

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 (siehe Bild 3.1). Der Fließkanal kann hierbei in Kontakt mit der vertikalen Silowand kommen — man spricht dann von „gemischtem Fließen“ — oder er kann sich ohne jegliche Kontaktbereiche mit der Wand bis zur Oberfläche hin erstrecken. Dieser Fall wird mit „Schlotfluss“ oder „Schachtfliessen“ bezeichnet.

1.5.16

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 Lasten die zwischen den Einzelkörnern befindliche Luft nur eine geringe Rolle spielt und auf das Schüttgutfließen nur geringen Einfluss hat

1.5.17

hohe Füllgeschwindigkeiten

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

1.5.18

Homogenisierungssilo

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

1.5.19

Trichter

Siloboden mit geneigten Wänden

1.5.20

Trichterlastverhältniswert 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 zueinander stehen

1.5.21

Silo mit mittlerer Schlankheit

Silo, dessen Verhältnis von Höhe zum Durchmesser zwischen $1,0 < h_c/d_c < 2,0$ liegt (Ausnahmen sind in 3.3 definiert)

1.5.22

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 (siehe Bilder 3.1 und 3.2)

1.5.23

Horizontallastverhältnis K

Wert, der angibt, in welchem Verhältnis die auf die vertikale Silowand wirkende mittlere Horizontallast p_h und die mittlere Vertikallast p_v an dieser Stelle im Schüttgut zueinander stehen

1.5.24

geringe Kohäsion

eine Schüttgutprobe weist eine geringe Kohäsion auf, wenn die Kohäsion c kleiner als 4 % der Vorkonsolidierungsspannung σ_r ist (ein Verfahren zur Bestimmung der Kohäsion ist in C.9 gegeben)

1.5.25

Massenfluss

Fließprofil, bei dem alle sich im Silo befindlichen Schüttgutpartikel beim Entleeren gleichzeitig in Bewegung sind (siehe Bild 3.1a))

1.5.26

gemischtes Fließen

Kernflussprofil, bei dem der Fließkanal noch unterhalb der Schüttgutoberfläche mit der vertikalen Silowand in Berührung kommt (siehe Bilder 3.1c) und 3.3)

1.5.27

nicht kreisförmiger Silo

Silo mit einem nicht kreisförmigen Querschnitt (siehe Bild 1.1d))

1.5.28

Schüttgut

Bezeichnung für einen Festkörper, der aus einer Vielzahl voneinander unabhängiger Einzelpartikel besteht

1.5.29

Teilflächenlast

lokale Last, die in beliebiger Höhenlage auf eine bestimmte Teilfläche senkrecht auf die vertikale Silowand wirkend angesetzt wird

1.5.30

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 (siehe Bilder 3.1b) und 3.2). Wenn die Auslauföffnung exzentrisch angeordnet ist (siehe Bilder 3.2c) und d)), oder wenn spezielle Faktoren dazu führen, dass der Fließkanal aus der vertikalen Achse über dem Auslauf abweicht (siehe Bild 3.4d)), kann sich ein Schüttgutfließen gegen die Silowand einstellen.

1.5.31

ebenes Fließen

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

1.5.32

staubförmiges Schüttgut

ein Material, dessen mittlere Partikelgröße kleiner als 0,05 mm ist

1.5.33

Schüttgutdruck, -spannung

Kraft durch Flächeneinheit im Schüttgut

1.5.34

Stützwandsilo

Silo mit einem waagrechten Boden und einem Verhältnis von Höhe zu Durchmesser von $h_c/d_c \leq 0,4$

1.5.35

flacher Trichter

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

1.5.36

Silo

Behälterkonstruktion zur Speicherung von Schüttgütern (d. h. Bunker, Lagerbehälter oder Silo)

1.5.37

schlanker Silo

Silo mit einem Verhältnis von Höhe zu Durchmesser von $h_c/d_c \geq 2,0$ oder bei dem die zusätzlichen Bedingungen nach 3.3 erfüllt sind

1.5.38

Schlankheit

Verhältnis von Höhe zu Durchmesser h_c/d_c des vertikalen Teils eines Silos

1.5.39

niedriger Silo

Silo mit einem Verhältnis von Höhe zu Durchmesser von $0,4 < h_c/d_c \leq 1,0$ oder bei dem die zusätzlichen Bedingungen nach 3.3 erfüllt sind. Bei einem Verhältnis von Höhe zu Durchmesser von $h_c/d_c \leq 0,4$ und wenn der Silo einen Trichter besitzt, fällt der Silo auch unter die Kategorie eines niedrigen Silos. Ansonsten — bei einem ebenen Siloboden — fällt er unter die Kategorie Stützwandsilo

1.5.40

steiler Trichter

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

1.5.41

Spannung im Schüttgut

Kraft je Flächeneinheit innerhalb des gespeicherten Schüttgutes

1.5.42

Flüssigkeitsbehälter

Behälterkonstruktion zur Lagerung von Flüssigkeiten

1.5.43

dickwandiger Silo

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

1.5.44

dünnwandiger kreisförmiger Silo

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

1.5.45

Wandreibungslast

Kraft je Flächeneinheit entlang der Silowand (vertikal oder geneigt) aufgrund der Reibung zwischen Schüttgut und Silowand

1.5.46

Trichterübergang

Schnittfläche zwischen Trichter und vertikalem Siloschaft, d. h. Übergang vom vertikalen Teil des Silos in den Trichter

1.5.47

vertikaler Siloschaft

der Teil eines Silos mit vertikalen Wänden

1.5.48

keilförmiger Trichter

Trichter, bei dem die geneigten Flächen zu einem Schlitz mit dem Ziel eines ebenen Schüttgutflusses konvergieren. Die jeweils anderen beiden Trichterwände verlaufen in der Regel vertikal.

1.6 Formelzeichen

Eine Liste von grundlegenden Symbolen (Kurzzeichen) ist in EN 1990 enthalten. Im Folgenden werden zusätzliche Kurzzeichen (Symbole) für diesen Teil der Norm angegeben. Die verwendeten Kurzzeichen basieren auf den Konventionen von ISO 3898:1997.

1.6.1 Große lateinische Buchstaben

A	Querschnittsfläche des vertikalen Schaftes
A_c	Querschnittsfläche des Fließkanals beim exzentrischen Entleeren (große Exzentrizitäten)
B	Tiefenparameter bei exzentrisch befüllten niedrigen Silos
C	Lastvergrößerungsfaktor
C_o	Entleerungsfaktor (Lastvergrößerungsfaktor beim Entleeren) für das Schüttgut
C_{op}	Schüttgutkennwert der Teilflächenlast (Lastvergrößerungsfaktor)
C_b	Lastvergrößerungsfaktor für die Bodenlasten
C_h	Lastvergrößerungsfaktor der horizontalen Entleerungslasten
C_{pe}	Lastvergrößerungsfaktor der Teilflächenlast beim Entleeren
C_{pf}	Lastvergrößerungsfaktor der Teilflächenlast beim Lastfall Füllen
C_s	Schlankheitsbeiwert bei einem Silo mit mittlerer Schlankheit
C_T	Lastvergrößerungsfaktor bei der Berücksichtigung von Temperaturunterschieden bzw. -änderungen
C_w	Lastvergrößerungsfaktor für die Wandreibungslasten
E	Verhältnis von Exzentrizität des Fließkanals zum Siloradius
E_s	effektiver Elastizitätsmodul des gespeicherten Schüttgutes bei relevantem Spannungsniveau
E_w	Elastizitätsmodul der Silowand
F	Verhältnis zwischen den Lasten senkrecht auf die Trichterwand und mittlerer Vertikallast im Schüttgut an dieser Stelle
F_e	Lastverhältnis im Trichter während der Entleerung (Verhältnis zwischen Lasten senkrecht auf die Trichterwand und mittleren Vertikallasten im Schüttgut)
F_f	Lastverhältnis im Trichter nach dem Füllen (Verhältnis zwischen Lasten senkrecht auf die Trichterwand und mittleren Vertikallasten im Schüttgut)
F_{pe}	Integral der horizontalen Teilflächenlast bei dünnwandigen kreisförmigen Silos des Lastfalls der Entleerung
F_{pf}	Integral der horizontalen Teilflächenlast bei dünnwandigen kreisförmigen Silos des Lastfalls Füllen
G	Verhältnis zwischen dem Radius des Fließkanals und dem Radius des inneren Querschnittes eines kreisförmigen Silos
K	charakteristischer Wert des Horizontallastverhältnisses
K_m	Mittelwert des Horizontallastverhältnisses
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)

T	Temperatur
U	innerer Umfang des Querschnittes des vertikalen Siloschaftes
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
Y	Tiefenvariationsfunktion: Funktion zur Beschreibung der Lastzunahme mit zunehmender Tiefe im Silo
Y_J	Tiefenvariationsfunktion der Janssen-Theorie
Y_R	Tiefenvariationsfunktion bei niedrigen Silos

1.6.2 Kleine lateinische Buchstaben

a	Seitenlänge eines Silos mit rechteckiger oder hexagonaler Querschnittsfläche (siehe Bild 1.1d)
a_x	Streukoeffizient (-faktor) bzw. Umrechnungsfaktor zur Berechnung der oberen und unteren charakteristischen Schüttgutkennwerte aus den Mittelwerten
a_K	Streukoeffizient bzw. Umrechnungsfaktor für das Horizontallastverhältnis
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	Breite eines rechteckigen Silo (siehe Bild 1.1d))
b	empirischer Koeffizient für die Trichterlasten
c	Kohäsion des Schüttgutes
d_c	charakteristische Abmessung für den inneren Siloquerschnitt (siehe Bild 1.1d))
e	der größere Wert der Exzentrizitäten e_f und e_o
e_c	Exzentrizität der Mittelachse des Fließkanals beim Entleeren mit großen Exzentrizitäten (siehe Bild 5.5)
e_f	größte Exzentrizität des Schüttkegels an der Schüttgutoberfläche beim Füllen (siehe Bild 1.1b))
$e_{f,cr}$	größte Füllexzentrizität, für die die vereinfachten Regeln zur Berücksichtigung geringer Exzentrizitäten verwendet werden können ($e_{f,cr} = 0,25d_c$)
e_o	Exzentrizität des Mittelpunktes der Auslauföffnung (siehe Bild 1.1b))
$e_{o,cr}$	größte Exzentrizität der Auslauföffnung, für die die vereinfachten Regeln zur Berücksichtigung der Exzentrizitäten verwendet werden können ($e_{o,cr} = 0,25d_c$)
e_t	Exzentrizität der Spitze des Aufschüttkegels an der Schüttgutoberfläche beim gefüllten Silo (siehe Bild 1.1b))
$e_{t,cr}$	größte Exzentrizität des Aufschüttkegels, für die die vereinfachten Regeln zur Berücksichtigung von Exzentrizitäten verwendet werden können ($e_{t,cr} = 0,25d_c$)
h_b	Gesamthöhe eines Silos mit Trichter, gemessen von der gedachten Trichterspitze bis zur äquivalenten Schüttgutoberfläche (siehe Bild 1.1a))
h_c	Höhe der vertikalen Siloschaftes, gemessen vom Trichterübergang bis zur äquivalenten Schüttgutoberfläche (siehe Bild 1.1a))
h_h	Trichterhöhe, gemessen von der gedachten Trichterspitze bis zum Trichterübergang (siehe Bild 1.1a))

- h_o Abstand zwischen äquivalenter Schüttgutoberfläche und dem tiefsten Fußpunkt des Schüttkegels (am tiefsten gelegener Punkt der Silowand, der bei einem bestimmten Füllzustand nicht in Kontakt mit dem gespeicherten Schüttgut ist (siehe Bilder 1.1a), 5.6 und 6.3))
- 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 (siehe Bilder 1.1a) und 6.3))
- n Parameter in den Bestimmungsgleichungen der Trichterlasten
- n_{zSk} charakteristischer Wert der Resultierenden der Kräfte in der Silowand je laufendem Meter in Umfangsrichtung der Wand
- p Last in der Einheit Kraft durch Fläche
- p_h Horizontallast aus dem gespeicherten Schüttgut (siehe Bild 1.1c))
- p_{hae} Horizontallast im sich in Ruhe befindlichen Bereich des Schüttgutes neben dem Fließkanal bei einer Entleerung mit großen Exzentrizitäten
- p_{hce} Horizontallast im Fließkanal bei einer Entleerung mit großen Exzentrizitäten
- p_{hco} asymptotische Horizontallast in großer Tiefe im Fließkanal bei einer Entleerung mit großen Exzentrizitäten
- p_{he} Horizontallasten beim Entleeren
- $p_{he,u}$ Horizontallasten beim Entleeren und Verwendung der vereinfachten Rechenverfahren
- p_{hf} Horizontallasten nach dem Füllen
- p_{hfb} Horizontallasten nach dem Füllen am unteren Ende des vertikalen Siloschaftes
- $p_{hf,u}$ Horizontallasten nach dem Füllen bei Anwendung der vereinfachten Rechenverfahren
- p_{ho} asymptotische Horizontallasten in großer Tiefe aus gespeichertem Schüttgut
- p_{hse} Horizontallasten im sich in Ruhe befindlichen Schüttgut in größerem Abstand zum Fließkanal während einer Entleerung mit großen Exzentrizitäten
- p_{hT} Zunahme der Horizontallasten infolge Temperaturunterschiede bzw. -änderungen
- p_n Lasten senkrecht auf die Trichterwände aus dem gelagerten Schüttgut (siehe Bild 1.1c))
- p_{ne} Lasten senkrecht auf die Trichterwände während der Entleerung
- p_{nf} Lasten senkrecht auf die Trichterwände nach dem Füllen
- p_p Teilflächenlast
- p_{pe} Grundwert der Teilflächenlast während des Entleerens
- p_{pei} komplementäre Teilflächenlast beim Entleeren
- $p_{pe,nc}$ streifenförmige Teilflächenlast bei Silos mit nicht kreisförmigen Querschnitten beim Entleeren
- p_{pf} Grundwert der Teilflächenlast nach dem Füllen
- p_{pfi} komplementäre Teilflächenlast nach dem Füllen
- $p_{pf,nc}$ streifenförmige Teilflächenlast bei Silos mit nicht kreisförmigen Querschnitten nach dem Füllen
- $p_{p,sq}$ Teilflächenlast in flachen Silos
- p_{pes} Teilflächenlast an der Zylinderkoordinate θ bei dünnwandigen kreisförmigen Silos während der Entleerung

p_{pfs}	Teilflächenlast an der Zylinderkoordinate θ bei dünnwandigen kreisförmigen Silos nach dem Füllen
p_t	Reibungslasten im Trichter (siehe Bild 1.1c))
p_{te}	Reibungslasten im Trichter beim Entleeren
p_{tf}	Reibungslasten im Trichter nach dem Füllen
p_v	Vertikallasten im Schüttgut (siehe Bild 1.1c))
p_{vb}	Vertikallasten am Boden niedriger Silos unter Verwendung von Gleichung (6.2)
p_{vf}	Vertikallasten im Schüttgut nach dem Füllen
p_{vft}	Vertikallasten nach dem Füllen am Trichterübergang (Fußpunkt des vertikalen Siloschaftes)
p_{vho}	am Fußpunkt des Anschüttkegels an der Schüttgutoberfläche nach Gleichung (5.78) und mit der Schüttguttiefe $z = h_o$ berechnete Vertikallast
p_{vsq}	Vertikallasten auf dem waagrechten Boden eines niedrigen Silos oder Silos mittlerer Schlankheit
p_{vtp}	geostatische Vertikallast am Fußpunkt des Anschüttkegels an der Schüttgutoberfläche
p_w	Wandreibungslasten entlang der vertikalen Wand (Scherkraft infolge Reibung je Flächeneinheit) (siehe Bild 1.1c))
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
$p_{we,u}$	Wandreibungslasten während der Entleerung unter Verwendung des vereinfachten Berechnungsverfahrens
p_{wf}	Wandreibungslasten nach dem Füllen
$p_{wf,u}$	Wandreibungslasten nach dem Füllen unter Verwendung des vereinfachten Berechnungsverfahrens
p_{wse}	Wandreibungslasten im sich in Ruhe befindlichen Schüttgut in größerem Abstand zum Fließkanal während der Entleerung mit großen Exzentrizitäten
r	äquivalenter Siloradius ($r = 0,5d_c$)
r_c	Radius des exzentrischen Fließkanals bei der Entleerung mit großen Exzentrizitäten
s	Abmessung der mit der Teilflächenlast belasteten Fläche ($s = \pi d_c / 16 \cong 0,2d_c$)
t	Dicke der Silowand
x	vertikale Koordinate im Trichter mit dem Ursprung in der Trichterspitze (siehe Bild 6.2)
z	Tiefe unterhalb der äquivalenten Schüttgutoberfläche im gefüllten Zustand (siehe Bild 1.1a))
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_p	Tiefe des Mittelpunktes der Teilflächenlast unterhalb der äquivalenten Schüttgutoberfläche in einem dünnwandigen Silo
z_s	Tiefe unterhalb der höchstliegenden Kontaktstelle zwischen Schüttgut und Silowand (siehe Bilder 5.7 und 5.8)
z_v	Maß für die Tiefe beim Ansatz der Vertikallasten in niedrigen Silos

1.6.3 Große griechische Buchstaben

- Δ Horizontalverschiebung des oberen Teils einer Scherzelle
- Δ Operator für inkrementelle Größen (siehe folgende Kurzzeichen)
- Δp_{sq} Vertikallastanteil infolge nicht ebener Schüttgutoberfläche bei nicht schlanken Silos
- ΔT Temperaturunterschied zwischen gespeichertem Schüttgut und der Silowand
- Δv bei Materialuntersuchungen gemessene inkrementelle Vertikalverschiebung
- $\Delta \sigma$ bei Materialuntersuchungen inkrementelle auf eine Probe aufgebraachte Spannung

1.6.4 Kleine griechische Buchstaben

- α mittlerer Neigungswinkel der Trichterwände bezogen auf die Horizontale (siehe Bild 1.1b))
- α_w thermischer Ausdehnungskoeffizient der Silowand
- β Neigungswinkel der Trichterwand bezogen auf die Vertikale (siehe Bilder 1.1a) und 1.1b)) bzw. der steilste Winkel der Trichterwände bei einem quadratischen oder rechteckigen Trichter
- γ charakteristischer Wert der Wichte der gespeicherten Flüssigkeit oder des gespeicherten Schüttgutes
- γ_1 Schüttgutwichte des Schüttgutes im fluidisierten Zustand
- δ Standardabweichung eines Kennwertes
- θ Zylinderkoordinate: Winkel in Umfangsrichtung
- θ_c Umfangswinkel des Fließkanals beim Entleeren mit großen Exzentrizitäten (siehe Bild 5.5) bezogen auf die Mittelachse des Siloschaftes
- ψ Wandkontaktwinkel des exzentrischen Fließkanals bezogen auf die Mittelachse des Fließkanals
- μ charakteristischer Wert des Wandreibungswinkels an der vertikalen Silowand
- 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 Poissons-Zahl des Schüttgutes
- ϕ_c charakteristischer Wert des Winkels der inneren Reibung eines vorverdichteten Schüttgutes bei Entlastung (siehe C.9)
- ϕ_i charakteristischer Wert des Winkels der inneren Reibung eines Schüttgutes bei Erstbelastung (siehe C.9)
- ϕ_{im} Mittelwert des Winkels der inneren Reibung (siehe C.9)
- ϕ_r Böschungswinkel eines Schüttgutes (konischer Schütthaufen) (siehe Bild 1.1a))
- ϕ_w Wandreibungswinkel ($\arctan \mu$) zwischen Schüttgut und Trichterwand
- ϕ_{wh} Wandreibungswinkel im Trichter ($\arctan \mu_h$) zwischen Schüttgut und Trichterwand
- σ_r Bezugs- bzw. Referenzspannung für die Versuche zur Bestimmung der Schüttgutkennwerte

1.6.5 Indizes

d	Bemessungswert (mit Teilsicherheitsbeiwert versehen)
e	Entleerung von Schüttgütern (Entleerungszustand)
f	Füllzustand, Schüttgut während der Lagerung
h	Trichter
h	horizontal
K	Horizontallastverhältnis
m	Mittelwert
n	senkrecht auf die Wand
nc	nicht kreisförmiger Silo
p	Teilflächenlast
t	für tangential entlang der Wand
u	gleichmäßig
v	für vertikal
w	für Wandreibung
γ	Schüttgutwichte
ϕ	Winkel der inneren Reibung
μ	Wandreibungskoeffizient

2 Darstellung und Klassifikation der Einwirkungen

2.1 Darstellung von Einwirkungen in Silos

(1)P Die Einwirkungen in Silos sind unter Berücksichtigung der Silostruktur, der Eigenschaften der gespeicherten Schüttgüter und der sich beim Entleeren der Silos einstellenden Fließprofile zu ermitteln.

(2)P Unsicherheiten bezüglich der sich einstellenden Fließprofile, des Einflusses der Füll- und Entleerungsexzentrizitäten auf die Füll- und Entleerungsvorgänge, des Einflusses der Siloform auf die Art des Fließprofiles und bezüglich der zeitabhängigen Füll- und Entleerungsdrücke sind zu berücksichtigen.

ANMERKUNG Die Größenordnung und die Verteilung der Bemessungslasten hängen von der Silostruktur, von den Materialkennwerten der gelagerten Schüttgüter und von den Fließprofilen ab, die sich beim Entleeren ausbilden. Die inhärenten Unterschiede in den Eigenschaften der unterschiedlich gelagerten Schüttgüter und die Vereinfachungen in den Lastmodellen führen zu Abweichungen zwischen den tatsächlich auftretenden Silolasten und den Lastannahmen (Bemessungslasten) nach den Abschnitten 5 und 6. So ändert sich mit der Zeit auch zum Beispiel die Verteilung der Entleerungsdrücke entlang der Silowand. Eine genaue Vorhersage des vorherrschenden mittleren Drucks, seiner Streuung und seiner zeitlichen Veränderlichkeit ist mit den heutigen Erkenntnissen nicht möglich.

(3)P Lasten auf die vertikalen Wände von Silos im Füllzustand und während des Entleerens mit geringen Füll- und Entleerungsexzentrizitäten sind durch einen symmetrischen Lastanteil und eine unsymmetrische Teilflächenlast anzusetzen. Bei größeren Exzentrizitäten sind die Lasten durch unsymmetrische Druckverteilungskurven zu beschreiben.

(4) 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 Da bisher keine aussagekräftigen Daten vorliegen, basieren die angegebenen charakteristischen Werte der Einwirkungen auf Silos nicht auf statistischen Berechnungen. Sie basieren wesentlich auf Erfahrungswerten durch die Anwendung bisher gültiger Normen. Die Definition von oben korrespondiert somit mit der Definition nach EN 1990.

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

(6) Die symmetrischen Lasten auf Silowände sollten durch horizontale Lastanteile p_h auf die inneren Oberflächen der senkrechten Silowand, durch senkrecht auf geneigte Wände wirkende Lasten p_n , durch in tangentialer Richtung der Wand wirkende Reibungslasten p_w und p_t , und durch vertikale Lastanteile im gelagerten Schüttgut p_v angesetzt werden (siehe Bild 1c)).

(7) Die unsymmetrischen Lasten auf die vertikalen Silowände bei geringen Füll- und Entleerungsexzentrizitäten sollten durch den Ansatz einer Teilflächenlast berücksichtigt werden. Diese Teilflächenlasten bestehen aus lokal wirkenden Horizontaldrücken p_h auf die innere Oberfläche der Silowand.

(8) Die unsymmetrischen Lasten auf die vertikalen Silowände bei großen Füll- und Entleerungsexzentrizitäten sollten zusätzlich durch eine unsymmetrische Verteilung der Horizontaldrücke p_h und Reibungslasten p_w erfasst werden.

(9) Zur Erfassung unplanmäßiger nicht berücksichtigter Lasteinflüsse sollten Lastvergrößerungsfaktoren C verwendet werden.

(10) Die Lastvergrößerungsfaktoren C sollten bei Silozellen der Anforderungsklassen 2 und 3 (siehe 2.5) ausschließlich dafür verwendet werden, nicht berücksichtigte zusätzliche Lasteinflüsse zu erfassen, die durch den Schüttgutfluss beim Entleeren des Silos auftreten.

(11) Die Lastvergrößerungsfaktoren C bei Silozellen der Anforderungsklasse 1 sollten verwendet werden, um sowohl zusätzliche Lasteinflüsse beim Entleeren infolge der Schüttgutbewegungen als auch Einflüsse durch die Streuung der Schüttgutparameter zu erfassen.

ANMERKUNG Die Lastvergrößerungsfaktoren C haben die Aufgabe, die Unsicherheiten bezüglich der sich einstellenden Fließprofile, die Einflüsse von Exzentrizitäten beim Füllen und Entleeren, den Einfluss der Siloform auf die Art des Fließprofils und Näherungseinflusses infolge der Nichtberücksichtigung vorhandener zeitabhängiger Füll- und Entleerungsdrücke abzudecken. Für Silos der Anforderungsklasse 1 (siehe 2.5), berücksichtigt der Lastvergrößerungsfaktor auch die inhärente Streuung der Materialeigenschaften der Schüttgüter. Für Silos der Anforderungsklassen 2 und 3 wird die Streuung der die Lasten beeinflussenden Materialkennwerte der Schüttgüter nicht durch einen Lastvergrößerungsfaktor C , sondern durch den Ansatz von entsprechenden charakteristischen Bemessungswerten der Schüttgutparameter γ , μ , K und ϕ berücksichtigt.

(12) Für Silos der Anforderungsklasse 1 sollten die unsymmetrischen Lasten durch eine Erhöhung der symmetrischen Lasten durch Verwendung eines Vergrößerungsfaktors für die Entleerungslasten C berücksichtigt werden.

(13) Für Silos der Anforderungsklasse 2 dürfen die unsymmetrischen Teilflächenlasten alternativ durch eine ersatzweise Vergrößerung der symmetrischen Lasten berücksichtigt werden, deren Betrag auf die Auswirkung der Teilflächenlast abgestimmt ist.

2.2 Darstellung der Einwirkung auf Flüssigkeitsbehälter

(1)P Lasten auf Flüssigkeitsbehälter infolge ihrer Füllung sind durch hydrostatische Lastansätze zu berücksichtigen.

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

ANMERKUNG Die charakteristischen Werte basieren nicht auf einer formalen statistischen Berechnung. Sie basieren dagegen auf historisch gewachsenen Erfahrungen bei der Anwendung bisher gültiger Normen. Die oben angegebene Definition richtet sich nach EN 1990.

2.3 Einstufung der Einwirkung auf Silozellen

- (1)P Lasten infolge von in Silozellen gelagerten Schüttgütern sind als veränderliche Einwirkungen nach EN 1990 einzustufen.
- (2)P Symmetrische Lasten auf Silos sind als veränderliche ortsfeste Einwirkungen nach EN 1990 einzustufen.
- (3)P Teilflächenlasten zur Berücksichtigung der Füll- und Entleerungsprozesse in Silozellen sind als veränderliche freie Einwirkungen nach EN 1990 einzustufen.
- (4)P Außermittige Lasten zur Berücksichtigung exzentrischer Füll- und Entleerungsprozesse in Silozellen sind als veränderliche ortsfeste Einwirkungen einzustufen.
- (5)P Lasten aus Luft- bzw. Gasdrücken in Verbindung mit pneumatischen Förderungsanlagen sind als veränderliche ortsfeste Einwirkungen anzusehen.
- (6)P Lasten infolge von Staubexplosionen sind als außergewöhnliche Einwirkungen einzustufen.

2.4 Einstufung der Einwirkungen auf Flüssigkeitsbehälter

- (1)P Lasten auf Flüssigkeitsbehälter sind als veränderliche ortsfeste Einwirkungen nach EN 1990 einzustufen.

2.5 Anforderungsklassen

- (1) In Abhängigkeit von der Zuverlässigkeit der strukturellen Ausbildung und der Empfindlichkeit hinsichtlich unterschiedlicher Versagensformen sollten bei der Ermittlung der Einwirkungen auf Silostrukturen verschiedene Stufen der Genauigkeit verwendet werden.
- (2) Die Siloeinwirkungen sollte nach den Vorgaben für eine der folgenden drei, in dieser Norm verwendeten Anforderungsklassen ermittelt werden (siehe Tabelle 1), welche zu Lastansätzen mit grundsätzlich gleichem Sicherheitsniveau führt. Sie berücksichtigen den notwendigen Aufwand und die erforderlichen Verfahren, die zur Reduzierung des Risikos für die unterschiedlichen Strukturen erforderlich sind (siehe EN 1990, 2.2 (3) und (4)). Es wird zwischen folgenden Anforderungsklassen unterschieden:
- Anforderungsklasse 1 (AAC 1)
 - Anforderungsklasse 2 (AAC 2)
 - Anforderungsklasse 3 (AAC 3)
- (3) Es kann für ein Silo immer eine höhere Anforderungsklasse als nach 2.5 (2) gefordert ausgewählt werden. Für jeden Teil der in dieser Lastnorm beschriebenen Vorgehensweise (Lastansätze) kann, wenn dies zweckdienlich ist, eine höhere Anforderungsklasse zugrunde gelegt werden.
- (4) Für Silos der Anforderungsklasse 1 können die für die Klasse konzipierten vereinfachten Verfahren dieser Norm angewendet werden.
- (5) Wo mehrere Silozellen gebäudetechnisch miteinander verbunden sind, sollte für jede einzelne Zelle die geeignete Anforderungsklasse bestimmt werden, nicht für die gesamte Silobatterie.

ANMERKUNG 1 Die nationalen Anhänge können die Grenzen zwischen den Anwendungsklassen festlegen. Tabelle 2.1 gibt hierzu empfohlene Werte an.

Tabelle 2.1 — Klassifikation von Bemessungssituationen

Anforderungsklasse	Beschreibung
Anforderungsklasse 3	Silos mit einem Fassungsvermögen von mehr als 10 000 Tonnen Silos mit einem Fassungsvermögen von mehr als 1 000 Tonnen, bei denen eine der folgenden Bemessungssituation vorliegt: a) exzentrische Entleerung mit $e_0/d_c > 0,25$ (siehe Bild 1.1b)) b) niedrige Silos mit einer exzentrischen Befüllung von mehr als $e_0/d_c > 0,25$
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 von weniger als 100 Tonnen

ANMERKUNG 2 Die in Tabelle 2.1 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 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 Klasseneinteilungen der EN 1992 und EN 1993 berücksichtigt.

ANMERKUNG 3 Die Einteilung in eine Anforderungsklasse sollte getrennt für jedes Projekt erfolgen.

3 Bemessungssituationen

3.1 Allgemeines

(1)P Die Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter sind für jede relevante Bemessungssituation in Übereinstimmung mit den allgemeinen Festlegungen von EN 1990 zu bestimmen.

ANMERKUNG Dies bedeutet nicht, dass die Abschnitte und Werte für den allgemeinen Hochbau und Brückenbauwerke in EN 1990, A.1 und A.2 auf Silos und Flüssigkeitsbehälter anzuwenden sind.

(2)P Es sind die maßgebenden Bemessungssituationen zu betrachten und die kritischen Lastfälle zu ermitteln. Bei Silos müssen die maßgeblichen Bemessungssituationen auf die Fließcharakteristik der gespeicherten Schüttgüter entsprechend Anhang C basieren.

(3)P Für jeden kritischen Lastfall sind die Bemessungswerte der Auswirkungen aus der Kombination der Einwirkungen zu bestimmen.

(4)P Die Kombinationsregeln hängen vom jeweiligen Nachweis ab und sind nach EN 1990 zu wählen.

ANMERKUNG Maßgebende Kombinationsregeln sind in Anhang A angegeben.

(5) Einwirkungen, die von angrenzenden Gebäudestrukturen übertragen werden, sollten berücksichtigt werden.

(6) Einwirkungen aus Förder- und Einfüllanlagen sollten berücksichtigt werden. Besondere Aufmerksamkeit ist bei nicht fest installierten Förderanlagen geboten. Sie können über das eingelagerte Schüttgut Lasten auf die Silostruktur übertragen.

(7) Je nach Situation sollten die folgenden außergewöhnlichen Einwirkungen und Situationen berücksichtigt werden:

- Einwirkungen infolge von Explosionen;
- Einwirkungen infolge von Fahrzeuganprall;
- Einwirkungen infolge von Erdbeben;
- Einwirkungen infolge von Brandbelastungen.

3.2 Bemessungssituationen für in Silos gelagerte Schüttgüter

(1)P Lasten auf Silos infolge der gelagerten Schüttgüter sind zu berücksichtigen, wenn sich der Silo im vollständig befüllten Zustand befindet.

(2)P Die Lastansätze für das Befüllen und Entleeren sind sowohl für die Tragsicherheitsnachweise als auch die Gebrauchstauglichkeitsnachweise zu verwenden.

(3) Die Bemessung für das Befüllen und Entleeren von Schüttgütern sollte sich nach den Hauptlastfällen richten, die zu unterschiedlichen Grenzzuständen für das Bauwerk führen können:

- maximale Lasten senkrecht auf die vertikale Silowand (Horizontallasten);
- maximale vertikale Wandreibungslast auf die vertikale Silowand;
- maximale Vertikallasten auf den Siloboden;
- maximale Lasten auf den Silotrichter.

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

(5) Die Ermittlung der Lasten eines Lastfalles sollte immer für eine bestimmte Kombination von zusammengehörigen Schüttgutkennwerten μ , K und ϕ_1 erfolgen, so dass jedem Grenzzustand eine spezielle, definierte Beschaffenheit eines Schüttgutes zugeordnet ist.

(6) Für jeden dieser Lastfälle werden seine Extremwerte erreicht, wenn die Schüttgutkennwerte μ , K und ϕ_1 jeweils unterschiedliche Extremwerte innerhalb der Streubreiten ihrer charakteristischen Schüttgutkennwerte annehmen. Um bei der Bemessung eine ausreichende Sicherheit für alle Grenzzustände sicherzustellen, sollten unterschiedliche Kombinationen der Extremwerte dieser Materialparameter betrachtet werden. Die Extremwerte der Schüttgutwerte, die verwendet werden sollten, sind in Tabelle 3.1 angegeben.

Tabelle 3.1 — Maßgebliche Kennwerte für die unterschiedlichen Lastansätze

	Anzusetzender charakteristischer Wert		
	Wandreibungs- koeffizient μ	Horizontallast- verhältnis K	Winkel der inneren Reibung ϕ_i
Lastfalluntersuchung			
Vertikaler Wandabschnitt			
Maximale Horizontallasten senkrecht auf die vertikalen Wände	Unterer Grenzwert	Oberer Grenzwert	Unterer Grenzwert
Maximale Wandreibungslasten auf die vertikalen Wände	Oberer Grenzwert	Oberer Grenzwert	Unterer Grenzwert
Maximale Vertikallasten auf den Trichter oder den Siloboden	Unterer Grenzwert	Unterer Grenzwert	Oberer Grenzwert
Lastfalluntersuchung	Wandreibungs- koeffizient μ	Trichterdruck F	Winkel der inneren Reibung ϕ_i
Trichterwände			
Maximale Trichterlasten im Füllzustand	Unterer Grenzwert für den Trichter	Unterer Grenzwert	Unterer Grenzwert
Maximale Trichterlasten beim Entleeren	Unterer Grenzwert für den Trichter	Oberer Grenzwert	Oberer Grenzwert
ANMERKUNG 1 Es sollte beachtet werden, dass der Wandreibungswinkel immer kleiner oder gleich dem Winkel der inneren Reibung des gelagerten Schüttgutes ist (d. h. $\phi_{wh} \leq \phi_i$). Da sich sonst innerhalb des Schüttgutes eine Gleitfläche ausbildet, wenn an der Wandkontaktfläche größere Schubspannungen aufnehmbar sind, als durch die innere Reibung des Schüttgutes. Das bedeutet, dass in allen Fällen der Wandreibungskoeffizient nicht größer als $\tan \phi_i$ angenommen werden sollte ($\mu = \tan \phi_w \leq \tan \phi_i$). ANMERKUNG 2 Die Lasten senkrecht auf die Trichterwände p_n sind in der Regel am größten, wenn die Wandreibung im Trichter klein ist, weil dadurch ein kleinerer Teil der Lasten im Trichter über Reibung an der Wand abgetragen wird. Es sollte sorgfältig überlegt werden, welche maximalen Kennwerte bei den einzelnen Bemessungsaufgaben maßgeblich werden (d. h. ob die Wandreibungslasten oder Lasten senkrecht zur Trichterwand als maximal angesetzt werden sollten, hängt von dem zu untersuchenden Bruchzustand des Bauteils ab).			

(7) Ungeachtet der obigen Ausführungen können Silos der Anforderungsklasse 1 unter Verwendung der Mittelwerte der Schüttgutkennwerte, also des Mittelwerts des Wandreibungskoeffizienten μ_m , des Mittelwerts des Horizontallastverhältnisses K_m und des Mittelwerts des Winkels der inneren Reibung ϕ_m bemessen werden.

(8) Die grundlegenden Gleichungen zur Berechnung der Silolasten sind in den Abschnitten 5 und 6 enthalten. Sie sollten der Berechnung folgender charakteristischen Lasten zugrunde gelegt werden:

- Fülllasten auf vertikale Wandabschnitte (siehe Abschnitt 5);
- Entleerungslasten auf vertikale Wandabschnitte (siehe Abschnitt 5);
- Füll- und Entleerungslasten auf waagrechte Böden (siehe Abschnitt 6);
- Fülllasten auf Trichter (siehe Abschnitt 6);
- Entleerungslasten auf Trichter (siehe Abschnitt 6).

3.3 Bemessungssituationen für unterschiedliche geometrische Ausbildungen der Silogeometrie

(1)P Unterschiedliche Siloschlankheiten (Verhältnis von Höhe zu Durchmesser), Trichtergeometrien und Anordnungen der Auslauföffnungen führen zu unterschiedlichen, zu betrachtenden Bemessungssituationen.

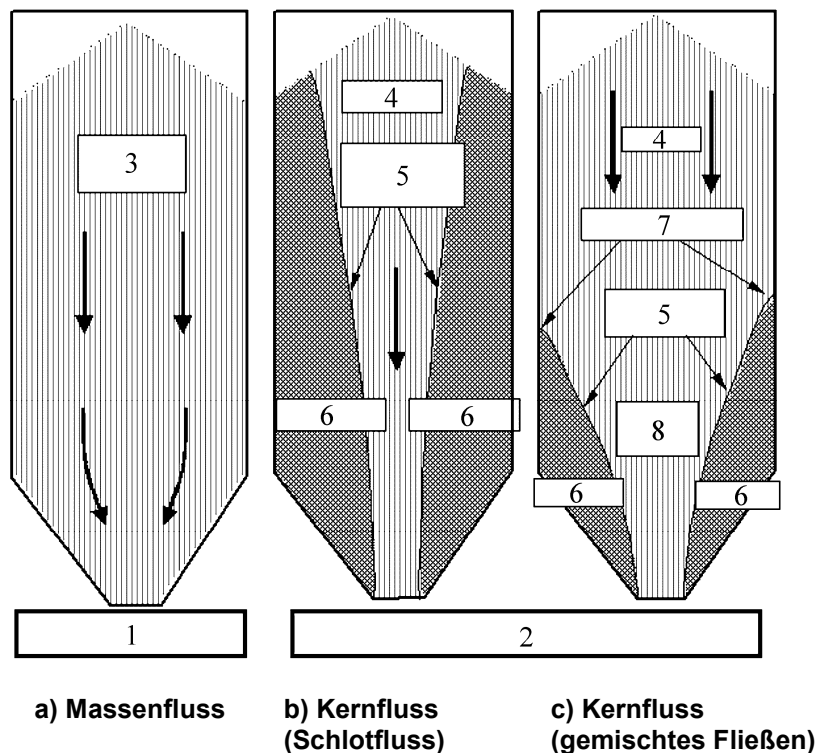
(2) Wenn bei einigen Füllständen die Flugbahn des Füllstrahles des eingefüllten Schüttgutes zu einem exzentrischen ausgebildeten Anschüttkegel an der Schüttgutoberfläche führt (siehe Bild 1.1b)), können in unterschiedlichen Bereichen des Silos unterschiedliche Lagerungsdichten auftreten, die zu unsymmetrischen Lasten führen. Bei der Ermittlung der Größe dieser Lasten sollte die größtmögliche Exzentrizität des Füllstrahles e_f zugrunde gelegt werden (siehe 5.2.1.2 und 5.3.1.2).

(3) Bei der Bemessung sollten die Auswirkungen der sich beim Entleeren einstellenden Fließprofile beachtet werden, die in folgende Kategorien eingeteilt werden können (siehe Bild 3.1).

- Massenfluss
- Schlotfluss
- Gemischtes Fließen

(4) Wenn bei Schlotfluss zusätzlich sichergestellt werden kann, dass sich der Fließkanal immer innerhalb des Schüttgutes ohne Berührung mit der Silowand befindet (siehe Bilder 3.2a) und b)), können die Entleerungsdrücke vernachlässigt werden. Niedrige Silos mit konzentrischer Entleerung mit Hilfe der Schwerkraft und Silos mit einem an der Schüttgutoberfläche befindlichen mechanischen Entleerungssystem, das eine Schlotflussausbildung innerhalb des Schüttgutkörpers sicherstellt (siehe Bilder 3.4a) und b) und 3.5a)) erfüllen diese Bedingungen (siehe 5.1 (7) und 5.3.2.1 (2) und (4)).

ANMERKUNG Ein geeignet ausgelegtes Zentralrohr mit seitlichen Entnahmeöffnungen („Anti-Dynamic Tube“) kann diese Bedingung, d. h. die Ausbildung eines inneren Schlotflusses, auch sicherstellen.



Legende

- | | |
|----------------------------------|-----------------------|
| 1 Massenfluss | 5 Fließkanalgrenzen |
| 2 Kernfluss | 6 Schüttgut in Ruhe |
| 3 Gesamtes Schüttgut in Bewegung | 7 Effektiver Übergang |
| 4 Fließendes Schüttgut | 8 Effektiver Trichter |

Bild 3.1 — Grundlegende Fließprofile

(5) Bei symmetrischem Massenfluss oder bei gemischtem Fließen (siehe Bild 3.1) sollte die Bemessung die dort üblicherweise auftretenden unsymmetrischen Lasten berücksichtigt werden (siehe 5.2.2.2 und 5.3.2.2).

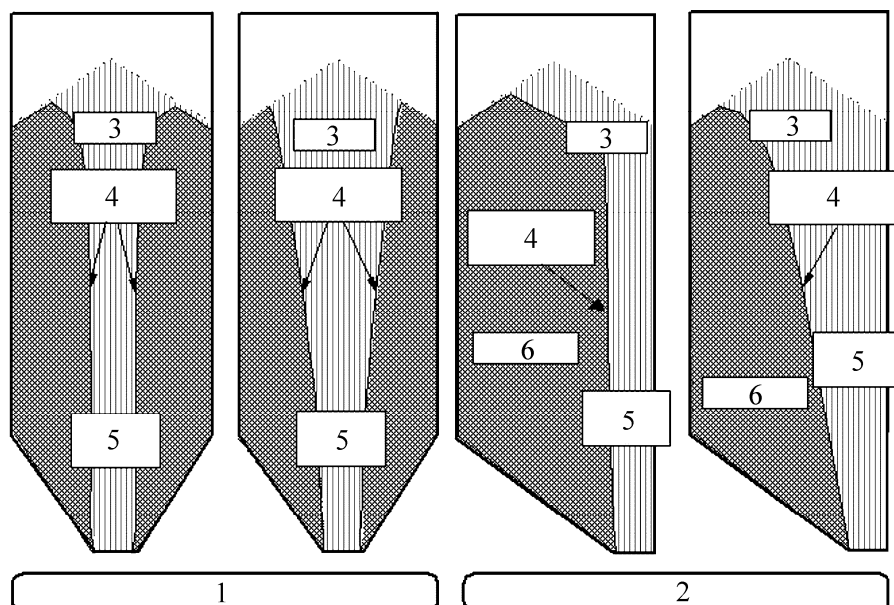
(6) Bei Fließprofilen mit Kernfluss und teilweise Kontakt der sich in Bewegung befindlichen Schüttgutbereiche mit der Silowand sollten bei der Bemessung weitere unsymmetrische Lastanteile berücksichtigt werden, die speziell in diesem Fall auftreten können (siehe Bilder 3.2c) und d) sowie Bilder 3.3b) und c)) (siehe auch 5.2.4).

(7) Bei Silos mit mehreren Auslauföffnungen sollte unter Annahme des maximal möglichen Füllzustandes berücksichtigt werden, dass im Betrieb entweder eine Auslauföffnung allein oder Kombinationen von gleichzeitig geöffneten Auslauföffnungen wirksam sein können.

(8) Bei Silos mit mehreren Auslauföffnungen sollten die im Betrieb vorgesehenen Kombinationen von aktiven Auslauföffnungen als gewöhnliche Bemessungssituationen behandelt werden. Andere nicht auszuschließenden Öffnungssituationen, die der planmäßige Betrieb nicht vorsieht, sollten als außergewöhnliche Bemessungssituationen behandelt werden.

ANMERKUNG Der Begriff „gewöhnliche Bemessungssituation“ in obigem Absatz bezieht sich auf eine Grundkombination in EN 1990, 6.4.3.2. Der Begriff „außergewöhnliche Bemessungssituation“ bezieht sich auf die außergewöhnlichen Bemessungssituationen in EN 1990, 6.4.3.3.

(9) Wenn bei einem exzentrisch gefüllten sehr schlanken Silo in unterschiedlichen Bereichen im Silo Entmischungseffekte entweder zu unterschiedlichen Packungsdichten oder Kohäsion des Schüttgutes führen, kann die asymmetrische Anlagerung der Schüttgutpartikel einen unsymmetrischen Kernfluss auslösen (siehe Bild 3.4d)). Dies führt im Silo zu Bereichen, in denen das Schüttgut entlang der Silowand fließt und dabei unsymmetrische Lasten hervorruft. Für diese Fälle sollten spezielle Lastansätze (siehe 5.2.4.1 (2)) verwendet werden.



a) innerer
paralleler
Schlotfluss

b) innerer
konvergenter
Schlotfluss

c) exzentrischer
paralleler
Schlotfluss

d) exzentrischer
konvergenter Schlotfluss

Legende

1 Innerer Schlotfluss

2 Exzentrischer Schlotfluss

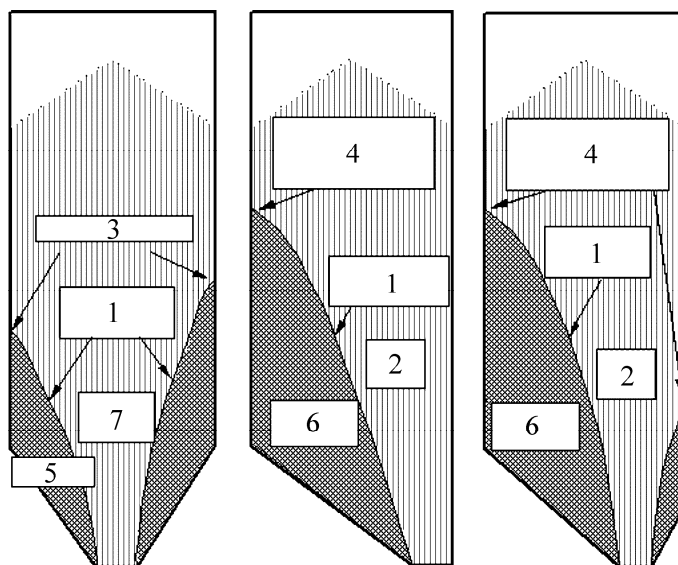
3 Fließendes Schüttgut

4 Fließkanalgrenzen

5 Fließender Schlot

6 Schüttgut in Ruhe

Bild 3.2 — Fließprofile mit Schlotfluss



a) konzentrisches
gemischtes Fließen

b) voll
exzentrisches
gemischtes Fließen

c) teilweise
exzentrisches
gemischtes Fließen

Legende

1 Fließkanalgrenze

2 Fließzone

3 Effektiver Übergang

4 Effektiver Übergang variiert in

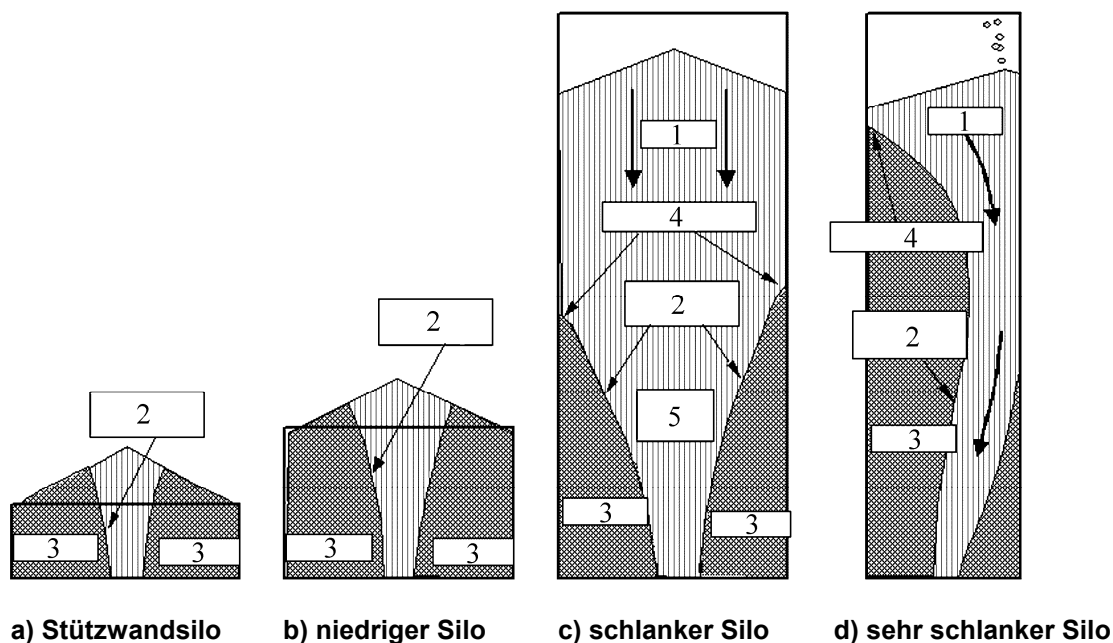
Siloumfangsrichtung

5 Ruhendes Schüttgut

6 Ruhendes Schüttgut

7 Effektiver Trichter

Bild 3.3 — Fließprofile mit gemischtem Schüttgutfließen



Legende

- | | |
|-----------------------|-----------------------|
| 1 Schüttgut in Ruhe | 4 Effektiver Übergang |
| 2 Fließkanalgrenze | 5 Fließen |
| 3 Effektiver Trichter | |

Bild 3.4 — Auswirkung der Schlankheit (Verhältnis Höhe zu Durchmesser) auf das gemischte Schüttgutfließen und den Schlotfluss

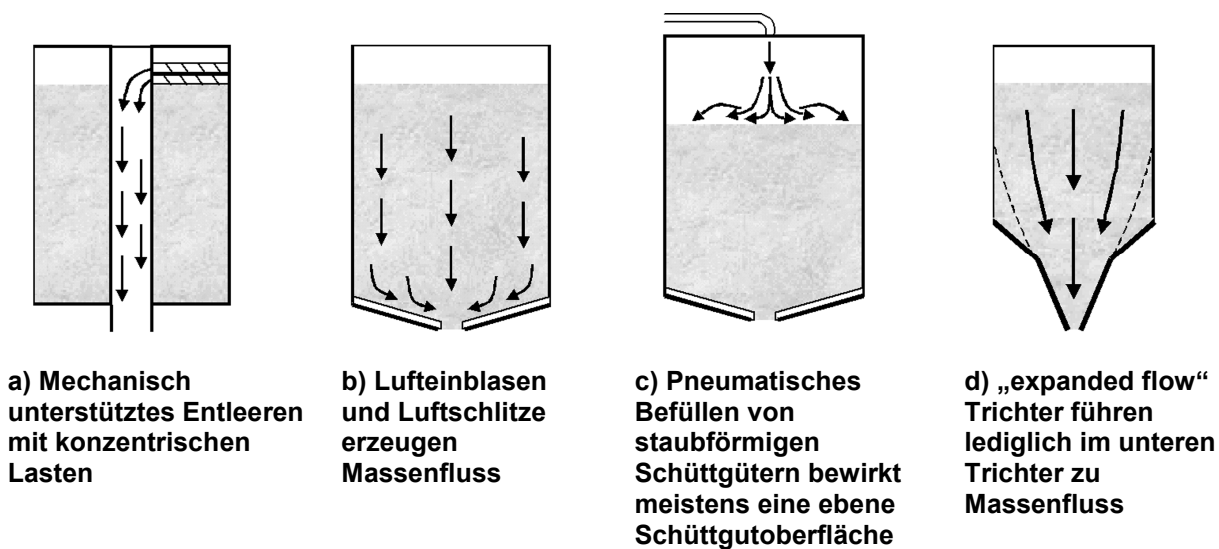


Bild 3.5 — Spezielle Füll- und Entleerungsanordnungen

(10) Bei Silos mit pneumatisch beförderten staubförmigen Schüttgütern sollten zwei Bemessungssituationen bei jeweils maximaler Befüllung betrachtet werden. Erstens: Das eingefüllte Schüttgut kann einen Schüttkegel ausbilden, wie dies bei den anderen Schüttgütern der Fall ist. Zweitens: Es sollte berücksichtigt werden, dass sich die Schüttgutoberfläche unabhängig vom Böschungswinkel und der Einfüll'exzentrizität unter Umständen auch eben ausformt (siehe Bild 3.5c)). In diesem Fall dürfen die Exzentrizitäten e_f und e_t zu null angesetzt werden.

(11) Bei Silos zur Lagerung von staubförmigen Schüttgütern mit kontinuierlicher Lufteinblasung im Bodenbereich als Entleerungshilfe (siehe Bild 3.5b)), kann der gesamte Schüttgutbereich in Bodennähe fluidisiert werden, was sogar in einem niedrigen Silo einen wirksamen Massenfluss hervorrufen kann. Solche Silos sollten unabhängig von der tatsächlichen Schlankheit h_c/d_c entsprechend dem Vorgehen bei schlanken Silos berechnet werden.

(12) Bei Silos für staubförmige Schüttgüter mit kontinuierlicher Lufteinblasung im Bodenbereich als Entleerungshilfe (siehe Bild 3.5b)) darf auch nur ein Teilbereich des Schüttgutes in Bodennähe fluidisiert werden. Dies kann einen exzentrischen Schlotfluss hervorrufen (siehe Bild 3.3b)), was bei der Bemessung zu berücksichtigen ist. Die Exzentrizität des resultierenden Fließkanals und der resultierende Wert für die anzusetzende Exzentrizität e_o sollten unter Beachtung des fluidisierten Bereiches und nicht nur aus der Lage der Auslauföffnung abgeleitet werden.

(13) Die vertikalen Silowände mit einem Entleerungstrichter, der zu einem „erweiterten Fließen“ („expanded flow“) (siehe Bild 3.5d)) führt, können den Bedingungen eines gemischten Schüttgutfließens unterliegen. Dies kann zu unsymmetrischen Entleerungslasten führen. Als Schlankheit sollte bei diesem Silotyp das Verhältnis h_b/d_c anstatt h_c/d_c (siehe Bild 1.1a)) angesetzt werden.

(14) Ein Silo mit einer Schlankheit h_c/d_c von kleiner als 0,4 und mit einem Auslauftrichter sollte als niedriger Silo eingestuft werden. Bei einem waagerechten Siloboden sollte dieser Silo als Stützwandsilo eingestuft werden.

(15) Bei einem Silo mit einem nicht konischem, nicht pyramidisch geformten oder nicht keilförmigen Trichter sollte eine geeignete Methode zur Berechnung der Trichterlasten verwendet werden. Bei einem Trichter mit inneren Einbauten sollten sowohl die Trichterlasten als auch die Lasten auf diese Einbauten mit einer geeigneten Methode bestimmt werden.

(16) Bei einem Silo mit keilförmigem Trichter unter einem kreisförmigen Zylinder (meißelförmigen Trichter) ist eine geeignete Berechnungsmethode für die Trichterlasten anzuwenden.

ANMERKUNG Langgestreckte Auslauföffnungen können zu speziellen Problemen führen. Die Verwendung von Entleerungshilfen zur Kontrolle der Schüttgutentleerung von Silos beeinflusst das Fließprofil. Dies kann entweder zu Massenfluss, zu voll exzentrischem gemischtem Fließen oder zu voll exzentrischem Schlotfluss führen.

3.4 Bemessungssituationen für spezielle Konstruktionsformen von Silos

(1) 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.

(2) Bei Metallsilos, die maßgeblich aus Konstruktionen mit Bolzen- und Schraubenverbindungen bestehen, sollten die Festlegungen für die unsymmetrischen Lastansätze (Teilflächenlast) nach 5.2.1.4 (4) getroffen werden. Dabei sollte berücksichtigt werden, dass die ungleichförmigen Lasten überall im Silo auftreten können.

(3) Bei Metallsilos mit rechteckigem Querschnitt, die innerhalb des Siloschaftes Zugbänder zur Reduzierung der Wandbiegemomente enthalten, sollten die Ausführungen von 5.7 beachtet werden.