

DIN EN 1991-4**DIN**

ICS 91.010.30; 91.040.01

Ersatzvermerk
siehe unten

Siehe "Berichtigung 1"

**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 1991-4:2006Eurocode 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

DIN EN 1991-4:2010-12

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

DIN EN 1991-4:2010-12
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
2	

	Seite
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

DIN EN 1991-4:2010-12
EN 1991-4:2006 (D)

	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	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

Seite

D.3	Innere Reibung und Wandreibung eines grobkörnigen Schüttgutes ohne Feinanteile	109
Anhang E (normativ) Angabe von Schüttgutkennwerten		
E.1	Allgemeines	110
E.2	Angegebene Werte	110
Anhang F (informativ) Bestimmung der Fließprofile		
F.1	Massen- und Kernfluss	112
Anhang G (normativ) Alternative Regeln zur Ermittlung von Trichterlasten		
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		
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

5

DIN EN 1991-4:2010-12
EN 1991-4:2006 (D)

	Seite
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).

DIN EN 1991-4:2010-12 EN 1991-4:2006 (D)

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.

DIN EN 1991-4:2010-12
EN 1991-4:2006 (D)

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 Grundlagendokumentes 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 Silodrücker infolge von Einbauten oder spezielle Querschnittseinengungen bzw. Einbauten, wie Entlastungskegel, Entlastungsbalken usw. werden nicht erfasst. Ein rechteckiger Silo kann jedoch innere Zugbänder beinhalten.

DIN EN 1991-4:2010-12
EN 1991-4:2006 (D)

(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.

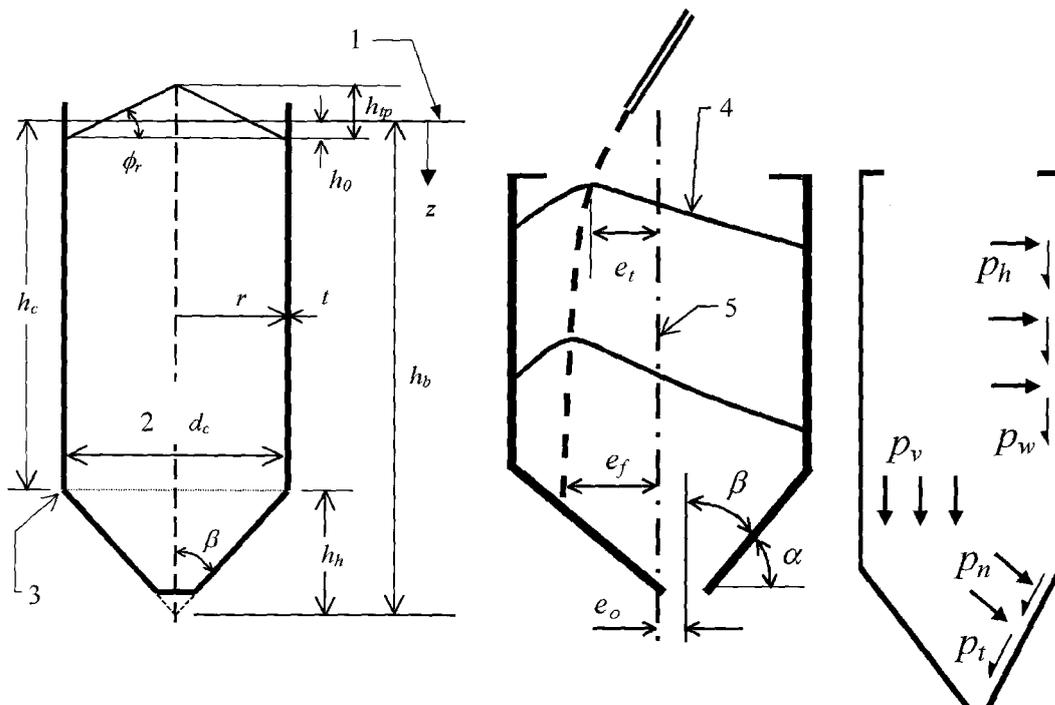
(8) Die Bemessungsregeln für Flüssigkeitsbehälter gelten nur für Flüssigkeiten unter üblichem atmosphärischem Druck.

(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.

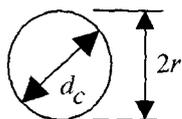


a) Geometrie

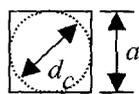
b) Exzentrizitäten

c) Lasten

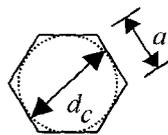
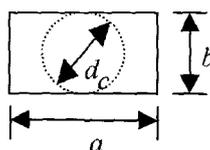
$$A/U = r/2$$



$$A/U = a/4$$



$$A/U = (b/2) / (1+b/a)$$



$$A/U = \sqrt{3} (a/4) = d_c/4$$

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

DIN EN 1991-4:2010-12
EN 1991-4:2006 (D)

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 geeigneten Seitenflächen in einem Punkt zusammenlaufen, womit in der Regel ein axialsymmetrisches Schüttgutfließen sichergestellt werden kann

DIN EN 1991-4:2010-12 EN 1991-4:2006 (D)

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 Anschütkegels) 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**granuläres 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 gleichmäßig 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))

DIN EN 1991-4:2010-12
EN 1991-4:2006 (D)

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.

DIN EN 1991-4:2010-12
EN 1991-4:2006 (D)

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))

DIN EN 1991-4:2010-12
EN 1991-4:2006 (D)

- 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
- ρ Last in der Einheit Kraft durch Fläche
- ρ_h Horizontallast aus dem gespeicherten Schüttgut (siehe Bild 1.1c))
- ρ_{hae} Horizontallast im sich in Ruhe befindlichen Bereich des Schüttgutes neben dem Fließkanal bei einer Entleerung mit großen Exzentrizitäten
- ρ_{hce} Horizontallast im Fließkanal bei einer Entleerung mit großen Exzentrizitäten
- ρ_{hco} asymptotische Horizontallast in großer Tiefe im Fließkanal bei einer Entleerung mit großen Exzentrizitäten
- ρ_{he} Horizontallasten beim Entleeren
- $\rho_{he,u}$ Horizontallasten beim Entleeren und Verwendung der vereinfachten Rechenverfahren
- ρ_{hf} Horizontallasten nach dem Füllen
- ρ_{hfb} Horizontallasten nach dem Füllen am unteren Ende des vertikalen Siloschaftes
- $\rho_{hf,u}$ Horizontallasten nach dem Füllen bei Anwendung der vereinfachten Rechenverfahren
- ρ_{ho} asymptotische Horizontallasten in großer Tiefe aus gespeichertem Schüttgut
- ρ_{hse} Horizontallasten im sich in Ruhe befindlichen Schüttgut in größerem Abstand zum Fließkanal während einer Entleerung mit großen Exzentrizitäten
- ρ_{hT} Zunahme der Horizontallasten infolge Temperaturunterschiede bzw. -änderungen
- ρ_n Lasten senkrecht auf die Trichterwände aus dem gelagerten Schüttgut (siehe Bild 1.1c))
- ρ_{ne} Lasten senkrecht auf die Trichterwände während der Entleerung
- ρ_{nf} Lasten senkrecht auf die Trichterwände nach dem Füllen
- ρ_p Teilflächenlast
- ρ_{pe} Grundwert der Teilflächenlast während des Entleerens
- ρ_{pei} komplementäre Teilflächenlast beim Entleeren
- $\rho_{pe,nc}$ streifenförmige Teilflächenlast bei Silos mit nicht kreisförmigen Querschnitten beim Entleeren
- ρ_{pf} Grundwert der Teilflächenlast nach dem Füllen
- ρ_{pfi} komplementäre Teilflächenlast nach dem Füllen
- $\rho_{pf,nc}$ streifenförmige Teilflächenlast bei Silos mit nicht kreisförmigen Querschnitten nach dem Füllen
- $\rho_{p,sq}$ Teilflächenlast in flachen Silos
- ρ_{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

DIN EN 1991-4:2010-12
EN 1991-4:2006 (D)

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 aufgebrauchte 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 Fließprofils 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.

DIN EN 1991-4:2010-12
EN 1991-4:2006 (D)

(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.

DIN EN 1991-4:2010-12
EN 1991-4:2006 (D)

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 $e_{\phi}/d_c > 0,25$ (siehe Bild 1.1b)) b) niedrige Silos mit einer exzentrischen Befüllung von mehr als $e_{\phi}/d_c > 0,25$
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.

DIN EN 1991-4:2010-12
EN 1991-4:2006 (D)

Tabelle 3.1 — Maßgebliche Kennwerte für die unterschiedlichen Lastansätze

	Anzusetzender charakteristischer Wert		
	Wandreibungs- koeffizient	Horizontallast- verhältnis	Winkel der inneren Reibung
Lastfalluntersuchung	μ	K	ϕ
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	Trichterdruck	Winkel der inneren Reibung
	μ	F	ϕ
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
<p>ANMERKUNG 1 Es sollte beachtet werden, dass der Wandreibungswinkel immer kleiner oder gleich dem Winkel der inneren Reibung des gelagerten Schüttgutes ist (d. h. $\phi_{wh} \leq \phi$). 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 $\tan \phi$ angenommen werden sollte ($\mu = \tan \phi_w \leq \tan \phi$).</p> <p>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).</p>			

(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).

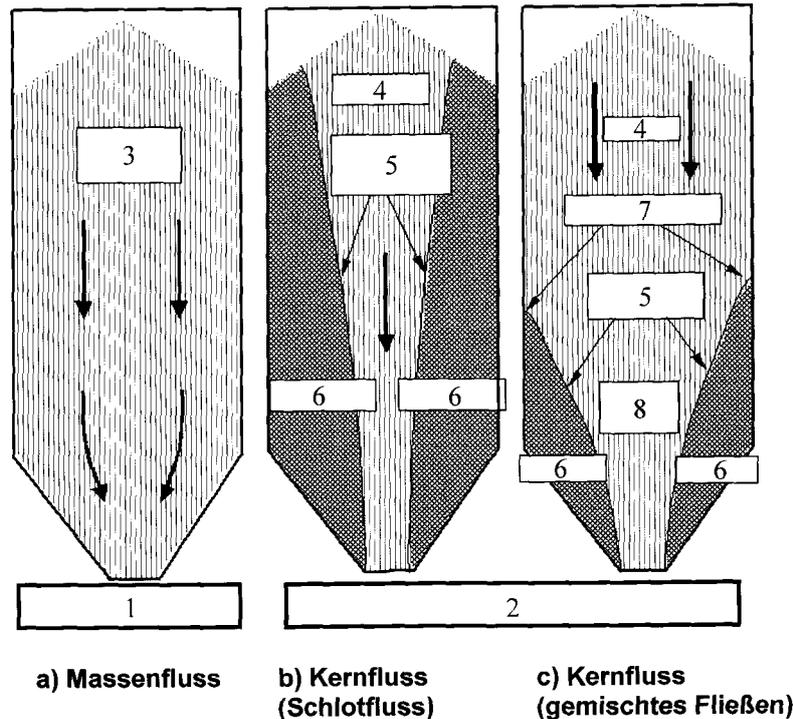
(3) Bei der Bemessung sollten die Auswirkungen der sich beim Entleeren einstellenden Fließprofile beachtet werden, die in folgende Kategorien eingeteilt werden können (siehe Bild 3.1).

- 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.

DIN EN 1991-4:2010-12
EN 1991-4:2006 (D)



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).

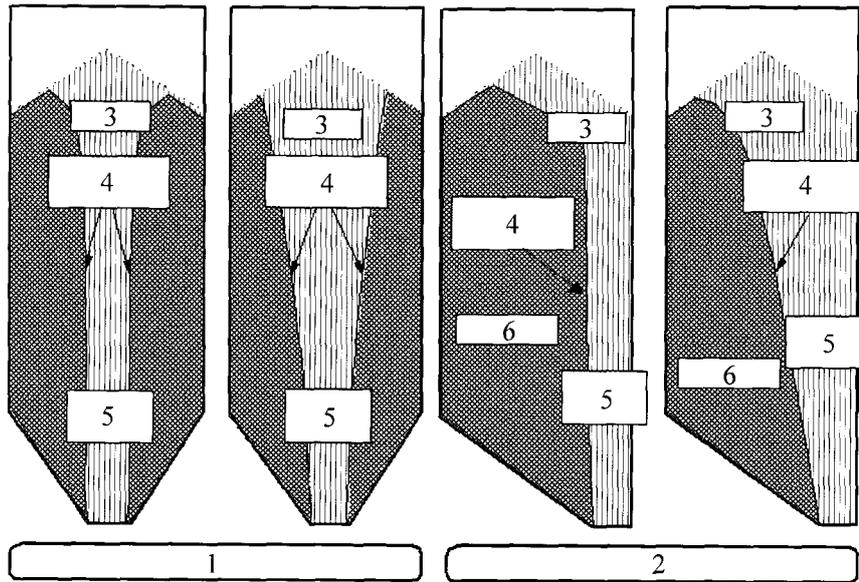
(6) Bei Fließprofilen mit Kernfluss und teilweiseem Kontakt der sich in Bewegung befindlichen Schüttgutbereiche mit der Silowand sollten bei der Bemessung weitere unsymmetrische Lastanteile berücksichtigt werden, die speziell in diesem Fall auftreten können (siehe Bilder 3.2c) und d) sowie Bilder 3.3b)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

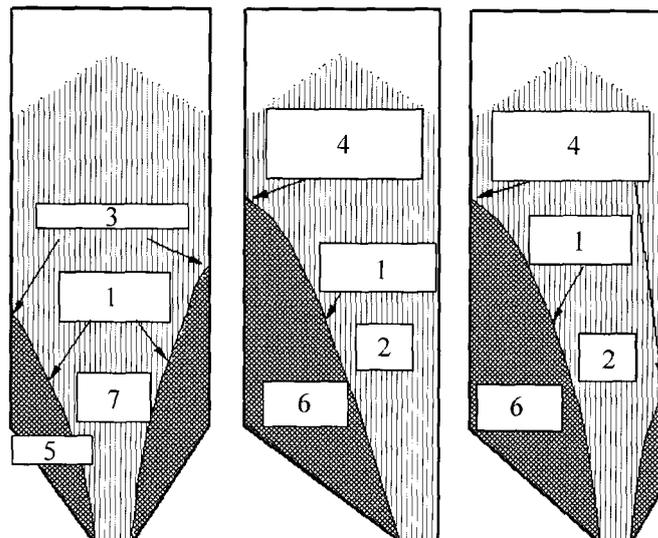


- a) innerer paralleler Schlotfluss b) innerer konvergenter Schlotfluss c) exzentrischer paralleler Schlotfluss d) exzentrischer konvergenter Schlotfluss

Legende

- | | | |
|-----------------------------|------------------------|---------------------|
| 1 Innerer Schlotfluss | 3 Fließendes Schüttgut | 5 Fließender Schlot |
| 2 Exzentrischer Schlotfluss | 4 Fließkanalgrenzen | 6 Schüttgut in Ruhe |

Bild 3.2 — Fließprofile mit Schlotfluss



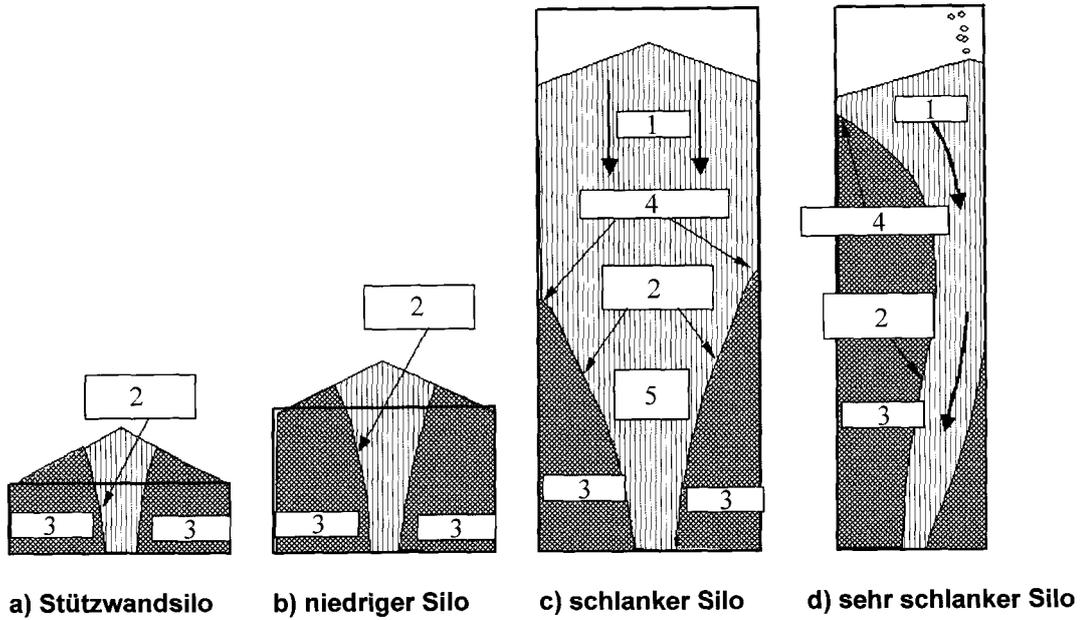
- a) konzentrisches gemischtes Fließen b) voll exzentrisches gemischtes Fließen c) teilweise exzentrisches gemischtes Fließen

Legende

- | | | |
|-----------------------|---|-----------------------|
| 1 Fließkanalgrenze | 4 Effektiver Übergang variiert in Siloumfangsrichtung | 6 Ruhendes Schüttgut |
| 2 Fließzone | 5 Ruhendes Schüttgut | 7 Effektiver Trichter |
| 3 Effektiver Übergang | | |

Bild 3.3 — Fließprofile mit gemischtem Schüttgutfließen

DIN EN 1991-4:2010-12
EN 1991-4:2006 (D)



Legende

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

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

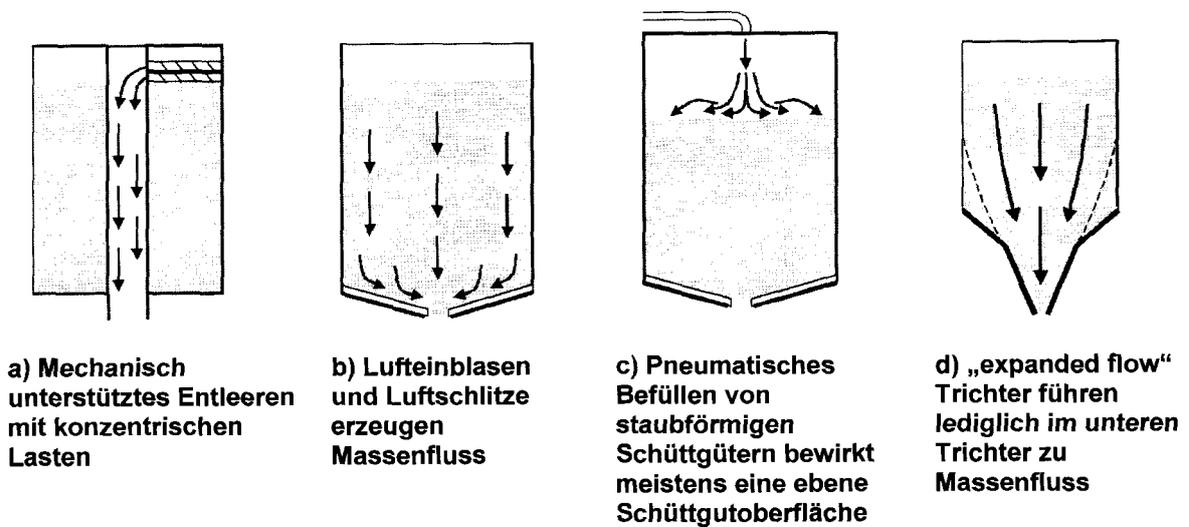


Bild 3.5 — Spezielle Füll- und Entleerungsanordnungen

(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 Einfüllexzentrizität 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 Auslaufrichter 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.

DIN EN 1991-4:2010-12
EN 1991-4:2006 (D)

(4) Die Auswirkungen von Ermüdungseffekten sollten bei Silos und Flüssigkeitsbehälter berücksichtigt werden, wenn diese durchschnittlich mehr als einmal am Tag mit einem Lastzyklus beaufschlagt werden. Ein Lastzyklus entspricht einer vollständigen Befüllung und Entleerung eines Silos, oder im Falle eines mit Lufteinblasen beaufschlagten Silos (siehe Bild 3.5b)), eine vollständige Abarbeitung (Rotation) der mit Lufteinblasen beaufschlagten Sektoren. Ermüdungseffekte sollten auch bei Silos berücksichtigt werden, die von schwingenden Maschinen/Anlagenkomponenten beeinflusst werden.

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

(6) 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 Lasten berücksichtigt werden. Diese Last sollte nur für die Bemessung des Verschlussdeckels und seine Auflagerung bzw. Befestigungskonstruktionen angesetzt werden.

(7) Wenn das Silodach Lasten von Staubfilteranlagen, Zyklonen, mechanischen Transportvorrichtungen oder sonstigen Anlagenteilen aufzunehmen hat, sollten diese Lasten als Nutzlasten behandelt werden.

(8) Wenn pneumatische Beförderungssysteme zur Befüllung oder Entleerung von Silos verwendet werden, sollten entsprechende resultierende Luftdruckunterschiede berücksichtigt werden.

ANMERKUNG Diese Drücke betragen zwar im Regelfall < 10 kPa, es können aber auch erhebliche Unterdrücke (z. B. 40 kPa $\approx 0,4$ bar) zufolge einer fehlerhaften Dimensionierung von speziellen Förderanlagen oder bei Betriebsstörungen auftreten. Silos sollten deshalb mit geeigneten Entlastungsvorrichtungen für unvorhergesehene Ereignisse ausgestattet sein, wenn der Konstrukteur des Silos diese nicht anderweitig sicher ausschließen kann.

(9) Beim Einsatz von Schwingungseinrichtungen, Luftkanonen oder rotierenden Entnahmearmen am Siloboden sollten die dadurch bedingten Laständerungen im Hinblick auf den Grenzzustand der Ermüdung untersucht werden. Schwingungen aus pneumatischen Förderanlagen sollten ebenfalls berücksichtigt werden.

(10) 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.

3.5 Bemessungssituationen für in Flüssigkeitsbehältern gelagerte Flüssigkeiten

(1)P Lasten auf Flüssigkeitsbehälter infolge der gelagerten Flüssigkeiten sind jeweils während des Füllens und für den maximalen Füllzustand zu ermitteln.

(2) Wenn der Flüssigkeitsspiegel des Betriebszustandes von dem des maximalen Füllzustandes abweichen kann, sollte dieser zusätzlich als außergewöhnliche Bemessungssituation berücksichtigt werden.

3.6 Bemessungsprinzipien für Explosionen

(1) Da in Flüssigkeitsbehältern und Silos gelagerte Flüssigkeiten bzw. Schüttgüter zu Explosionen neigen können, sollten die potentiellen Schädigungen durch folgende Maßnahmen begrenzt oder vermieden werden:

- Anordnung von ausreichenden Druckentlastungsflächen;
- Anordnung von geeigneten Explosionsunterdrückungssystemen;
- Auslegung/Bemessung der Struktur für die Aufnahme der Explosionsdrücke.

Einige Schüttgüter, die zu Staubexplosionen neigen, sind in Tabelle E.1 genannt.

ANMERKUNG Hilfen zur Behandlung des Lastfalls Staubexplosion sind in Anhang H gegeben.

(2) Einwirkungen infolge einer Staubexplosion in einer Siloanlage auf benachbarte Gebäude oder Gebäudeteile sollten berücksichtigt werden.

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

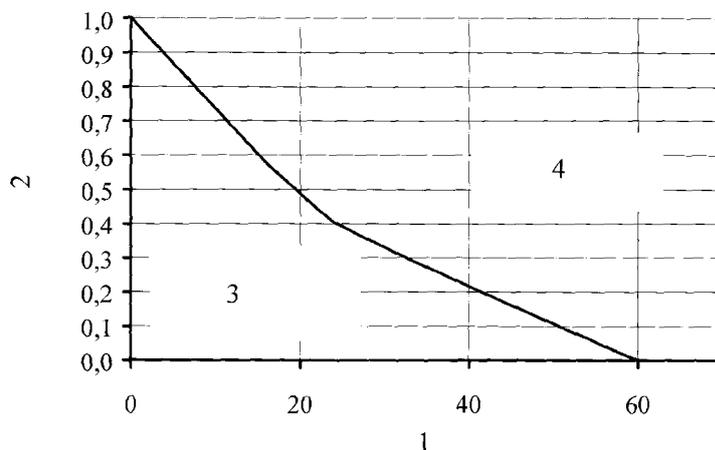
4 Schüttgut

4.1 Allgemeines

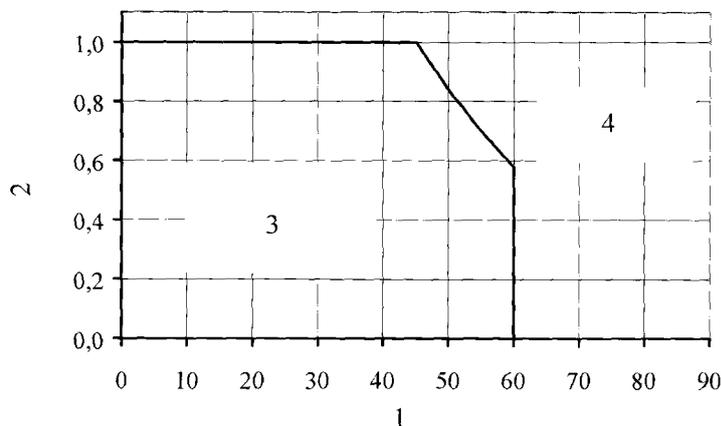
(1)P Bei der Ermittlung der Silolasten infolge von Schüttgut sind folgende Einflüsse zu berücksichtigen:

- die Streuung der Schüttgutkennwerte;
- die Schwankungen der Wandreibung an der Silowand;
- die Silogeometrie;
- die Befüll- und Entleerungsverfahren.

(2) Günstig wirkende Einflüsse der Schüttgutsteifigkeit sollten bei der Lastermittlung und den Stabilitätsbetrachtungen der Wand nicht berücksichtigt werden. Eine positive Wirkung einer Wandverformung auf die sich im Schüttgut entwickelnden Drücke sollte vernachlässigt werden, außer wenn eine verständlich verifizierte Berechnungsmethode nachgewiesen werden kann.



a) Konischer Trichter



b) Keilförmiger Trichter

Legende

- | | |
|---|---|
| 1 Halber Scheitelwinkel β des Trichters | 3 Bereich mit der Möglichkeit von Massenfluss |
| 2 Wandreibungskoeffizient μ_h des Trichters | 4 Bereich mit Kernfluss |

Bild 4.1 — Bedingungen, unter denen Drücke infolge Massenfluss auftreten

DIN EN 1991-4:2010-12
EN 1991-4:2006 (D)

(3) Falls erforderlich, sollte die Art des Fließprofils (Massen- oder Kernfluss) aus Bild 4.1 ermittelt werden. Bild 4.1 sollte aufgrund der zugrunde gelegten vereinfachenden Annahmen aber nicht für die verfahrenstechnische Gestaltung der Silos herangezogen werden, da z. B. der Einfluss der inneren Reibung vernachlässigt ist.

ANMERKUNG Die Auslegung der Silogeometrie für einen Massenfluss ist außerhalb des Anwendungsbereiches dieser Norm (siehe 1.1.2(5)). Für diese Zwecke sind die speziellen Methoden und Verfahren der schüttgutmechanischen Verfahrenstechnik anzuwenden.

4.2 Schüttgutkennwerte

4.2.1 Allgemeines

(1)P Die für die Berechnung der Lasten zu quantifizierenden Materialeigenschaften von in Silozellen gespeicherten Schüttgütern sind entweder aus Versuchsergebnissen oder aus anderem geeigneten Datenmaterial zu beschaffen bzw. abzuleiten.

(2)P Bei Verwendung von Werten aus Versuchsergebnissen und anderen Datenquellen sind diese im Hinblick auf den jeweilig betrachteten Lastfall in geeigneter Weise auszuwerten.

(3)P Es ist zu berücksichtigen, dass zwischen den in Versuchen gemessenen Materialparametern und den Kennwerten, die das tatsächliche Schüttgutverhalten im Silo bestimmen, signifikante Unterschiede bestehen können.

(4)P Bei der Abschätzung der unter (3)P erwähnten Unterschiede in den Schüttgutkennwerten sind unter anderem folgende Faktoren zu beachten:

- viele Parameter sind keine Konstanten, die vom Spannungsniveau und der Belastungsgeschichte abhängig sind;
- Einflüsse infolge Partikelform, Größe und Korngrößenverteilung können sich im Versuch und im Silo unterschiedlich stark auswirken;
- Zeiteinflüsse;
- Schwankungen des Feuchtigkeitsgehalts;
- Einflüsse von dynamischen Einwirkungen;
- die Sprödigkeit oder Duktilität der getesteten Schüttgüter;
- die Art und Weise des Einbringens des Schüttgutes in den Silo und in das Prüfgerät.

(5)P Bei der Abschätzung der unter (3)P erwähnten Unterschiede in Bezug auf den Wandreibungskoeffizienten sind folgende Faktoren zu beachten:

- Korrosion und chemische Reaktion zwischen den Schüttgutpartikeln, Feuchte und der Wand;
- Abrieb und Verschleiß, die die Silowand aufrauen können;
- Glättung der Wandoberfläche;
- Anreicherung von Fettablagerungen an der Wand;
- Partikel, die in die Wandoberfläche hineingedrückt werden (gewöhnlich ein Einfluss, der zur Aufrauung der Wandoberfläche führt).

(6) P Bei der Festlegung der Werte der Materialparameter ist Folgendes zu beachten:

- veröffentlichte und allgemein anerkannte Angaben zu der Anwendung der jeweiligen Versuche;
- Vergleichsbetrachtungen zu den in Versuchen gemessenen Werten der einzelnen Parameter mit entsprechend veröffentlichten Kennwerten und unter Berücksichtigung von allgemeinen Erfahrungswerten;
- die Streuung der für die Bemessung relevanten Parameter;
- die Ergebnisse aus großmaßstäblichen Messungen an Silos ähnlicher Bauweise;
- Korrelationen zwischen den Ergebnissen von unterschiedlichen Arten von Versuchen;
- während der Nutzungsdauer des Silos erkennbare Veränderungen in den Materialkennwerten.

(7) P Die Auswahl der charakteristischen Materialkennwerte hat auf der Grundlage von in Laboruntersuchungen bestimmten Werten unter Berücksichtigung von gründlich erworbenem Erfahrungswissen zu erfolgen.

(8) Der charakteristische Wert einer Materialeigenschaft sollte als eine vorsichtige Abschätzung des geeigneten, entweder des unteren oder oberen charakteristischen Wertes, in Abhängigkeit seines Einflusses auf die ermittelte Last, gewählt werden.

(9) Bezüglich der Interpretation der Versuchsergebnisse wird auf EN 1990 verwiesen.

ANMERKUNG Weiterer Hinweis auf Anhang D von EN 1990.

4.2.2 Ermittlung der Schüttgutkennwerte

(1) P Die für die Bemessung anzunehmenden Schüttgutkennwerte haben mögliche Streuungen infolge der Änderungen in der Zusammensetzung, Produktionsverfahren, Korngrößenverteilung, Feuchtigkeitsgehalt, Temperatur, Alter und elektrischer Aufladung während der Handhabung zu berücksichtigen.

(2) Die Schüttgutkennwerte sollten entweder nach der vereinfachten Vorgehensweise nach 4.2.3 oder durch Messungen in Versuchen nach 4.3 bestimmt werden.

(3) Bei Silos der Anforderungsklasse 3 sollten die Schüttgutkennwerte über Versuche nach 4.3 ermittelt werden.

(4) Für jedes Schüttgut können vereinfacht auch die Kennwerte von das „Allgemeine Schüttgut“ nach Tabelle E.1 verwendet werden.

(5) Die der Bemessung zugrunde gelegten Wandreibungsbeiwerte μ von Schüttgütern sollten die Rauheit der Wandoberflächen, an welchen sie entlang gleiten, berücksichtigt werden. In 4.2.1 sind unterschiedliche Klassen von Wandoberflächen definiert, wie sie in dieser Norm verwendet werden, und in der Tabelle 4.1 aufgelistet.

(6) Bei Silos mit Wandoberflächen der Klasse (Kategorie) D4 nach Tabelle 4.1 sollte der effektive Wandreibungskoeffizient nach dem in D.2 beschriebenen Vorgehen bestimmt werden.

(7) Der Schüttgutbeiwert C_{op} für die Teilflächenlasten sollte Tabelle E.1 entnommen werden oder nach Gleichung (4.8) berechnet werden.

DIN EN 1991-4:2010-12
EN 1991-4:2006 (D)

Tabelle 4.1 — Kategorien der Wandoberflächen

Kategorie	Wandoberfläche Erläuterung	Beispielhafte Materialien
D1	Geringe Reibung Klassifiziert als: „Sehr glatt“	Kaltgewalzter nichtrostender Stahl Polierter nichtrostender Stahl Beschichtete Oberfläche, Beschichtung ausgelegt für geringe Reibung Aluminium Stranggepresstes hochverdichtetes Polyethylen ^a
D2	Mäßige Reibung Klassifiziert als: „Glatt“	Karbonstahl mit leichtem Oberflächenrost (geschweißt oder geschraubt) Gewalzter nichtrostender Stahl Galvanisierter Kohlenstoffstahl Beschichtete Oberfläche, Beschichtung ausgelegt gegen Korrosion oder Abrieb
D3	Große Reibung Klassifiziert als: „Rau“	ausgeschalter Beton, schalungsgrauer Beton (Stahlschalung), alter Beton alter (korrodierter) Kohlenstoffstahl verschleißfester Stahl keramische Fliesen (Platten)
D4	Sonstige	Horizontal gewellte Wände Profilierte Bleche mit horizontalen Schlitzen Nicht standardisierte Wände mit tiefen Profilierungen
^a Bei diesen Oberflächen ist mit besonderer Sorgfalt der Effekt der Aufrauung durch in die Wandoberfläche eingedrückte Partikel zu betrachten.		

ANMERKUNG Die in Tabelle 4.1 angeführten Klassifizierungen und Erläuterungen bezieht sich auf die Reibung und weniger auf die Rauheit. Der maßgebliche Grund hierfür ist, dass nur eine geringe Korrelation zwischen dem Maß der Rauheit und der gemessenen Wandreibung infolge eines entlang der Wandoberfläche gleitenden Schüttgutes besteht.

4.2.3 Vereinfachte Vorgehensweise

(1) Die Kennwerte von allgemein bekannten Schüttgütern sollten der Tabelle E.1 entnommen werden. Die dort angegebenen Werte für die Wichte γ entsprechen dem oberen charakteristischen Wert, die Kennwerte für die Wandreibung μ_m , für das Horizontallastverhältnis K_m und für den Winkel der inneren Reibung ϕ_m stellen Mittelwerte dieser Kenngrößen dar.

(2) Können einzelne Schüttgüter nicht eindeutig den in Tabelle E.1 aufgelisteten Schüttgütern zugeordnet werden, sollten deren Kennwerte nach den in 4.3 beschriebenen Verfahren experimentell bestimmt werden.

(3) Zur Ermittlung der charakteristischen Kennwerte von μ , K und ϕ sollten die aufgelisteten Werte von μ_m , K_m und ϕ_m mit so genannten Konversions- oder Umrechnungsfaktoren multipliziert bzw. dividiert werden. Die Umrechnungsfaktoren a sind in der Tabelle E.1 für die dort gelisteten Schüttgüter angegeben. Bei der Berechnung der maximalen Lasten sollten die folgenden Kombinationen verwendet werden:

$$\text{oberer charakteristischer Wert von } K = a_K K_m \quad (4.1)$$

$$\text{unterer charakteristischer Wert von } K = K_m / a_K \quad (4.2)$$

$$\text{oberer charakteristischer Wert von } \mu = a_\mu \mu_m \quad (4.3)$$

$$\text{unterer charakteristischer Wert von } \mu = \mu_m / a_\mu \quad (4.4)$$

$$\text{oberer charakteristischer Wert von } \phi = a_\phi \phi_m \quad (4.5)$$

$$\text{unterer charakteristischer Wert von } \phi = \phi_m / a_\phi \quad (4.6)$$

(4) Bei der Ermittlung der Einwirkungen auf Silos der Anforderungsklasse 1 können anstatt der oberen und unteren charakteristischen Werte die Mittelwerte μ_m , K_m und ϕ_m verwendet werden.

4.3 Messung der Schüttgutkennwerte in Versuchen

4.3.1 Experimentelle Ermittlung (Messverfahren)

(1) Die experimentelle Ermittlung der Kennwerte sollte mit repräsentativen Schüttgutproben durchgeführt werden. Für jede Schüttguteigenschaft ist ein Mittelwert des betreffenden Kennwertes unter Berücksichtigung der Streuung ihrer maßgeblichen so genannten sekundären Einflussparameter, wie Schüttgutzusammensetzung, Siebkurve, Feuchtigkeitsgehalt, Temperatur, Alter und die Möglichkeit einer elektrischen Aufladung während des Betriebs oder der Herstellung zu bestimmen.

(2) Die charakteristischen Werte werden aus den experimentell ermittelten Mittelwerten unter Zuhilfenahme der Gleichungen (4.1) bis (4.6) und den entsprechenden Umrechnungsfaktoren a abgeleitet.

(3) Jeder Umrechnungsfaktor a sollte sorgfältig bestimmt werden. Dabei ist in geeigneter Weise Rechnung zu tragen, dass sich die Schüttgutkennwerte während der Nutzungsdauer des Silos verändern können. Ebenso sind die möglichen Auswirkungen von Entmischungerscheinungen im Silo und die Ungenauigkeiten bei der Aufbereitung der Materialproben zu berücksichtigen.

(4) Liegen ausreichend Versuchsdaten vor, um die Standardabweichung der Kennwerte zu bestimmen, sollten die Umrechnungsfaktoren a nach C.11 ermittelt werden.

(5) Die Spanne zwischen dem Mittelwert und dem charakteristischen Wert der Schüttgutkennwerte drückt sich durch den Umrechnungsfaktor a aus. Wenn ein sekundärer Einflussparameter für sich allein für mehr als 75 % des Umrechnungsfaktors a verantwortlich ist, sollte dieser um den Faktor 1,10 erhöht werden.

ANMERKUNG Durch die oben angeführten Festlegungen sollte sichergestellt werden, dass die Werte von a eine angemessene Auftretenswahrscheinlichkeit der abgeleiteten Lasten repräsentieren.

4.3.2 Schüttgutwichte γ

(1) Die Schüttgutwichte γ sollte für eine Packungsdichte der Schüttgutpartikel und bei einem Druckniveau bestimmt werden, die der Packungsdichte bzw. dem Druckniveau im Bereich des maximalen vertikalen Fülldrucks p_{vft} entspricht. Der Vertikaldruck p_{vft} im Silo kann aus den Gleichungen (5.3) oder (5.79) für die Schüttguttiefe am unteren Ende des Bereiches mit vertikalen Wänden bestimmt werden.

(2) Zur Messung der Schüttgutwichte γ sollten die Prüfverfahren nach C.6 verwendet werden.

(3) Der Umrechnungsfaktor zur Ableitung des charakteristischen Wertes aus dem gemessenen Wert sollte nach dem in C.11 beschriebenen Vorgehen bestimmt werden. Der Umrechnungsfaktor a_γ sollte nicht kleiner als $a_\gamma = 1,10$ angenommen werden, außer, wenn ein kleinerer Wert durch Versuche und durch eine geeignete Abschätzung gesondert nachgewiesen werden kann (siehe C.11).

4.3.3 Wandreibungskoeffizient μ

(1) Die experimentelle Bestimmung des Wandreibungskoeffizienten μ für die Ermittlung der Lasten sollte für eine Packungsdichte der Schüttgutpartikel und bei einem Druckniveau bestimmt werden, die der Packungsdichte bzw. dem Druckniveau im Bereich des maximalen horizontalen Fülldruckes p_{hfb} entspricht. Das Druckniveau p_{hfb} im Silo kann aus den Gleichungen (5.1) oder (5.71) für die Schüttguttiefe am unteren Ende des Bereiches mit vertikalen Wänden bestimmt werden.

(2) Zur Messung des Wandreibungskoeffizienten μ sollten die Prüfverfahren nach C.7 verwendet werden.

(3) Der Mittelwert μ_m des Wandreibungskoeffizienten und seine Standardabweichung sollte aus Versuchen bestimmt und abgeleitet werden. Wenn aus dem Datenmaterial nur ein Mittelwert ermittelt werden kann, sollte die Standardabweichung nach dem in C.11 beschriebenen Vorgehen geschätzt werden.

DIN EN 1991-4:2010-12
EN 1991-4:2006 (D)

(4) Der Umrechnungsfaktor zur Ableitung des charakteristischen Wertes aus dem gemessenen Wert sollte nach dem in C.11 beschriebenen Vorgehen bestimmt werden. Der Umrechnungsfaktor sollte nicht kleiner als $a_{\mu} = 1,10$ angenommen werden, außer wenn ein kleinerer Wert durch Versuche und durch eine geeignete Abschätzung gesondert nachgewiesen werden kann (siehe C.11).

4.3.4 Winkel der inneren Reibung ϕ_i

(1) Der Winkel der inneren Reibung ϕ_i für die Berechnung der Lasten — als Arcustangens aus dem Verhältnis von Scherkraft und Normalkraft beim Bruch unter Erstbelastung — sollte für eine Packungsdichte der Schüttgutpartikel und bei einem Druckniveau bestimmt werden, die der Packungsdichte und dem Druckniveau im Bereich des maximalen vertikalen Fülldruckes p_{vf} entspricht. Das Druckniveau p_{vf} kann aus den Gleichungen (5.3) oder (5.79) für die Schüttguttiefe am unteren Ende des Bereiches mit vertikalen Wänden bestimmt werden.

(2) Zur Messung des Winkels der inneren Reibung ϕ_i sollten die Prüfverfahren nach C.9 verwendet werden.

(3) Der Mittelwert ϕ_{im} des Winkels der inneren Reibung und seine Standardabweichung δ sollte aus Versuchen bestimmt und abgeleitet werden. Wenn aus dem Datenmaterial nur ein Mittelwert ermittelt werden kann, sollte die Standardabweichung nach dem in C.11 beschriebenen Vorgehen abgeschätzt werden.

(4) Der Umrechnungsfaktor zur Ableitung des charakteristischen Wertes aus dem gemessenen Wert sollte nach dem in C.11 beschriebenen Vorgehen bestimmt werden. Der Umrechnungsfaktor a_{ϕ} sollte nicht kleiner als $a_{\phi} = 1,10$ angenommen werden, außer wenn ein kleinerer Wert durch Versuche und durch die geeignete Abschätzung gesondert nachgewiesen werden kann (siehe C.11).

4.3.5 Horizontalverhältnis K

(1) Das Horizontallastverhältnis K für die Ermittlung der Lasten (Verhältnis von mittlerem Horizontaldruck zu mittlerem Vertikaldruck) sollte für eine Packungsdichte der Schüttgutpartikel und bei einem Druckniveau bestimmt werden, die der Packungsdichte und dem Druckniveau im Bereich des maximalen vertikalen Fülldruckes entspricht. Das Druckniveau p_{vf} kann aus den Gleichungen (5.3) oder (5.79) für die Schüttguttiefe am unteren Ende des Bereiches mit vertikalen Wänden bestimmt werden.

(2) Zur Ermittlung des Horizontallastverhältnisses K sollten die Prüfverfahren nach C.8 verwendet werden.

(3) Der Mittelwert K_m des Horizontallastverhältnisses und seine Standardabweichung sollte aus Versuchen zu bestimmt und abgeleitet werden. Wenn aus dem Datenmaterial nur ein Mittelwert ermittelt werden kann, sollte die Standardabweichung nach dem in C.11 beschriebenen Vorgehen abgeschätzt werden.

(4) Ein Näherungswert für K_m darf alternativ auch aus dem Mittelwert des über Versuche ermittelten Winkels der inneren Reibung bei Erstbelastung ϕ_{im} (siehe 4.3.4) nach Gleichung (4.7) ermittelt werden:

$$K_m = 1,1 (1 - \sin \phi_{im}) \quad (4.7)$$

ANMERKUNG Der Faktor 1,1 in Gleichung (4.7) wird verwendet, um ein angemessenes Vorhaltemaß zur Berücksichtigung des Unterschiedes zwischen einem unter nahezu keinen Wandreibungseinflüssen gemessenen Wert von K ($= K_0$) und einem unter Vorliegen von Wandreibungseinflüssen gemessenen Wert von K (siehe auch 4.2.2 (5)) sicherzustellen.

(5) Der Umrechnungsfaktor zur Ableitung des charakteristischen Wertes aus dem gemessenen Wert sollte nach dem in C.11 beschriebenen Vorgehen bestimmt werden. Der Umrechnungsfaktor a_K sollte nicht kleiner als $a_K = 1,10$ angenommen werden, außer wenn ein kleinerer Wert durch Versuche und durch eine geeignete Abschätzung gesondert nachgewiesen werden kann (siehe C.11).

4.3.6 Kohäsion c

(1) Die Kohäsion von Schüttgütern variiert mit der Konsolidierungsspannung, mit der die Probe beaufschlagt wurde. Sie sollte für eine Packungsdichte der Schüttgutpartikel und bei einem Druckniveau bestimmt werden, die der Packungsdichte und dem Druckniveau im Bereich des maximalen vertikalen Fülldruckes entspricht. Das Druckniveau p_{vf} kann aus den Gleichungen (5.3) oder (5.79) für die Schüttguttiefe am unteren Ende des Bereiches mit vertikalen Wänden bestimmt werden.

(2) Zur Messung der Kohäsion c sollten die Prüfverfahren nach C.9 verwendet werden.

ANMERKUNG Alternativ darf die Kohäsion c über Ergebnisse von Versuchen in der Jenike-Scherzelle ermittelt werden. Eine Methode zur Berechnung der Kohäsion aus den Versuchsergebnissen ist C.9 zu entnehmen.

4.3.7 Schüttgutbeiwert für die Teilflächenlast C_{op}

(1)P Der Schüttgutbeiwert für die Teilflächenlast C_{op} ist auf der Grundlage von geeigneten Versuchsdaten zu ermitteln.

ANMERKUNG 1 Die Entleerungsfaktoren C berücksichtigen eine Reihe von Phänomenen die beim Entleeren von Silos auftreten. Die symmetrische Zunahme der Drücke ist relativ unabhängig vom gelagerten Schüttgut, die unsymmetrischen Komponenten sind jedoch stark vom Material abhängig. Die Materialabhängigkeit der unsymmetrischen Komponente wird durch den Schüttgutbeiwert C_{op} repräsentiert. Dieser Parameter ist mit Hilfe von experimentellen Prüfverfahren an Schüttgütern nicht leicht zu bestimmen.

ANMERKUNG 2 Ein geeignetes experimentelles Prüfverfahren für den Parameter C_{op} ist bisher noch nicht entwickelt. Dieser Faktor basiert daher auf Auswertungen von Versuchen an Silos und auf Erfahrungswerten an Silos mit konventionellen Füll- und Entleerungssystemen, die innerhalb üblicher Bautoleranzen errichtet wurden.

(2) Werte für den Schüttgutbeiwert für die Teilflächenlast C_{op} für allgemein bekannte Schüttgüter sollten Tabelle E.1 entnommen werden.

(3) Für Schüttgüter, die nicht in Tabelle E.1 aufgeführt sind, darf der Schüttgutbeiwert für die Teilflächenlast aus den Streufaktoren für das Horizontallastverhältnis a_K und des Wandreibungsbeiwertes a_μ nach der Gleichung (4.8) abgeschätzt werden:

$$C_{op} = 3,5 a_\mu + 2,5 a_K - 6,2 \quad (4.8)$$

Dabei ist

a_μ der Streufaktor des Wandreibungskoeffizienten μ ,

a_K der Streufaktor für das Horizontallastverhältnis K des Schüttgutes.

(4) Für spezielle Silos oder spezielle Schüttgüter (im Einzelfall) dürfen geeignete Schüttgutbeiwerte für die Teilflächenlast C_{op} über großmaßstäbliche experimentelle Untersuchungen in Silos mit vergleichbarer Bauart ermittelt werden.

5 Lasten auf vertikale Silowände

5.1 Allgemeines

(1)P Für die Lastfälle Füllen und Entleeren sind die in diesem Abschnitt beschriebenen charakteristischen Werte der Lasten anzusetzen. Dabei wird unterschieden zwischen Lasten auf:

- schlanke Silos;
- Silos mit mittlerer Schlankheit;
- niedrige Silos;
- Stützwandsilos;
- Silos für die Lagerung von Schüttgütern mit zwischen den Schüttgutpartikeln eingeschlossener Luft.

DIN EN 1991-4:2010-12
EN 1991-4:2006 (D)

(2)P Die Lasten auf die vertikalen Silowände sind entsprechend der folgenden Kriterien der Schlankheit des Silos, siehe Bilder 1.1a) und 5.1, zu bestimmen:

- schlanke Silos, mit $2,0 \leq h_c/d_c$ (mit Ausnahmen nach 3.3);
- Silos mit mittlerer Schlankheit, mit $1,0 < h_c/d_c < 2,0$ (mit Ausnahmen nach 3.3);
- niedrige Silos, mit $0,4 < h_c/d_c \leq 1,0$ (mit Ausnahmen nach 3.3);
- Stützwandsilos (Silos bestehend aus Stützwänden) mit waagrechttem Boden und $h_c/d_c \leq 0,4$;

(3) Ein Silo mit einem belüfteten Boden sollte unabhängig von seiner tatsächlichen Schlankheit h_c/d_c wie ein schlanker Silo behandelt werden.

(4)P Die Lasten auf die vertikalen Wände setzen sich aus einem ortsfesten Lastanteil, den symmetrischen Lasten, und einem freien Lastanteil, den Teilflächenlasten, zusammen. Beide Anteile sind als gleichzeitig wirkend anzusetzen.

(5) Ausführliche Regeln zur Berechnung der Füll- und Entleerungslasten sind in Abhängigkeit von der Siloschlankheit in 5.2, 5.3 und 5.4 angegeben.

(6) Regeln für zusätzliche Lastfälle sollten für spezielle Silotypen wie folgt berücksichtigt werden:

- Silos mit Lufteinblasvorrichtungen zum vollen oder teilweisen Fluidisieren des Schüttgutes, siehe 5.5;
- Silos bei denen eine Temperaturdifferenz zwischen eingelagerten Schüttgütern und der Silokonstruktion auftreten können, siehe in 5.6;
- Silos mit rechteckigem Grundriss, siehe 5.7.

(7) Beim Auftreten größerer Exzentrizitäten der Schüttgutlagerung während des Füllens oder Entleerens, sind besondere Lastfälle anzusetzen. Diese dürfen nicht gleichzeitig mit den symmetrischen bzw. den Teilflächenlasten wirken, sondern müssen einen eigenen getrennten Lastfall darstellen.

(8) Wenn ein Schlotfluss innerhalb des Schüttgutes ohne Kontaktbereiche zwischen Fließzone und Silowand sichergestellt werden kann (siehe 3.3 (3)), kann sich die Bemessung auf den Ansatz der Fülllasten beschränken, wobei erforderlichenfalls die Teilflächenlasten mit zu berücksichtigen sind.

5.2 Schlanke Silos

5.2.1 Fülllasten auf vertikale Silowände

5.2.1.1 Symmetrische Fülllasten

(1) Die symmetrischen Fülllasten (siehe Bild 5.1) sollten nach den Gleichungen (5.1) bis (5.6) berechnet werden.

(2) Nach dem Füllen und während der Schüttgutlagerung sollten die Horizontallasten p_{hf} , die Wandreibungslasten p_{wf} und die Vertikallasten p_{vf} wie folgt angenommen werden:

$$p_{hf}(z) = p_{ho} Y_J(z) \quad (5.1)$$

$$p_{wf}(z) = \mu p_{ho} Y_J(z) \quad (5.2)$$

$$p_{vf}(z) = p_{ho}/K Y_J(z) \quad (5.3)$$

mit:

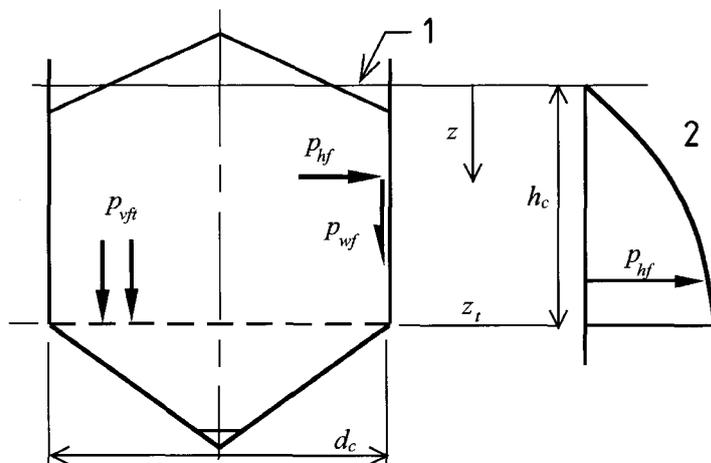
$$p_{ho} = \gamma K z_o \quad (5.4)$$

$$z_o = \frac{1}{K\mu} \frac{A}{U} \quad (5.5)$$

$$Y_J(z) = 1 - e^{-z/z_o} \quad (5.6)$$

Dabei ist

- γ der charakteristische Wert der Schüttgutwichte;
- μ der charakteristische Wert des Wandreibungskoeffizienten für das Schüttgut an der vertikalen Silowand;
- K der charakteristische Wert des Horizontallastverhältnisses;
- z die Siloguttiefe unterhalb der äquivalenten Schüttgutoberfläche des Schüttgutes;
- A die innere Querschnittsfläche des Silos;
- U der Umfang der inneren Querschnittsfläche des Silos.

**Legende**

- 1 äquivalente Schüttgutoberfläche
- 2 Druckverteilung im Abschnitt mit vertikalen Wänden

Bild 5.1 — Symmetrische Fülllasten im Bereich der vertikalen Silowände

(3) Für den Zustand nach dem Füllen errechnet sich der resultierende charakteristische Wert der vertikalen Wandschnittkräfte (Druck) n_{zSk} — mit der Einheit Kraft je Längeneinheit in Umfangsrichtung der Wand aus:

$$n_{zSk} = \int_0^z p_{wf}(z) dz = \mu p_{ho} [z - z_o Y_J(z)] \quad (5.7)$$

ANMERKUNG Die über Gleichung (5.7) definierte resultierende Kraft ist ein charakteristischer Wert. Es ist bei der Anwendung dieser Gleichung darauf zu achten, dass der entsprechende Teilsicherheitsbeiwert für Einwirkungen nicht vergessen wird. Dieser Hinweis ist deshalb zu beachten, weil diese Gleichung bereits als ein Ergebnis einer statischen Berechnung (unter Verwendung der Schalenmembrantheorie) zu werten ist. Die Gleichung ist in dieser Norm angeführt, um den Tragwerksplaner bei der Integration der Gleichung (5.2) zu unterstützen. Es wird zudem darauf hingewiesen, dass auch andere Lasten (z. B. die Teilflächenlasten) zusätzliche Vertikalkräfte in der Wand hervorrufen können.

DIN EN 1991-4:2010-12
EN 1991-4:2006 (D)

(4) Zur Bestimmung der charakteristischen Werte für die erforderlichen Schüttgutkennwerte (Wichte γ , Wandreibungsbeiwert μ und Horizontallastverhältnis K) sollten die unter 4.2 und 4.3 beschriebenen Verfahren angewendet werden.

5.2.1.2 Teilflächenlast für den Lastfall Füllen: allgemeine Erfordernisse

(1)P Um die unplanmäßigen unsymmetrischen Lasten infolge von Exzentrizitäten und Imperfektionen beim Befüllen der Silos zu berücksichtigen, sind für den Lastfall Füllen Teilflächenlasten oder andere geeignete Lastansätze anzusetzen.

(2) Bei Silos der Anforderungsklasse 1 kann die Teilflächenlast für den Lastfall Füllen vernachlässigt werden.

(3) Bei Silos zur Lagerung von staubförmigen Schüttgütern, die unter Zuhilfenahme von Luftenblasvorrichtungen befüllt werden, kann auf den Ansatz der Teilflächenlasten für den Lastfall Füllen verzichtet werden.

(4) Der Betrag der für den Lastfall Füllen anzusetzenden Teilflächenlast p_{pf} sollte unter Zugrundelegung der maximal möglichen Exzentrizität e_f des sich einstellenden Aufschüttkegels an der Schüttgutoberfläche ermittelt werden (siehe Bild 1.1b)).

(5) Der Grundwert der Teilflächenlast für den Lastfall Füllen p_{pf} sollte angesetzt werden mit:

$$p_{pf} = C_{pf} \rho_{hf} \quad (5.8)$$

mit:

$$C_{pf} = 0,21 C_{op} [1+2E^2] (1 - e^{\{-1,5 [(h_c/d_c) - 1]\}}) \quad (5.9)$$

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

Wenn jedoch Gleichung (5.9) einen negativen Wert ergibt, sollte C_{pf} angesetzt werden zu

$$C_{pf} = 0 \quad (5.11)$$

Dabei ist

e_f die maximale Exzentrizität des sich beim Befüllen an der Schüttgutoberfläche einstellenden Aufschüttkegels (siehe Bild 1.1b));

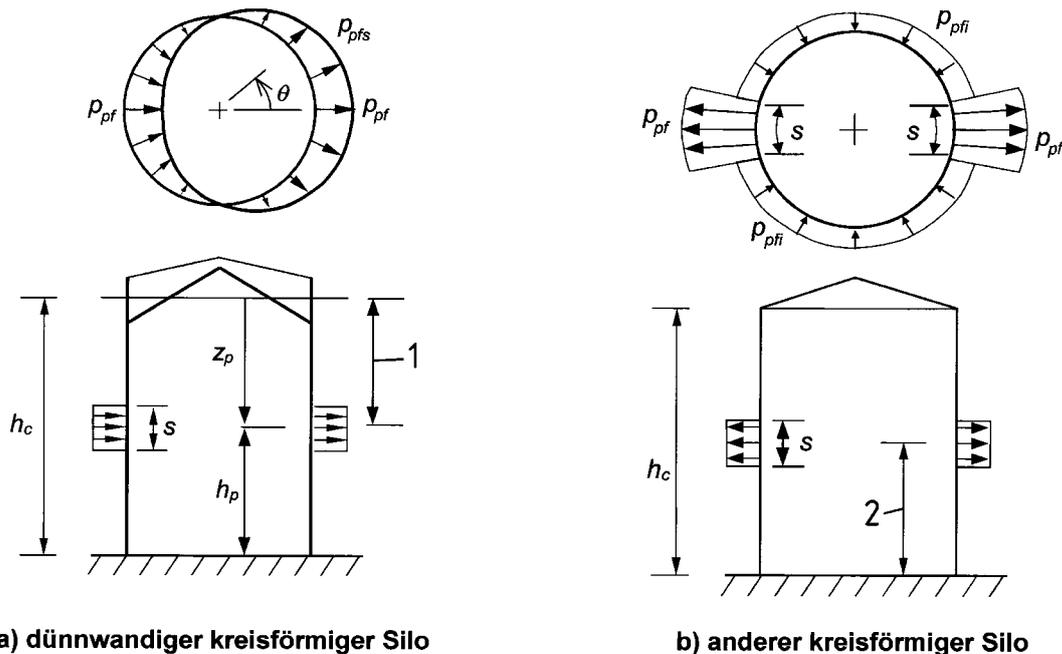
ρ_{hf} der lokale Wert des horizontalen Fülldruckes nach Gleichung (5.1) an der Stelle, an der die Teilflächenlast angesetzt wird;

C_{op} der Schüttgutbeiwert für die Teilflächenlast (siehe Tabelle E.1).

(6) Die Höhe des Bereiches, auf den die Teilflächenlast angesetzt werden sollte (siehe Bild 5.2), beträgt:

$$s = \pi d_c / 16 \cong 0,2 d_c \quad (5.12)$$

(7) Die Teilflächenlast besteht nur aus einem horizontal wirkenden Lastanteil. Es sollten keine Reibungskräfte infolge dieser horizontalen Lastkomponente berücksichtigt werden.



a) dünnwandiger kreisförmiger Silo

b) anderer kreisförmiger Silo

Legende

- 1 kleinerer Wert von z_ρ und $h_c/2$ bei geschweißten Silos der Anforderungsklasse 2 bzw. beliebig bei anderen dünnwandigen Silos der Anforderungsklassen 2 und 3
- 2 beliebig

Bild 5.2 — Längs- und Querschnitt mit Darstellung der Lastbilder der Teilflächenlasten

(8) Die Form der Teilflächenlast für den Lastfall Füllen hängt von der Konstruktionsform des Silos ab. Es sollte hinsichtlich der anzusetzenden Teilflächenlasten zwischen folgenden Konstruktionsformen von Silos unterschieden werden:

- dickwandige Silos mit kreisförmigem Querschnitt, siehe 5.2.1.3 (Stahlbetonsilos);
- dünnwandige Silos mit kreisförmigem Querschnitt, siehe 5.2.1.4 (Metallsilos);
- Silos mit nicht kreisförmigem Querschnitt, siehe 5.2.1.5.

5.2.1.3 Teilflächenlast für den Lastfall Füllen: dickwandige kreisförmige Silos

(1) Bei dickwandigen kreisförmigen Silos sollte der Grundwert der Teilflächenlast für den Lastfall Füllen p_{pf} auf einer quadratischen Teilfläche mit der Seitenlänge s (siehe Gleichung (5.12)) an entgegengesetzten Seiten nach außen wirkend angesetzt werden. Das Maß für die Seitenlänge s ist in geeigneter Weise auf die gekrümmte Fläche zu beziehen (siehe Bild 5.2b)).

(2) Zusätzlich zur nach außen wirkenden Teilflächenlast p_{pf} sollte im verbleibenden Bereich des Siloumfanges über die gleiche Wandhöhe (siehe Bild 5.2b)) eine nach innen gerichtete komplementäre Teilflächenlast p_{pfi} angesetzt werden, mit:

$$p_{pfi} = p_{pf} / 7 \quad (5.13)$$

Dabei ist

p_{pf} der Grundwert der nach außen wirkenden Teilflächenlast für den Lastfall Füllen nach Gleichung (5.8).

ANMERKUNG Der Betrag und die Wirkungsfläche der nach innen gerichteten Last p_{pfi} ist so gewählt, dass sich die Resultierenden der beiden Lastanteile an der Stelle, an der diese anzusetzen sind, sich im Mittel aufheben.

DIN EN 1991-4:2010-12
EN 1991-4:2006 (D)

(3) Die Teilflächenlast für den Lastfall Füllen sollte an jeder beliebigen Stelle der Silowand angesetzt werden. Dies kann aber in der unter 5.2.1.3 (4) beschriebenen Weise ausgelegt werden.

(4) In dickwandigen kreisförmigen Silos der Anforderungsklasse 2 darf ein vereinfachter Nachweis geführt werden. Als die ungünstige Stelle für den Ansatz der Teilflächenlast darf die halbe Höhe des vertikalen Zellschafts angesehen werden. Die größte prozentuale Erhöhung der Spannungen als Ergebnis aus einem Ansatz der Teilflächenlast an dieser Stelle kann auf die anderen Wandbereiche übertragen werden, indem diese mit dem Verhältniswert zwischen horizontalem Fülldruck an der betrachteten Stelle und dem horizontalen Fülldruck an der Ansatzstelle der Teilflächenlast multipliziert werden.

5.2.1.4 Teilflächenlast für den Lastfall Füllen: dünnwandige kreisförmige Silos

(1) Bei dünnwandigen kreisförmigen Silos ($d_c/t > 200$) der Anforderungsklassen 2 und 3 sollte die Teilflächenlast für den Lastfall Füllen über die Höhe s nach Gleichung (5.12) angesetzt werden. Sie geht von einem an einer Stelle nach außen wirkenden Maximaldruck mit dem Betrag p_{pf} in einen maximalen nach innen wirkenden Druck gleichen Betrags p_{pf} auf der gegenüberliegenden Seite über (siehe Bild 5.2a)). Der Verlauf in Umfangsrichtung sollte wie folgt angesetzt werden:

$$p_{pfs} = p_{pf} \cos \theta \quad (5.14)$$

Dabei ist

p_{pf} die nach außen wirkende Teilflächenlast nach Gleichung (5.8);

θ die Winkelkoordinate in Umfangsrichtung (siehe Bild 5.2a)).

(2) Die aus der Teilflächenlast des Lastfalls Füllen resultierende Horizontallast F_{pf} sollte bei dünnwandigen kreisförmigen Silos nach Gleichung (5.15) berechnet werden:

$$F_{pf} = \frac{\pi}{2} s d_c p_{pf} \quad (5.15)$$

(3) Bei Wellblechsilos der Anforderungsklasse 2 darf die Teilflächenlast als in einer Tiefe z_p unterhalb der Schüttgutoberfläche wirkend angesetzt werden. Für z_p ist der kleinere der folgenden Werte anzusetzen:

$$z_p = z_o \quad \text{und} \quad z_p = 0,5 h_c \quad (5.16)$$

Dabei ist

h_c die Höhe des vertikalen Siloschaftes (siehe Bild 1.1a)).

(4) Bei Silos mit Bolzen- und Schraubenverbindungen der Anforderungsklasse 2 sollte die Teilflächenlast an jeder beliebigen Stelle wirkend angesetzt werden. Die Größe der senkrecht auf die Silowand entlang der gesamten Silohöhe wirkenden Last darf vereinfachend über eine einheitliche prozentuale Lasterhöhung ermittelt werden.

5.2.1.5 Teilflächenlast für den Lastfall Füllen: nicht kreisförmige Silos

(1) Bei nicht kreisförmigen Silos der Anwendungsklassen 2 und 3 dürfen die Teilflächenlasten des Lastfalls Füllen durch eine Erhöhung der symmetrischen Lasten nach (2) und (3) berücksichtigt werden.

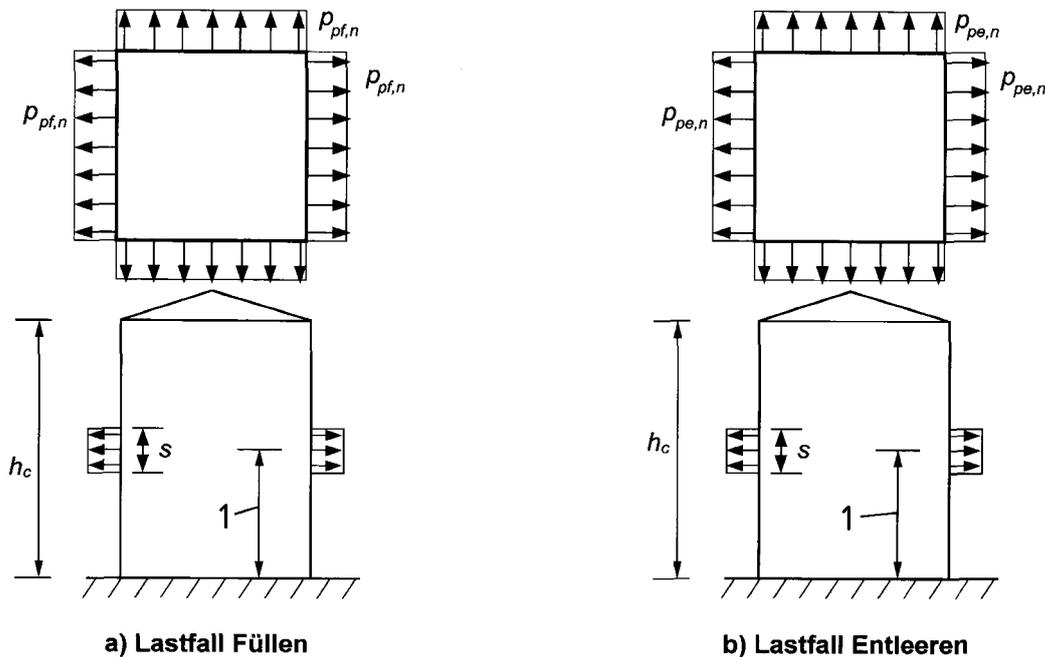
(2) Die nach außen gerichtete Teilflächenlast sollte an jeder Stelle und Tiefe im Silo über eine Höhe s (nach Gleichung (5.12)) wirkend angesetzt werden (siehe Bild 5.3a)).

(3) Der Betrag der gleichmäßigen Teilflächenlast $p_{pf,nc}$ sollte mit

$$p_{pf,nc} = 0,36 p_{pf} \quad (5.17)$$

angesetzt werden, wobei p_{pf} der Grundwert der Teilflächenlast des Lastfalls Füllen nach Gleichung (5.8) darstellt. Eine geeignete Abschätzung für d_c darf aus Bild 1.1d) abgeleitet werden.

ANMERKUNG Der Wert und der Umfang der gleichmäßigen Last $p_{hf,nc}$ ist so gewählt, dass die resultierenden Biegemomente bei einem Silo mit rechteckigem Siloquerschnitt ohne innere Zuglieder näherungsweise die gleichen Größenordnungen annehmen, wie sich diese beim Ansatz einer lokalen Teilflächenlast p_{pf} in der Mitte der Wand ergeben würden.



Legende

1 beliebig

Bild 5.3 — Längs- und Querschnitt mit Darstellung der Lastbilder der Teilflächenlasten für nicht kreisförmige Silos

5.2.2 Entleerungslasten auf vertikale Wände

5.2.2.1 Symmetrische Entleerungslasten

(1)P Zur Berücksichtigung von möglichen vorübergehenden Zunahmen der Lasten während der Entleerungsvorgänge ist im Lastfall Entleeren eine Erhöhung der symmetrischen Lastanteile anzusetzen.

(2) Bei Silos aller Anforderungsklassen sollten die symmetrischen Entleerungslasten p_{he} und p_{we} bestimmt werden aus:

$$p_{he} = C_h p_{hf} \quad (5.18)$$

$$p_{we} = C_w p_{wf} \quad (5.19)$$

Dabei ist

C_h der Entleerungsfaktor für Horizontallasten;

C_w der Entleerungsfaktor für die Wandreibungslasten.

DIN EN 1991-4:2010-12
EN 1991-4:2006 (D)

Die Entleerungsfaktoren C_h and C_w sollten je nach vorliegendem Fall aus den Gleichungen (5.20) bis (5.24) ermittelt werden.

(3) Bei Silos aller Anforderungsklassen, die von der Schüttgutoberfläche aus entleert werden (und somit kein Fließen innerhalb des gespeicherten Schüttgutes aufweisen), dürfen die Werte von C_h und C_w zu

$$C_h = C_w = 1,0 \quad (5.20)$$

angenommen werden.

(4) Bei schlanken Silos der Anforderungsklassen 2 und 3 sollten die Entleerungsfaktoren mit

$$C_h = C_o = 1,15 \quad (5.21)$$

$$C_w = 1,1 \quad (5.22)$$

angesetzt werden.

Dabei ist

C_o der Entleerungsfaktor für Schüttgüter.

(5) Bei schlanken Silos der Anforderungsklasse 1, bei denen die Mittelwerte der Schüttgutkennwerte K und μ zur Lastermittlung verwendet werden, sollten als Entleerungsfaktoren folgende Werte angenommen werden:

$$C_h = 1,15 + 1,5 (1 + 0,4 e/d_c) C_{op} \quad (5.23)$$

$$C_w = 1,4 (1 + 0,4 e/d_c) \quad (5.24)$$

$$e = \max(e_f, e_o) \quad (5.25)$$

Dabei ist

e_f die maximale Exzentrizität des sich beim Befüllen an der Schüttgutoberfläche einstellenden Aufschüttkegels;

e_o die Exzentrizität des Mittelpunktes der Auslauföffnung;

C_{op} der Schüttgutbeiwert für die Teilflächenlast (siehe Tabelle E.1).

(6) Für den Lastfall Entleeren errechnet sich der resultierende charakteristische Wert der vertikalen Wandschnittkräfte n_{zSk} — mit der Einheit Kraft je Längeneinheit in Umfangsrichtung der Wand — aus:

$$n_{zSk} = \int_0^z p_{we}(z) dz = C_w \mu \rho_{ho} [z - z_o Y_J(z)] \quad (5.26)$$

ANMERKUNG Die über Gleichung (5.26) definierte resultierende Kraft ist ein charakteristischer Wert. Es sollte bei der Anwendung dieser Gleichung darauf geachtet werden, dass der entsprechende Teilsicherheitsbeiwert für Einwirkungen nicht vergessen wird. Dieser Hinweis ist deshalb zu beachten, weil diese Gleichung bereits als ein Ergebnis einer statischen Berechnung (unter Verwendung der Schalenmembrantheorie) zu werten ist. Die Gleichung ist in dieser Norm angeführt, um den Tragwerksplaner bei der Integration der Gleichung (5.19) zu unterstützen. Es wird zudem darauf hingewiesen, dass auch andere Lasten (z. B. die Teilflächenlasten) zusätzliche Vertikalkräfte in der Wand hervorrufen können.

5.2.2.2 Teilflächenlast für den Lastfall Entleeren: allgemeine Anforderungen

(1)P Teilflächenlasten für den Lastfall Entleeren sind anzusetzen, um sowohl die unplanmäßigen unsymmetrischen Lasten beim Entleeren der Silos, als auch die Exzentrizitäten beim Befüllen und Entleeren zu berücksichtigen (siehe Bild 1.1b)).

(2) Bei Silos der Anforderungsklasse 1 darf die Teilflächenlast für den Lastfall Entleeren vernachlässigt werden.

(3) Bei Silos der Anforderungsklassen 2 und 3 sollten zur Abschätzung der Entleerungslasten die Verfahren dieses Abschnittes angewendet werden.

(4) Bei Silos der Anforderungsklassen 2 und 3 sollten zusätzlich zu den Verfahren dieses Abschnittes die Lastansätze bei schlanken Silos (5.2.4) mit großen Entleerungsexzentrizitäten (siehe 5.1 (5)) als ein separater Lastfall angewendet werden, wenn eine der folgenden Bedingungen zutrifft:

- die Exzentrizität der Auslauföffnung e_o ist größer als der kritische Wert $e_{o,cr} = 0,25d_c$ (siehe Bild 3.3c);
- die maximale Exzentrizität beim Füllen e_f ist größer als der kritische Wert $e_{f,cr} = 0,25d_c$ und die Siloschlankheit ist größer als der Grenzwert $(h_c/d_c)_{lim} = 4,0$ (siehe Bild 3.4d).

(5) Der Grundwert der nach außen wirkenden Teilflächenlast für den Lastfall Entleeren p_{pe} sollte angewendet werden mit:

$$p_{pe} = C_{pe} p_{he} \quad (5.27)$$

wobei für $h_c/d_c > 1,2$, C_{pe} nach Gleichung (5.28) gilt.

$$C_{pe} = 0,42 C_{op} [1 + 2E^2] (1 - \exp\{-1,5 [(h_c/d_c) - 1]\}) \quad (5.28)$$

Für $h_c/d_c \leq 1,2$ gilt der größte nach den Gleichungen (5.28), (5.29) oder (5.30) ermittelte Wert.

$$C_{pe} \geq 0,272 C_{op} \{(h_c/d_c - 1 + E)\} \quad (5.29)$$

$$C_{pe} = 0 \quad (5.30)$$

mit

$$E = 2 e / d_c \quad (5.31)$$

und

$$e = \max(e_f, e_o) \quad (5.32)$$

Dabei ist

e_f die maximale Exzentrizität des sich während des Befüllens an der Schüttgutoberfläche einstellenden Aufschüttkegels (siehe Bild 1.1b));

e_o die Exzentrizität des Mittelpunktes der Auslauföffnung;

p_{he} der lokale Wert des horizontalen Entleerungsdruckes nach Gleichung (5.18) an der Stelle, an der die Teilflächenlast angesetzt wird;

C_{op} der Schüttgutbeiwert für die Teilflächenlast (siehe Tabelle E.1).

(6) Die Teilflächenlast für den Lastfall Entleeren besteht nur aus einem horizontal wirkenden Lastanteil. Zusätzliche Reibungskräfte infolge dieser horizontalen Lastkomponente sollten nicht berücksichtigt werden.

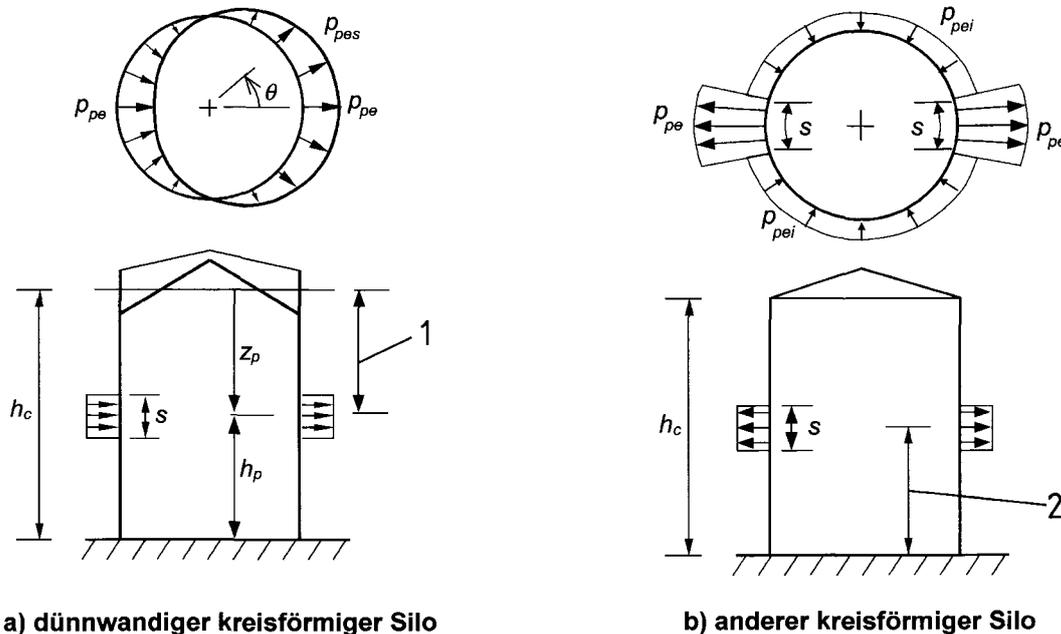
(7) Die Form der Teilflächenlast für den Lastfall Entleeren hängt von der Konstruktionsform des Silos ab. In dieser Norm wird hinsichtlich der anzusetzenden Teilflächenlasten zwischen folgenden Konstruktionsformen von Silos unterschieden:

- dickwandige Silos mit kreisförmigem Querschnitt, siehe 5.2.2.3 (Stahlbetonsilos);
- dünnwandige Silos mit kreisförmigem Querschnitt, siehe 5.2.2.4 (Metallsilos);
- Silos mit nicht kreisförmigem Querschnitt, siehe 5.2.2.5.

DIN EN 1991-4:2010-12
EN 1991-4:2006 (D)

5.2.2.3 Teilflächenlast für den Lastfall Entleeren: dickwandige kreisförmige Silos

(1) Bei dickwandigen kreisförmigen Silos sollte der Grundwert der Teilflächenlast für den Lastfall Entleeren p_{pe} auf einer quadratischen Teilfläche mit der Seitenlänge s (siehe Gleichung (5.12)) an entgegengesetzten Seiten nach außen wirkend entsprechend Bild 5.4b) angesetzt werden.



a) dünnwandiger kreisförmiger Silo

b) anderer kreisförmiger Silo

Legende

- 1 kleinerer Wert von z_o und $h_c/2$ bei geschweißten Silos der Anforderungsklasse 2 bzw. beliebig bei anderen dünnwandigen Silos der Anforderungsklassen 2 und 3
 2 beliebig

Bild 5.4 — Längs- und Querschnitt mit Darstellung der Lastbilder der Teilflächenlasten bei Entleerung

(2) Zusätzlich zu der nach außen wirkenden Teilflächenlast p_{pe} sollte im verbleibenden Bereich des Siloumfanges über die gleiche Wandhöhe (siehe Bild 5.4b)) eine nach innen gerichtete komplementäre Teilflächenlast p_{pei} angesetzt werden:

$$p_{pei} = p_{pe} / 7 \quad (5.33)$$

wobei p_{pe} der Grundwert der nach außen gerichteten Teilflächenlast nach Gleichung (5.27) ist.

ANMERKUNG Der Betrag und die Wirkungsfläche der nach innen gerichteten Last p_{pei} ist so gewählt, dass sich die Resultierenden der beiden Lastanteile an der Stelle, an der diese anzusetzen sind, sich im Mittel aufheben.

(3) Die Teilflächenlast für den Lastfall Entleeren sollte an jeder beliebigen Stelle an der Silowand angesetzt werden. Dies kann aber in der unter 5.2.2.3 (4) beschriebenen Weise ausgelegt werden.

(4) In dickwandigen kreisförmigen Silos der Anforderungsklasse 2 darf ein vereinfachter Nachweis geführt werden. Als die ungünstige Stelle für den Ansatz der Teilflächenlast darf die halbe Höhe des vertikalen Zellschnitts angesehen werden. Die prozentuale Steigerung der Membranspannungen als Ergebnis aus einem Ansatz der Teilflächenlast an dieser Stelle darf auf die anderen Wandbereiche übertragen werden, indem diese mit dem Verhältniswert zwischen horizontalem Fülldruck an der betrachteten Stelle und dem horizontalen Fülldruck an der Ansatzstelle der Teilflächenlast multipliziert werden.

5.2.2.4 Teilflächenlast für den Lastfall Entleeren: dünnwandige Silos

(1) Bei dünnwandigen kreisförmigen Silos der Anwendungsklassen 2 und 3 sollte die Teilflächenlast für den Lastfall Entleeren über die Höhe s nach Gleichung (5.12) angesetzt werden. Sie geht von einem an einer Stelle nach außen wirkenden Maximaldruck mit dem Betrag ρ_{pe} in einen maximalen nach innen wirkenden Druck gleichen Betrags ρ_{pe} auf der gegenüberliegenden Seite über (siehe Bild 5.4a)). Der Verlauf in Umfangsrichtung sollte angesetzt werden mit:

$$\rho_{pes} = \rho_{pe} \cos \theta \quad (5.34)$$

Dabei ist

- ρ_{pe} die nach außen gerichtete Teilflächenlast nach Gleichung (5.27);
 θ die Winkelkoordinate in Umfangsrichtung (siehe Bild 5.4a)).

(2) Die aus der Teilflächenlast des Lastfalls Entleeren resultierende Horizontallast F_{pe} sollte bei dünnwandigen kreisförmigen Silos nach Gleichung (5.35) berechnet werden:

$$F_{pe} = \frac{\pi}{2} s d_c \rho_{pe} \quad (5.35)$$

(3) Bei geschweißten Silos der Anforderungsklasse 2 darf die Teilflächenlast als in einer Tiefe z_p unterhalb der Schüttgutoberfläche wirkend angesetzt werden. Für z_p sollte der kleinere der folgenden Werte angesetzt werden:

$$z_p = z_o \quad \text{und} \quad z_p = 0,5 h_c \quad (5.36)$$

Dabei ist

- h_c die Höhe des vertikalen Siloschaftes (siehe Bild 1.1a)).

(4) Bei Silos mit Bolzen- und Schraubenverbindungen der Anforderungsklasse 2 sollte die Teilflächenlast an jeder beliebigen Stelle wirkend angesetzt werden. Die Größe der senkrecht auf die Silowand entlang der gesamten Silohöhe wirkenden Last darf vereinfachend über eine einheitliche prozentuale Lasterhöhung ermittelt werden. Es darf alternativ das Verfahren nach 5.2.3 angewendet werden.

5.2.2.5 Teilflächenlast für den Lastfall Entleeren: Nicht kreisförmige Silos

(1) Bei nicht kreisförmigen Silos der Anwendungsklassen 2 und 3 dürfen die Teilflächenlasten des Lastfalls Füllen durch eine Erhöhung der symmetrischen Lasten nach (2) und (3) berücksichtigt werden.

(2) Die nach außen gerichtete Teilflächenlast sollten an jeder Stelle und Tiefe im Silo über eine Höhe s (nach Gleichung (5.12)) wirkend angesetzt werden (siehe Bild 5.3b)).

(3) Der Betrag der Zunahme der gleichmäßigen, symmetrischen Teilflächenlast $\rho_{pe,nc}$ sollte bei nicht kreisförmigen Siloquerschnitten angesetzt werden mit

$$\rho_{pe,nc} = 0,36 \rho_{pe} \quad (5.37)$$

Dabei ist

- ρ_{pe} der Grundwert der Teilflächenlast des Lastfalls Entleeren (siehe Gleichung (5.27)).

ANMERKUNG Der Wert und der Umfang der gleichmäßigen Last $\rho_{pe,nc}$ ist so gewählt, dass die resultierenden Biegemomente bei einem Silo mit rechteckigem Siloquerschnitt ohne innere Zugbänder näherungsweise die gleichen Größenordnungen annehmen, wie sich diese beim Ansatz einer lokalen Teilflächenlast ρ_{pe} in der Mitte der Wand ergeben würden.

DIN EN 1991-4:2010-12
EN 1991-4:2006 (D)

5.2.3 Gleichförmige Erhöhung der Lasten als Ersatz für die Teilflächenlasten der Lastfälle Füllen und Entleeren bei kreisförmigen Silos

(1) Bei Silos der Anforderungsklasse 2 darf das Verfahren der Teilflächenlasten nach 5.2.1 und 5.2.2 zur Berücksichtigung der Unsymmetrien beim Füllen und Entleeren näherungsweise durch einen gleichmäßigen Anstieg der Lasten ersetzt werden.

(2) Für nicht kreisförmige Silos ist der gleichmäßige Anstieg in 5.2.1.5 und 5.2.2.5 festgelegt.

(3) Bei kreisförmigen Silos dürfen die folgenden Ansätze nur angewendet werden, wenn der senkrechte Siloschaft an seinem unteren und oberen Ende ausreichend durch geeignete Aussteifungselemente gegen horizontale Verformungen ausgebildet ist. Die kreisförmige Silozylinderschale muss am oberen Ende und am Fußpunkt entlang ihres Umfangs z. B. über eine konstruktive Verbindung mit dem Dach oder eine Ringsteife gehalten sein.

(4) Bei dickwandigen kreisförmigen Silos sollten die resultierenden Horizontallasten für die Lastfälle Füllen ($\rho_{hf,u}$) und Entleeren ($\rho_{he,u}$) berechnet werden aus

$$\rho_{hf,u} = \rho_{hf} (1 + \zeta C_{pf}) \quad (5.38)$$

$$\rho_{he,u} = \rho_{he} (1 + \zeta C_{pe}) \quad (5.39)$$

mit:

$$\zeta = 0,5 + 0,01 (d_c/t) \quad (5.40)$$

und $\zeta \geq 1,0$ (5.41)

Dabei ist

ρ_{hf} die symmetrische Horizontallast nach dem Füllen nach Gleichung (5.1);

ρ_{he} die symmetrisch Horizontallast beim Entleeren nach Gleichung (5.18);

C_{pf} der Beiwert für die Teilflächenlasten für den Lastfall Füllen nach Gleichung (5.9);

C_{pe} der Beiwert für die Teilflächenlasten für den Lastfall Entleeren nach Gleichung (5.28).

(5) Bei dünnwandigen kreisförmigen Silos sollten die resultierenden Horizontallasten für die Lastfälle Füllen ($\rho_{hf,u}$) und Entleeren ($\rho_{he,u}$) und die daraus resultierenden Wandreibungslasten $\rho_{wf,u}$ und $\rho_{we,u}$ berechnet werden aus

$$\rho_{hf,u} = \rho_{hf} (1 + 0,5C_{pf}) \quad (5.42)$$

$$\rho_{wf,u} = \rho_{wf} (1 + C_{pf}) \quad (5.43)$$

$$\rho_{he,u} = \rho_{he} (1 + 0,5C_{pe}) \quad (5.44)$$

$$\rho_{we,u} = \rho_{we} (1 + C_{pe}) \quad (5.45)$$

Dabei sind

ρ_{wf} die symmetrische Wandreibungslast des Lastfalls Füllen nach Gleichung (5.2);

ρ_{we} die symmetrische Wandreibungslast des Lastfalls Entleeren nach Gleichung (5.19).

Die Parameter ρ_{hf} , ρ_{he} , C_{pf} und C_{pe} sind nach dem unter (3) beschriebenen Vorgehen zu berechnen.

5.2.4 Entleerungslasten für kreisförmige Silos mit großen Exzentrizitäten bei der Entleerung**5.2.4.1 Allgemeines**

(1) Ist die Exzentrizität der Auslauföffnung e_o größer als der kritische Wert $e_{o,cr} = 0,25d_c$, sollten bei Silos der Anforderungsklassen 2 und 3 zur Berücksichtigung der exzentrischen Entleerung in Form eines Kaminflusses oberhalb der Auslauföffnung nachfolgende Verfahren zur Bestimmung der Lastverteilung angenommen werden (siehe Bild 5.5a)).

(2) Ist die maximale Exzentrizität beim Befüllen e_f größer als der kritische Wert $e_{f,cr} = 0,25d_c$ und die Siloschlankheit größer als $h_c/d_c = 4,0$, sollten bei Silos der Anforderungsklassen 2 und 3 die nachfolgenden Verfahren zur Bestimmung der Silodruckverteilung angewendet werden. Diese Druckverteilung kann sich als Ergebnis der Ausbildung eines exzentrischen Schlotfließkanals (siehe Bilder 3.4d) und 5.5a)) einstellen.

(3) Wenn anwendbar, (siehe (1) und (2)) sollten die Verfahren nach 5.2.4.2 und 5.2.4.3 als getrennte unabhängige Lastfälle angesetzt werden. Diese zusätzlichen Lastfälle sind unabhängig von denen, die durch Füll- und Entleerungsdrücke nach den Verfahren der Teilflächenbelastung in 5.2.2 und 5.2.3 festgelegt sind.

(4) Die Ermittlung dieser Lasten sollte unter Verwendung des unteren charakteristischen Wertes der Wandreibung μ und des oberen charakteristischen Wertes des Winkels der inneren Reibung Φ_i durchgeführt werden.

(5) Bei Silos der Anforderungsklasse 2 ist ein vereinfachtes Verfahren nach 5.2.4.2 erlaubt. Bei Silos der Anforderungsklasse 3 sollten Verfahren nach 5.2.4.3 verwendet werden.

5.2.4.2 Verfahren für Silos der Anforderungsklasse 2**5.2.4.2.1 Geometrie des Fließkanals**

(1) Bei Silos der Anforderungsklasse 2 sollten die Berechnungen nur für eine Größe des in Kontakt mit der Silowand befindlichen Fließkanals durchgeführt werden. Die Größe der Fließzone ist dabei über den Wert des Winkels

$$\theta_c = 35^\circ \quad (5.46)$$

zu bestimmen.

5.2.4.2.2 Wanddrücke bei exzentrischer Entleerung

(1) In der Fließzone sollten die Horizontallasten auf die vertikale Silowand (siehe Bild 5.5c)) zu

$$p_{hce} = 0 \quad (5.47)$$

angenommen werden.

(2) Im Bereich, in dem das Schüttgut in Ruhe bleibt, sollten die Horizontallasten auf die vertikale Silowand in einer Tiefe z (siehe Bild 5.5c)) angesetzt werden mit:

$$p_{hse} = p_{hf} \quad (5.48)$$

$$p_{hae} = 2 p_{hf} \quad (5.49)$$

DIN EN 1991-4:2010-12
EN 1991-4:2006 (D)

und die Wandreibungslast an der Wand in der Tiefe z:

$$\rho_{wse} = \rho_{wf} \quad (5.50)$$

$$\rho_{wae} = 2 \rho_{wf} \quad (5.51)$$

Dabei ist

ρ_{hf} die Horizontallast des Lastfalls Füllen nach Gleichung (5.1);

ρ_{wf} die Wandreibungslast des Lastfalls Füllen nach Gleichung (5.2).

ANMERKUNG Dieses vereinfachte Verfahren entspricht einem „leeren“ Schlot (leerer Fließkanal) und liefert daher manchmal sehr konservative Lasten.

(3) Alternativ dürfen auch die Verfahren nach 5.2.4.3.2 angewendet werden.

5.2.4.3 Verfahren für Silos der Anforderungsklasse 3

5.2.4.3.1 Geometrie des Fließkanals

(1)P Die Geometrie und Lage des Fließkanals sind so zu wählen, dass dadurch die Geometrie des Silos, die Entleerungsbedingungen und die Schüttguteigenschaften adäquat berücksichtigt werden.

(2) Wenn die Entleerungsbedingungen zur Ausbildung eines Fließkanals mit eindeutig definierter Geometrie und Lage führen, sollten für das weitere Vorgehen die aus diesem Fließkanal ableitbaren Parameter angenommen werden.

(3) Wenn die Geometrie des Fließkanals nicht unmittelbar aus der Anordnung der Auslauföffnung und der Silogeometrie abgeleitet werden kann, sollten Berechnungen mit mindestens drei verschiedenen Fließkanalradien r_c durchgeführt werden, um die zufällige Veränderlichkeit der Größe des Fließkanals mit der Zeit zu berücksichtigen. Dabei sollten folgende drei Werte zu beachtet werden:

$$r_c = k_1 r \quad (5.52)$$

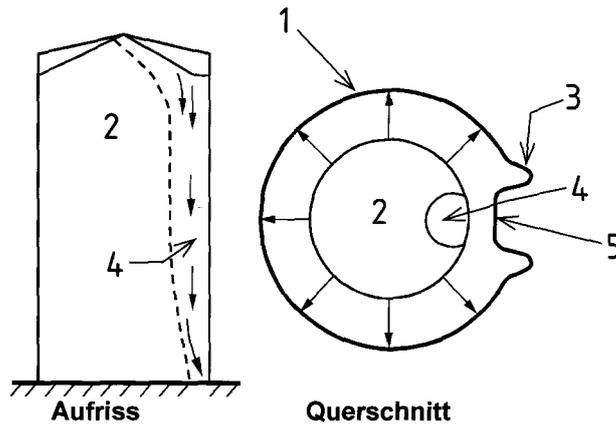
$$r_c = k_2 r \quad (5.53)$$

$$r_c = k_3 r \quad (5.54)$$

Dabei ist

r der Radius des kreisförmigen Silos ($= d_c/2$) ist.

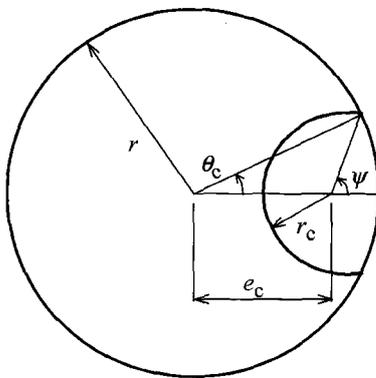
ANMERKUNG Die Werte für k_1 , k_2 und k_3 dürfen im Nationalen Anhang festgelegt werden. Empfohlen werden jeweils 0,25, 0,4 bzw. 0,6.



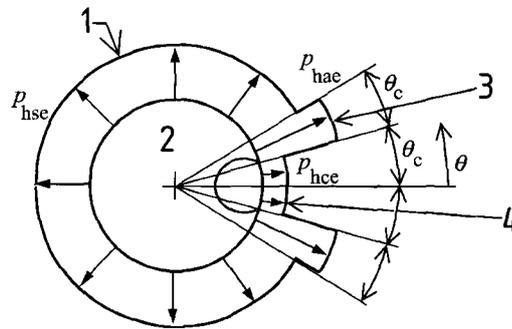
Legende

- 1 Statischer Druck
- 2 Ruhendes Schüttgut
- 3 Fließkanal
- 4 Fließdruck

a) Fließkanal und Druckverteilung



b) Geometrie des Fließkanals



c) Druckverteilung

Legende

- 1 Statischer Druck
- 2 Ruhendes Schüttgut
- 3 Fließkanal-Randlasten
- 4 Fließkanaldruck

Bild 5.5 — Fließkanal und Druckverteilung bei der Entleerung mit großen Exzentrizitäten

DIN EN 1991-4:2010-12
EN 1991-4:2006 (D)

(4) Die Exzentrizität des Fließkanals e_c (siehe Bild 5.5) sollte angesetzt werden mit:

$$e_c = r \{ \eta (1 - G) + (1 - \eta) \sqrt{1 - G} \} \quad (5.55)$$

mit:

$$G = r_o/r \quad (5.56)$$

und

$$\eta = \mu \tan \phi_i \quad (5.57)$$

Dabei ist

μ der untere charakteristische Wert des Wandreibungskoeffizienten für die vertikale Silowand;

ϕ_i der obere charakteristische Wert des Winkels der inneren Reibung des gelagerten Schüttgutes;

r_c der Bemessungswert des Fließkanalradius nach den Gleichungen (5.52) bis (5.54).

ANMERKUNG 1 Es wird darauf hingewiesen, dass stets $\phi_w \leq \phi_i$, da sich sonst eine Gleitfläche innerhalb des Schüttgutes ausbilden würde. Das bedeutet, dass in Gleichung (5.56) stets $\eta \leq 1$.

ANMERKUNG 2 Die Exzentrizität des Fließkanals e_c darf, wie in Bild 3.4d) angedeutet, variieren. Sie hängt nicht nur ausschließlich von der Exzentrizität der Auslauföffnung ab. Das angegebene Verfahren sieht vor, diejenigen Situationen zu berücksichtigen, die für jede Silogeometrie und konstruktive Anordnung zu den ungünstigsten Verhältnissen führen. Die Exzentrizität des Fließkanals kann im Ergebnis daher kleiner als die kritische Füllexzentrizität $e_{f,cr}$ und kleiner als die kritische Entleerungsexzentrizität $e_{o,cr}$ sein.

ANMERKUNG Diese Bestimmung der Lage und Größe des Fließkanals basiert auf dem Prinzip der Minimierung des Reibungswiderstands des Schüttgutes an der Umfangsfläche des Fließkanals unter der vereinfachten Annahme, dass der Umfang des Fließkanals ein kreisförmiger Bogen ist. Es können auch andere geeignete Verfahren zur Bestimmung des Umfangs des Fließkanals angewendet werden.

(5) Sofern es den obigen Anforderungen hinsichtlich des angenommenen Fließkanalradius bei Trichtern für „erweitertes Fließen“ (siehe Bild 3.5d)) nicht widerspricht, sollte der zusätzliche Fall eines Fließkanals mit einem Radius r_c entsprechend dem Radius des Siloquerschnittes am oberen Ende des Trichters für „erweitertes Fließen“ betrachtet werden.

(6) Die Begrenzung der Kontaktfläche zwischen Fließkanal und Silowand sollte durch die Umfangswinkel $\theta = \pm \theta_c$ definiert werden, wobei:

$$\cos \theta_c = (r^2 + e_c^2 - r_c^2) / (2r e_c) \quad (5.58)$$

(7) Die Bogenlänge der Kontaktfläche zwischen Fließkanal und Wand sollte berechnet werden als:

$$U_{wc} = 2 \theta_c r \quad (5.59)$$

und die Bogenlänge der Kontaktfläche zwischen Fließkanal und dem sich nicht in Bewegung befindlichen Schüttgut als:

$$U_{sc} = 2 r_c (\pi - \psi) \quad (5.60)$$

wobei:

$$\sin \psi = \frac{r}{r_c} \sin \theta_c \quad (5.61)$$

und die beiden Winkel θ_c und ψ im Bogenmaß einzusetzen sind.

(8) Die Querschnittsfläche des Fließkanals sollte wie folgt berechnet werden:

$$A_c = (\pi - \psi) r_c^2 + \theta_c r^2 - r r_c \sin (\psi - \theta_c) \quad (5.62)$$

5.2.4.3.2 Wandlasten bei der Entleerung mit großen Exzentrizitäten

(1) Die Lasten auf die vertikalen Wände im Bereich des Fließkanals (siehe Bild 5.5c)) sind von der Tiefe z unter der äquivalenten Schüttgutoberfläche abhängig und sollten berechnet werden nach:

$$p_{hce} = p_{hco} (1 - e^{-z/z_{oc}}) \quad (5.63)$$

Die auf die Wand in der Tiefe z wirkenden Wandreibungslasten bestimmen sich nach Gleichung (5.63) zu:

$$p_{wce} = \mu p_{hce} = \mu p_{hco} (1 - e^{-z/z_{oc}}) \quad (5.64)$$

mit:

$$p_{hco} = \gamma K z_{oc} \quad (5.65)$$

$$z_{oc} = \frac{1}{K} \left(\frac{A_c}{U_{wc} \mu + U_{sc} \tan \phi_1} \right) \quad (5.66)$$

Dabei ist

μ der Wandreibungskoeffizient im Bereich der vertikalen Wand;

K das Horizontallastverhältnis des Schüttguts.

(2) Die Horizontallasten auf die Silowand in der Tiefe z im Bereich außerhalb der Fließzone, in dem sich das Schüttgut in Ruhe befindet (siehe Bild 5.5c)), sollten angesetzt werden mit:

$$p_{hse} = p_{hf} \quad (5.67)$$

und die Wandreibungslast auf die Wand in der Tiefe z :

$$p_{wse} = p_{wf} \quad (5.68)$$

Dabei ist

p_{hf} die Horizontallast des Lastfalls Füllen nach Gleichung (5.1);

p_{wf} die Wandreibungslast des Lastfalls Füllen nach Gleichung (5.2).

(3) Unmittelbar am Übergang von der Fließzone zu dem Bereich, in dem sich das Schüttgut in Ruhe befindet, wirken höhere Lasten p_{hae} auf die vertikalen Silowände (siehe Bild 5.5c)). Diese zusätzlichen in der Tiefe z unterhalb der äquivalenten Schüttgutoberfläche nach außen wirkenden Horizontallasten neben dem Fließkanal sollten angesetzt werden mit:

$$p_{hae} = 2p_{hf} - p_{hce} \quad (5.69)$$

und die zugehörigen Wandreibungslasten auf die Wand in der Tiefe z dementsprechend mit:

$$p_{wae} = \mu p_{hae} \quad (5.70)$$

5.3 Niedrige Silos und Silos mit mittlerer Schlankheit**5.3.1 Fülllasten auf die vertikalen Wände****5.3.1.1 Symmetrische Fülllasten**

(1) Die symmetrischen Lasten für den Lastfall Füllen (siehe Bild 5.6) sollten nach den Gleichungen (5.71) bis (5.80) ermittelt werden.

DIN EN 1991-4:2010-12
EN 1991-4:2006 (D)

(2) Die Werte für die Horizontallasten p_{hf} und die Wandreibungslasten p_{wf} für den Lastfall Füllen sollten an jeder Stelle wie folgt angesetzt werden:

$$p_{hf} = p_{ho} Y_R \quad (5.71)$$

$$p_{wf} = \mu p_{hf} \quad (5.72)$$

mit:

$$p_{ho} = \gamma K z_o = \gamma \frac{1}{\mu} \frac{A}{U} \quad (5.73)$$

$$Y_R(z) = \left(1 - \left\{ \left(\frac{z - h_o}{z_o - h_o} \right) + 1 \right\}^n \right) \quad (5.74)$$

$$z_o = \frac{1}{K\mu} \frac{A}{U} \quad (5.75)$$

$$n = - (1 + \tan \phi_r) (1 - h_o/z_o) \quad (5.76)$$

Dabei ist

h_o der vertikale Abstand zwischen der äquivalenten Schüttgutoberfläche und der höchstgelegenen Kontaktstelle vom gespeicherten Schüttgut mit der Wand (siehe Bilder 1.1a) und 5.6).

Das Maß h_o ist anzunehmen mit

$$h_o = \frac{r}{3} \tan \phi_r \quad (5.77)$$

bei einem symmetrisch gefüllten kreisförmigen Silo mit dem Radius r

und mit

$$h_o = \frac{d_c}{4} \tan \phi_r \quad (5.78)$$

bei einem symmetrisch gefüllten Rechtecksilo mit dem Maß d_c

Dabei ist

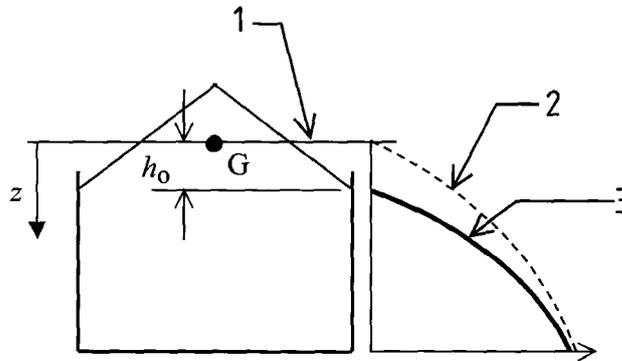
- γ der charakteristische Wert für die Wichte des Schüttguts;
- μ der charakteristische Wert des Wandreibungskoeffizienten zwischen Schüttgut und vertikaler Silowand;
- K der charakteristische Wert des Horizontallastverhältnisses des gespeicherten Schüttguts;
- z die Tiefe unterhalb der äquivalenten Schüttgutoberfläche;
- A die Querschnittsfläche des vertikalen Siloschaftes;
- U der innere Umfang des Querschnittes des vertikalen Siloschaftes;
- ϕ_r der Böschungswinkel des Schüttgutes (siehe Tabelle E.1).

(3) Der Betrag der Vertikallast p_{vf} in einer Tiefe z sollte für den Lastfall Füllen angesetzt werden mit:

$$p_{vf} = \gamma z_V \quad (5.79)$$

wobei:

$$z_V = h_0 - \frac{1}{(n+1)} \left(z_0 - h_0 - \frac{(z + z_0 - 2h_0)^{n+1}}{(z_0 - h_0)^n} \right) \quad (5.80)$$



Legende

- 1 Äquivalente Schüttgutoberfläche
- 2 Silolasten nach den Regeln für schlanke Silos
- 3 Lasten für niedrige Silos

Bild 5.6 — Lasten in einem niedrigen Silo oder Silo mit mittlerer Schlankheit nach dem Füllen (Fülllasten)

(4) Für den Lastfall Füllen errechnet sich der resultierende charakteristische Wert der vertikalen Wand-schnittkräfte n_{zSk} – mit der Einheit Kraft je Längeneinheit in Umfangsrichtung der Wand aus:

$$n_{zSk} = \int_0^z p_{wf}(z) dz = \mu p_{h0} (z - z_V) \quad (5.81)$$

mit z_V nach Gleichung (5.80).

ANMERKUNG Die über Gleichung (5.81) definierte resultierende Kraft ist ein charakteristischer Wert. Es sollte bei der Anwendung dieser Gleichung darauf geachtet werden, dass der entsprechende Teilsicherheitsbeiwert für Einwirkungen nicht vergessen wird. Dieser Hinweis sollte deshalb beachtet werden, weil diese Gleichung bereits als ein Ergebnis einer statischen Berechnung (unter Verwendung der Schalenmembrantheorie) zu werten ist. Die Gleichung ist in dieser Norm angeführt, um den Tragwerksplaner bei der Integration der Gleichung (5.72) zu unterstützen. Es wird zudem darauf hingewiesen, dass auch andere Lasten (z. B. die Teilflächenlasten) zusätzliche Vertikalkräfte in der Wand hervorrufen können.

5.3.1.2 Teilflächenlast für den Lastfall Füllen

- (1) Die Teilflächenlast beim Füllen sollte als normal zur Silowand wirkend berücksichtigt werden.
- (2) Die Teilflächenlast besteht nur aus einem horizontal wirkenden Lastanteil. Es sollten keine zusätzlichen Reibungslasten infolge dieser horizontalen Lastkomponente berücksichtigt werden.
- (3) Bei niedrigen Silos ($h_0/d_c \leq 1,0$) aller Anforderungsklassen darf die Teilflächenlast für den Lastfall Füllen vernachlässigt werden ($C_{pf} = 0$).

DIN EN 1991-4:2010-12
EN 1991-4:2006 (D)

(4) Bei Silos mit mittlerer Schlankheit ($1,0 < h_c/d_c < 2,0$) der Anforderungsklasse 1 darf die Teilflächenlast für den Lastfall Füllen vernachlässigt werden.

(5) Bei Silos mit mittlerer Schlankheit ($1,0 < h_c/d_c < 2,0$) der Anforderungsklassen 2 und 3 sollten zur Berücksichtigung der zufälligen Unsymmetrien der Lasten und kleinerer Exzentrizitäten beim Befüllen e_f (siehe Bild 1.1b)) die Teilflächenlasten für den Lastfall Füllen p_{of} nach 5.2.1 verwendet werden.

(6) Bei flachen Silos oder bei Silos mit mittlerer Schlankheit ($h_c/d_c < 2,0$) nach Anforderungsklassen 2 und 3, bei denen die Füllungsexzentrizität e_f den kritischen Wert $e_{f,cr} = 0,25 d_c$ überschreitet, sollte der zusätzliche Lastfall für große Füllungsexzentrizitäten bei flachen Silos nach 5.3.3 angesetzt werden.

5.3.2 Entleerungslasten auf die vertikalen Silowände

5.3.2.1 Symmetrische Entleerungslasten

(1)P Beim Lastfall Entleeren sind zur Berücksichtigung der möglichen vorübergehenden Zunahme der Lasten während der Entleerungsvorgänge eine Erhöhung der symmetrischen Lastanteile anzusetzen.

(2) Bei niedrigen Silos ($h_c/d_c \leq 1,0$) dürfen die symmetrischen Entleerungslasten mit Fülllasten gleichgesetzt werden.

(3) Bei Silos mit mittlerer Schlankheit ($1,0 < h_c/d_c < 2,0$) sollten die symmetrischen Entleerungslasten p_{he} und p_{we} berechnet werden aus:

$$p_{he} = C_h p_{hf} \quad (5.82)$$

$$p_{we} = C_w p_{wf} \quad (5.83)$$

Dabei ist

C_h und C_w die Entleerungsfaktoren für die Horizontal- und Wandreibungslasten entsprechend den Gleichungen (5.84) bis (5.89).

(4) Bei Silos aller Anforderungsklassen, die von der Schüttgutoberfläche aus entleert werden (somit kein Fließen innerhalb des gespeicherten Schüttgutes stattfindet), gilt:

$$C_w = C_h = 1,0 \quad (5.84)$$

(5) Bei Silos mit mittlerer Schlankheit der Anforderungsklassen 2 und 3 sollten die Entleerungsfaktoren angesetzt werden mit:

$$C_h = 1,0 + 0,15 C_S \quad (5.85)$$

$$C_w = 1,0 + 0,1 C_S \quad (5.86)$$

$$C_S = h_c/d_c - 1,0 \quad (5.87)$$

mit C_S als Schlankheitsbeiwert.

(6) Bei Silos mit mittlerer Schlankheit der Anforderungsklasse 1 sollten, wenn in den Lastansätzen die Mittelwerte der Materialkennwerte K und μ verwendet wurden, die Entleerungsfaktoren wie folgt berechnet werden:

$$C_h = 1,0 + \{0,15 + 1,5 (1 + 0,4 e/d_c) C_{op}\} C_S \quad (5.88)$$

$$C_w = 1,0 + 0,4 (1 + 1,4 e/d_c) C_S \quad (5.89)$$

$$e = \max(e_f, e_o) \quad (5.90)$$

Dabei ist

- e_f die maximale Exzentrizität des Anschüttkegels beim Befüllen;
- e_o die Exzentrizität des Mittelpunktes der Auslauföffnung;
- C_{op} der Schüttgutbeiwert für die Teilflächenlast nach Tabelle E.1;
- C_S der Schlankheitsbeiwert nach Gleichung (5.87).

(7) Für den Lastfall Füllen errechnet sich der resultierende charakteristische Wert der vertikalen Wand-schnittkräfte n_{zSk} — mit der Einheit Kraft je Längeneinheit in Umfangsrichtung der Wand, in jeder Wandhöhe, zu:

$$n_{zSk} = \int_0^z p_{we}(z) dz = \mu p_{ho} (z - z_V) \quad (5.91)$$

mit z_V nach Gleichung (5.80).

ANMERKUNG Die über Gleichung (5.91) definierte Schnittkraft ist ein charakteristischer Wert. Es sollte bei der Anwendung dieser Gleichung darauf geachtet werden, dass der geeignete Teilsicherheitsbeiwert für Einwirkungen nicht vergessen wird. Dieser Hinweis sollte deshalb beachtet werden, weil diese Gleichung bereits als ein Ergebnis einer statischen Berechnung (unter Verwendung der Schalenmembrantheorie) zu werten ist. Die Gleichung ist in dieser Norm angeführt, um den Tragwerksplaner bei der Integration der Gleichung (5.83) zu unterstützen. Es wird zudem darauf hingewiesen, dass auch andere Lasten (z. B. die Teilflächenlasten) zusätzliche Vertikalkräfte in der Wand hervorrufen können.

5.3.2.2 Teilflächenlast für den Lastfall Entleeren

(1) Die Teilflächenlasten p_{pe} im Lastfall Entleeren sollten zur Berücksichtigung von unplanmäßigen Lasten und von kleinen Füllungsexzentrizitäten (siehe Bild 1.1b)) angesetzt werden.

(2) Angaben zur Bestimmung der Form, der Lage und des Betrags der Teilflächenlast des Lastfalls Entleeren sollten den Regeln nach 5.2.2 entnommen werden.

(3) Bei niedrigen Silos und Silos mittlerer Schlankheit ($h_c/d_c < 2,0$) aller Anforderungsklassen sollte bei einer Exzentrizität e_o während des Entleerens $e_{o,c}$, die den kritischen Wert von $e_{o,cr} = 0,25d_c$ überschreitet, ein zusätzlicher Lastfall nach 5.3.4 angenommen werden.

(4) Bei niedrigen Silos ($h_c/d_c \leq 1,0$) der Anforderungsklasse 1 sollte der Ansatz einer Teilflächenlast für den Lastfall Entleeren nicht berücksichtigt werden (d. h. $C_{pe} = 0$).

(5) Bei Silos mit mittlerer Schlankheit ($h_c/d_c < 2,0$) der Anforderungsklasse 1 sollte der Ansatz einer Teilflächenlast für den Lastfall Entleeren nicht berücksichtigt werden (d. h. $C_{pe} = 0$).

DIN EN 1991-4:2010-12
EN 1991-4:2006 (D)

(6) Bei niedrigen Silos ($h_c/d_c \leq 1,0$) der Anforderungsklasse 2 und einer Exzentrizität während des Entleerens e_o , die größer als der kritische Wert von $e_{o,cr} = 0,1d_c$ ist, sollten die Festlegungen nach 5.3.2.3 verwendet werden.

(7) Bei Silos mit mittlerer Schlankheit ($1,0 < h_c/d_c < 2,0$) der Anforderungsklasse 2 sollten die Festlegungen nach 5.3.2.3 angewendet werden.

(8) Bei niedrigen Silos ($h_c/d_c \leq 1,0$) der Anforderungsklasse 3 und einer Exzentrizität während des Entleerens e_o , die größer als der kritische Wert von $e_{o,cr} = 0,1d_c$ ist, sollten die Festlegungen nach 5.2.2.2 bis 5.2.2.5 je nach Eignung angewendet werden.

(9) Bei Silos mit mittlerer Schlankheit ($1,0 < h_c/d_c < 2,0$) der Anforderungsklasse 3 sollten die Festlegungen nach 5.2.2.2 bis 5.2.2.5 je nach Eignung angewendet werden.

5.3.2.3 Gleichförmige Erhöhung der Horizontallasten als Ersatz für die Teilflächenlasten der Lastfälle Füllen und Entleeren

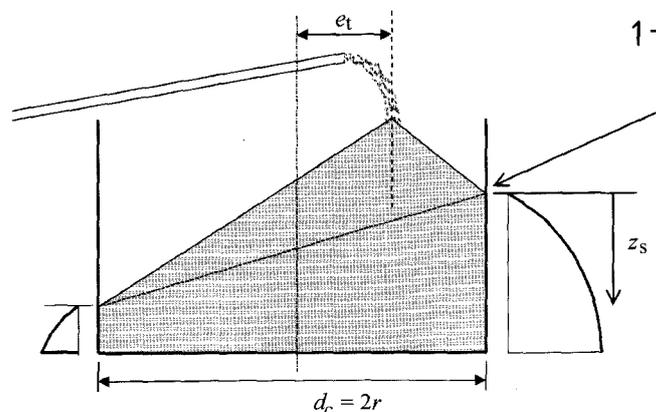
(1) Bei Silos der Anforderungsklasse 2 darf das Verfahren der Teilflächenlasten nach 5.3.1.2 und 5.3.2.2 zur Berücksichtigung der Unsymmetrien beim Füllen und Entleeren näherungsweise durch eine gleichmäßige Erhöhung der Horizontallasten ersetzt werden.

(2) Je nach vorliegendem Fall dürfen die Verfahren nach 5.2.3 durch Verwendung der Gleichungen (5.38) bis (5.45) auf die Werte der Teilflächenlasten aus 5.3.1.2 und 5.3.2.2 angewandt werden.

5.3.3 Große Exzentrizitäten beim Befüllen von kreisförmigen niedrigen Silos und kreisförmigen Silos mit mittlerer Schlankheit

(1)P Bei kreisförmigen niedrigen Silos und kreisförmigen Silos mit mittlerer Schlankheit ($h_c/d_c < 2,0$) der Anforderungsklasse 3 und einer Exzentrizität des Aufschüttkegels beim Befüllen e_t , die größer als der kritische Wert von $e_{t,cr} = 0,25d_c$ (siehe Bild 5.7) ist, ist die Auswirkung der unsymmetrischen Lastverteilung im Hinblick auf die Vertikallasten in den Silowänden zu betrachten.

(2) Bei einer konventionellen Handrechnung sind die Erfordernisse von 5.3.3 (1)P erfüllt, wenn die vertikalen Wandlasten n_{zSk} nach Gleichung (5.92) zu den symmetrischen Füllungslasten addiert werden. Die symmetrischen Lasten sind für einen Füllstand mit äquivalenter Schüttgutoberfläche entsprechend einer angenommenen symmetrischen Füllung nach 5.3.1.1 zu bestimmen.



Legende

1 Höchstliegende Kontaktstelle der Silowand mit dem Schüttgut

Bild 5.7 — Fülldrücke bei exzentrisch gefüllten niedrigen Silos oder Silos mit mittlerer Schlankheit

(3) Die Auswirkung der unsymmetrischen Lasten darf durch Erhöhung der Vertikalkräfte im Wandbereich berücksichtigt werden, wo die Füllhöhe am größten ist.

ANMERKUNG Die Erhöhung der Vertikalkräfte ergibt sich aus der globalen Biegung des Silos, wenn auf der entgegengesetzten Wand kein Horizontaldruck wirkt. Der Zuwachs der Vertikallast ist somit direkt zu den Wandreibungslasten hinzuzuaddieren, die aus den symmetrischen Lastfällen berechnet werden (siehe oben).

(4) Die Berechnungen sollten mit dem oberen charakteristischen Wert der Schüttgutkennwerte K und μ durchgeführt werden.

(5) Der charakteristische Wert der resultierenden zusätzlichen Vertikalkräfte in der Silowand $n_{zSk}(z_s)$ sollte in einer Tiefe z_s unterhalb des höchstliegenden Berührungspunktes des Schüttgutes mit der Wand bestimmt werden aus:

$$n_{zSk} = 0,04 p_{ho} z_s \tan \phi_r (e_t / r) (6 + 7z - z^2) \quad (5.92)$$

und hat die Einheit Kraft je Längeneinheit in Umfangsrichtung,

mit:

$$p_{ho} = \frac{\gamma}{\mu} \frac{A}{U} = \frac{\gamma r}{2\mu} \quad (5.93)$$

$$Z = \frac{z_s}{B} \quad (5.94)$$

$$B = \frac{r}{2\mu K} - h_o \quad (5.95)$$

$$h_o = r \tan \phi_r [1 - (e_t / r)^2] / 3 \quad (5.96)$$

Dabei ist

- z_s die Tiefe unterhalb der höchstliegenden Kontaktstelle des Schüttgutes mit der Wand;
- ϕ_r der Böschungswinkel des Schüttgutes;
- r der Radius der kreisförmigen Silowand;
- e_t die Exzentrizität der Spitze des Füllanschüttkegels in radialer Richtung (siehe Bilder 1.1b) und 5.7).

ANMERKUNG Die über Gleichung (5.92) definierte Schnittkraft ist ein charakteristischer Wert. Es sollte bei der Anwendung dieser Gleichung darauf geachtet werden, dass der entsprechende Teilsicherheitsbeiwert für Einwirkungen nicht vergessen wird. Dieser Hinweis ist deshalb zu beachten, weil diese Gleichung bereits als ein Ergebnis einer statischen Berechnung (unter Verwendung der Schalenmembrantheorie) zu werten ist.

(6) Der Lastanteil aus Gleichung (5.92) sollte mit dem Lastanteil aus der aufsummierten Wandreibungslast aus Gleichung (5.81) überlagert werden.

5.3.4 Große Entleerungsexzentrizitäten in kreisförmigen niedrigen Silos und kreisförmigen Silos mit mittlerer Schlankheit

(1) Bei einer Entleerungsexzentrizität e_o , die größer als der kritische Wert $e_{o,cr} = 0,25d_c$ ist, sollten bei niedrigen Silos und Silos mit mittlerer Schlankheit ($h_c/d_c < 2,0$) der Anforderungsklassen 2 und 3 die Verfahren nach 5.2.4 angewendet werden. Die dort beschriebenen Lasten sollten als ein zusätzlicher, getrennt zu den symmetrischen Lasten und Teilflächenlasten (nach 5.3.2) zu behandelnder Lastfall betrachtet werden.

DIN EN 1991-4:2010-12
EN 1991-4:2006 (D)

5.4 Stützwandsilos

5.4.1 Fülllasten auf vertikale Wände

(1)P Die Auswirkung der Geometrie des Anschüttwinkels und — falls erforderlich — Krümmung der Stützwand ist bei der Ermittlung der Fülllasten zu berücksichtigen.

(2) Bei der Bestimmung des Horizontallastverhältnisses K sollte der Widerstand der Wand gegenüber radialer Ausdehnung berücksichtigt werden (i. Allg. Ruhedruckbedingungen). Bei rechnerischem Nachweis ausreichender (elastischer) Verformung der Stützwand darf ein niedrigeres Horizontallastverhältnis K angenommen werden.

(3) Es sollte ein charakteristischer Wert der Horizontallasten p_h auf die vertikalen Wände (siehe Bild 5.8) bestimmt werden.

ANMERKUNG 1 Das Verfahren zur Bestimmung des Horizontaldruckes p_h auf die vertikalen Wände darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Ein empfohlenes Verfahren ist in Gleichung (5.97) angegeben.

$$p_h = \gamma K (1 + \sin \phi_r) z_s \quad (5.97)$$

Dabei ist

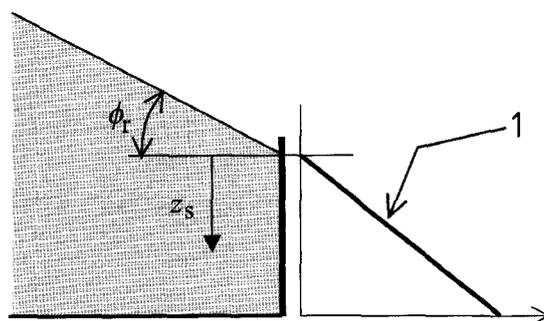
z_s die Tiefe unterhalb der höchstliegenden Kontaktstelle des Schüttgutes mit der Wand (siehe Bild 5.8);

γ der obere charakteristische Wert der Schüttgutwichte;

K der obere charakteristische Wert des Horizontallastverhältnisses des Schüttgutes;

ϕ_r der Böschungswinkel des gespeicherten Schüttgutes.

ANMERKUNG 2 Gleichung (5.97) liefert unter der Bedingung einer geraden vertikalen Wand mit voll entwickeltem Wandreibungskontakt und unter der Voraussetzung der Gleichheit von Böschungswinkel und Winkel der inneren Reibung anerkannt realistische Lastansätze. Dies stimmt mit den entsprechenden Ansätzen in EN 1997 überein.



Legende

1 Lastansatz in einem Stützwandsilo

Bild 5.8 — Fülldrücke in einem Stützwandsilo

(4) Der charakteristische Wert der resultierenden zusätzlichen Vertikalkräfte in der Wand (Druck) $n_{zSk}(z_s)$ — in der Einheit Kraft je Längeneinheit in Umfangsrichtung — in beliebiger Tiefe z_s unterhalb des höchstliegenden Berührungspunktes des Schüttgutes und der Wand sollte unter Berücksichtigung des Wandreibungswinkels μ in gleicher Weise bestimmt werden wie in (3).

ANMERKUNG Das Verfahren zur Bestimmung der resultierenden zusätzlichen Vertikalkräfte in der Wand (Druck) $n_{zSk}(z_s)$ darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Ein empfohlenes Verfahren ist in Gleichung (5.98) angegeben:

$$n_{zSk} = \gamma \frac{\mu K}{2} (1 + \sin \phi_r) z_s^2 \quad (5.98)$$

wobei μ der obere charakteristische Wert des Wandreibungskoeffizienten des Schüttgutes ist.

(5) Ungeachtet anders lautender Regeln dieser Norm darf die Streuung der Schüttgutparameter bei Stützwandsilos durch die Verwendung der oberen charakteristischen Werte der Wichte γ und des Horizontal-lastbeiwertes K des Schüttgutes als ausreichend berücksichtigt angenommen werden.

5.4.2 Entleerungslasten auf vertikale Wände

(1) Es darf davon ausgegangen werden, dass die Entleerungslasten auf die vertikalen Wände kleiner sind als die Fülllasten.

(2) In Bezugnahme auf 5.4.2 (1) sollte die Festlegung der Entleerungsbedingungen die Möglichkeit einer ungleichmäßigen Lastverteilung als Ergebnis einer ungleichmäßigen Schüttgutentnahme im Silo berücksichtigen.

5.5 Silos mit Gebläse

5.5.1 Allgemeines

(1)P Zusätzliche Lasten aus Fluidisierung und aus Luftdrücken infolge Einblasen von Luft sind bei der Bemessung zu berücksichtigen.

(2)P Homogenisierungssilos mit fluidisiertem Schüttgut und Silos mit einer großen Einfüllgeschwindigkeit des Schüttgutes (siehe 1.5.16 und 1.5.17) sind für die beiden Fälle:

- Schüttgut fluidisiert,
- Schüttgut nicht fluidisiert,

zu bemessen.

(3) Für den Fall, dass das Schüttgut nicht fluidisiert, sollten die Lasten entsprechend dem Vorgehen nach 5.2 oder 5.3 behandelt werden.

5.5.2 Lasten in Silos zur Lagerung von fluidisiertem Schüttgut

(1) In Silos zur Lagerung von staubförmigem Schüttgut (siehe 1.5.31) sollte davon ausgegangen werden, dass das gespeicherte Schüttgut fluidisieren kann, falls die Geschwindigkeit der ansteigenden Schüttgutoberfläche 10 m/h übersteigt.

ANMERKUNG Die Bedingungen, unter denen ein gespeichertes staubförmiges Schüttgut fluidisieren kann, hängt von vielen Faktoren ab, die nicht einfach zu definieren sind. Das oben angeführte Kriterium ist eine einfache Abschätzung der Situation, ob dieser Lastfall für die Bemessung entscheidend werden kann. Wenn immer Zweifel über ein mögliches Fluidisieren des Schüttgutes bestehen, wird das Hinzuziehen von entsprechend spezialisierten Gutachtern (z. B. aus der Schüttgutmechanik) empfohlen.

DIN EN 1991-4:2010-12
EN 1991-4:2006 (D)

5.7 Lasten in rechteckigen Silos

5.7.1 Rechtecksilos

(1) Die Wandlasten infolge von gelagerten Schüttgütern sollten in Silos mit rechteckigem Querschnitt je nach Anwendungsfall nach 5.2, 5.3 und 5.4 angesetzt werden.

(2) Ungeachtet der allgemeinen Erfordernisse von 4.1 (2) darf bei der Bemessung von Silos der Anforderungsklassen 1 und 2 die günstige Wirkung der Interaktion zwischen Schüttgut und Silowand in Form einer Umlagerung der Horizontallasten von der Wandmitte (Abnahme) in die Ecken (Zunahme) berücksichtigt werden, wenn die Silowand so ausgelegt ist, dass deren Steifigkeit mit der Steifigkeit des gelagerten Schüttgutes vergleichbar ist.

(3) Wenn von Druckumlagerungen entsprechend (2) in einer bestimmten Füllhöhe ausgegangen wird, sollte der mittlere Druck in dieser Höhe nach 5.2 oder 5.3 ermittelt werden.

(4) Mit Hinblick auf 5.7.1 (3) und in Fällen, in denen entsprechende reduzierte Drucke verwendet werden, sollte eine sinnvolle Methode für die Abschätzung der Drücke in Ansatz gebracht werden.

5.7.2 Silos mit inneren Zuggliedern

(1) In rechteckigen Silozellen mit innerhalb des Siloquerschnitts verlaufenden Zugbändern sollten die Schüttgutlasten auf die Wände je nach Anwendungsfall nach dem Vorgehen in 5.2, 5.3 und 5.4 angesetzt werden.

(2) Die aus den Zuggliedern auf die Silowände wirkenden Kräfte sollten unter Berücksichtigung folgender Einflüsse ermittelt werden:

- Belastung auf die jeweiligen inneren Zugglieder,
- Lage und Befestigung der Zugglieder,
- Durchhang der Zugglieder,
- Einfluss der Struktursteifigkeit auf die Größenordnung des Durchhanges der Zugglieder als Ergebnis der Belastung infolge des gelagerten Schüttgutes.

(3) Bei Silos der Anforderungsklassen 1 und 2 sollten die Lasten auf die Silostruktur infolge der inneren Zugbänder nach den Berechnungsmethoden von EN 1993-4-1 berücksichtigt werden.

6 Lasten auf Silotrichter und Siloböden

6.1 Allgemeines

6.1.1 Physikalische Kennwerte

(1)P Für die folgenden Arten der Ausbildung des Silobodens werden in diesem Abschnitt die zu verwendenden charakteristischen Werte der Füll- und Entleerungslasten angegeben:

- ebene Böden;
- steile Trichter;
- flach geneigte Trichter.

(2)P Die Lasten auf die Wände von Silotrichtern sind unter Berücksichtigung der Neigung der Trichterwände entsprechend der folgenden Einteilung zu ermitteln:

- von einem ebenen Boden ist auszugehen, wenn der Neigungswinkel des Bodens gegenüber der Horizontalen α weniger als 5° beträgt.

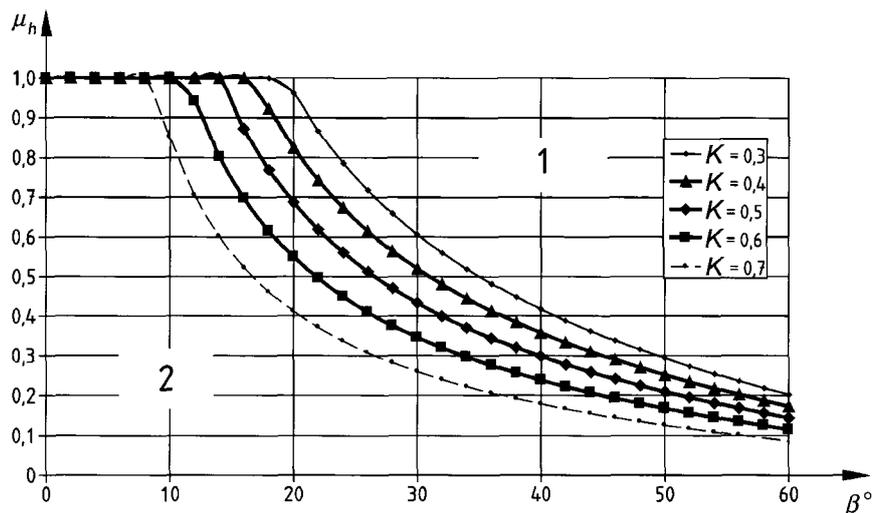
- von einem flach geneigten Trichter ist auszugehen, wenn die beiden anderen angeführten Fälle nicht zutreffen.
- ein steiler Trichter liegt vor, wenn folgendes Kriterium erfüllt (siehe Bilder 6.1 und 6.2) ist:

$$\tan \beta < \frac{1-K}{2\mu_h} \quad (6.1)$$

Dabei ist

- K der untere charakteristische Wert des Horizontallastverhältnisses an den vertikalen Wänden;
- β der Trichterneigungswinkel gemessen in Bezug zur vertikalen Achse (halber Scheitelwinkel);
- μ_h der untere charakteristische Wert des Wandreibungskoeffizienten im Trichter.

ANMERKUNG Ein steiler Trichter liegt vor, wenn das Schüttgut unter der Bedingung den geneigten Wänden entlang gleitet, dass der Silo gefüllt ist und sich das Schüttgut infolge des im Silo gelagerten Schüttgutes in einem verdichteten (konsolidierten) Zustand befindet. Der Reibwiderstand an der Trichterwand ist dann über die Normaldrücke auf die Trichterwand und den Wandreibungskoeffizienten definiert. Man spricht in diesem Fall auch von „vollständig mobilisierter Wandreibung“. Ein flach geneigter Trichter liegt vor, wenn das Schüttgut im gefüllten Zustand des Silos nicht entlang der geneigten Trichterwand fließt (der auf die Horizontale bezogene Trichterneigungswinkel ist zu klein bzw. die Wandreibung ist zu hoch). Die Wandreibungswiderstand steht dann nicht in direkter Beziehung zu den auf die Trichterwand wirkenden Normaldrücken und den Wandreibungskoeffizienten, sondern ist etwas geringer und hängt vom Trichterneigungswinkel und vom Spannungszustand im Trichter ab (Wandreibung nicht vollständig mobilisiert). In diesem Zusammenhang spielt zwar auch die Verdichtbarkeit des Schüttgutes eine Rolle, sie kann aber vernachlässigt werden. Beim Übergang von einem steilen in einen flachen Trichter liefern die Druckansätze für die beiden Trichtertypen die gleichen Druckverteilungen und Druckwerte. Der Übergang von einem steilen in einen flachen Trichter erfolgt somit gleichmäßig (Neigungswinkel bei dem die Wandreibung gänzlich mobilisiert ist).



Legende

- | | | | |
|---------|-------------------------------------|---------|--|
| 1 | Flacher Trichter | μ_h | Unterer charakteristischer Wert des Wandreibungskoeffizienten |
| 2 | Steiler Trichter | K | Unterer charakteristischer Wert des Horizontallastverhältnisses an den vertikalen Wänden |
| β | halber Scheitelwinkel des Trichters | | |

Bild 6.1 — Grenze zwischen steilem und flachem Trichter

DIN EN 1991-4:2010-12
EN 1991-4:2006 (D)

(2) Die Lasten senkrecht auf die Trichterwände p_{nf} und die Wandreibungslasten p_{tf} an beliebiger Stelle x der Wand eines steilen Trichters sollten für den Lastfall Füllen (siehe Bild 6.2) nach den Gleichungen (6.19) und (6.20) berechnet werden:

$$p_{nf} = F_f p_v \quad (6.19)$$

$$p_{tf} = \mu_h F_f p_v \quad (6.20)$$

wobei F_f über die Gleichung (6.17) berechnet wird.

6.3.3 Entleerungslasten

(1) Im Lastfall Entleeren sollte die mittlere Vertikalspannung an beliebiger Stelle x eines steilen Trichters nach den Gleichungen (6.7) und (6.8) sowie dem Parameter $F = F_e$ berechnet werden.

(2) Der Wert F_e darf entweder durch Verwendung des Referenzverfahrens nach Gleichung (6.21) oder mit dem alternativen Verfahren nach G.10 berechnet werden:

$$F_e = \frac{1 + \sin \phi_1 \cos \varepsilon}{1 - \sin \phi_1 \cos (2\beta + \varepsilon)} \quad (6.21)$$

mit:

$$\varepsilon = \phi_{wh} + \arcsin \left\{ \frac{\sin \phi_{wh}}{\sin \phi_1} \right\} \quad (6.22)$$

$$\phi_{wh} = \arctan \mu_h \quad (6.23)$$

Dabei ist

μ_h der untere charakteristische Wert des Wandreibungskoeffizienten des Trichters;

ϕ_1 der obere charakteristische Wert des Winkels der inneren Reibung des im Trichter gelagerten Schüttgutes.

ANMERKUNG 1 Es ist zu beachten, dass der Wandreibungswinkel des Trichters immer kleiner oder gleich dem Winkel der inneren Reibung des im Trichter gelagerten Schüttgutes ist (d. h. $\phi_{wh} \leq \phi_1$). Da sich sonst innerhalb des Schüttgutes eine Gleitfläche ausbildet, wenn an der Wandkontaktfläche größere Schubspannungen aufnehmbar sind, als durch die innere Reibung des Schüttgutes.

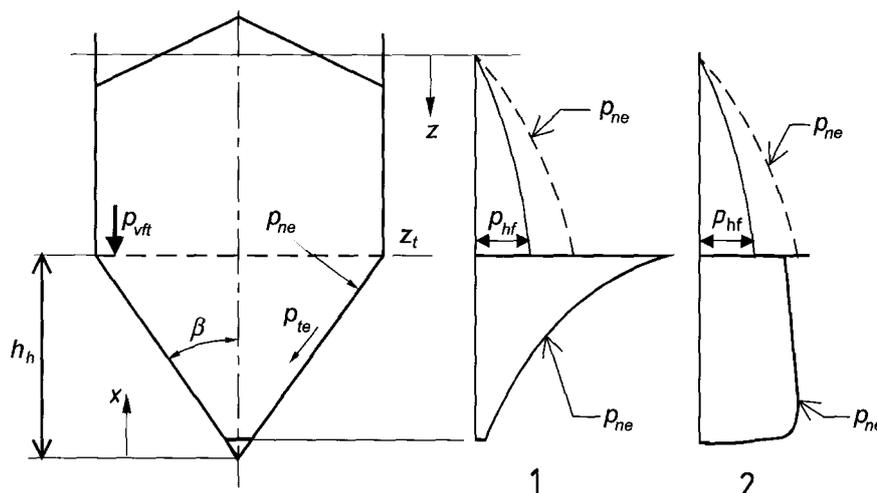
ANMERKUNG 2 Die obige Gleichung (6.21) für F_e basiert auf der einfachen Theorie von Walker für Entleerungsdrücke in Trichtern. Es ist auch möglich, den alternativen Ausdruck für F_e von Enstad zu verwenden, der in G.10 angeführt ist.

(3) Der Druck senkrecht auf die Trichterwände p_{ne} und die Wandreibungslasten p_{te} sollten an jeder Stelle x der Wand eines steilen Trichters für den Lastfall Entleeren (siehe Bild 6.4) nach den Gleichungen (6.24) und (6.25) berechnet werden:

$$p_{ne} = F_e p_v \quad (6.24)$$

$$p_{te} = \mu_h F_e p_v \quad (6.25)$$

wobei F_e dem Absatz (2) zu entnehmen ist.

**Legende**

- 1 Steil
2 Flach

Bild 6.4 — Entleerungsdrücke in einem steilen und einem flach geneigten Trichter

6.4 Flacher Trichter**6.4.1 Mobilisierte Reibung**

(1) In einem flach geneigten Trichter ist die Wandreibung nicht voll mobilisiert. Der mobilisierte oder effektive Wandreibungskoeffizient sollte angesetzt werden als:

$$\mu_{\text{heff}} = \frac{(1-K)}{2 \tan \beta} \quad (6.26)$$

Dabei ist

K der untere charakteristische Wert des Horizontallastverhältnisses im vertikalen Siloschaft, der zu den maximalen Trichterlasten führt (siehe Tabelle 3.1);

β der Trichterneigungswinkel bezogen auf die vertikale Achse (siehe Bild 6.2).

6.4.2 Fülllasten

(1) Im Lastfall Füllen sollte die mittlere Vertikalspannung in jeder Schüttguttiefe eines steilen Trichters nach den Gleichungen (6.7) und (6.8) sowie dem Parameter F_f berechnet werden, mit

$$F_f = 1 - \{b / (1 + \tan \beta / \mu_{\text{heff}})\} \quad (6.27)$$

Der Parameter n in Gleichung (6.8) ergibt sich dann zu:

$$n = S(1-b) \mu_{\text{heff}} \cot \beta \quad (6.28)$$

Dabei ist

μ_{heff} der mobilisierte oder effektive Wandreibungskoeffizient in einem flachen Trichter nach Gleichung (6.26);

b ein empirischer Koeffizient, der zu $b = 0,2$ anzunehmen ist.

Die anderen Parameter sind in 6.1.2 (6) definiert.

DIN EN 1991-4:2010-12
EN 1991-4:2006 (D)

(2) Die Lasten senkrecht auf die Trichterwände p_{nf} und die Wandreibungslasten p_{tf} sollten an beliebiger Stelle x der Wand eines steilen Trichters für den Lastfall Füllen (siehe Bild 6.2) wie folgt berechnet werden:

$$p_{nf} = F_f p_v \quad (6.29)$$

$$p_{tf} = \mu_{heff} F_f p_v \quad (6.30)$$

wobei

F_f sich nach Gleichung (6.27) ergibt.

6.4.3 Entleerungslasten

(1) In flachen Trichtern dürfen die Entleerungslasten senkrecht auf die Trichterwände und die Wandreibungslasten (siehe Bild 6.4) wie im Lastfall Füllen berechnet werden (siehe 6.4.2).

6.5 Trichter in Silos mit Gebläse

(1)P Bei Trichtern, in denen infolge der Verwendung von Gebläsen ein Fluidisieren des Schüttgutes in Teilbereichen oder im gesamten Trichter nicht ausgeschlossen werden kann, sind zusätzliche Lasten infolge des Fluidisierens und die Luftdrücke zu berücksichtigen.

(2) Diese Lasten sollten wie unter 5.5.2 beschrieben ohne einen Ansatz von Wandreibungslasten ermittelt werden.

7 Lasten auf Flüssigkeitsbehälter

7.1 Allgemeines

(1)P Die folgenden Regeln zur Bestimmung der charakteristischen Lasten infolge von in Behältern gelagerten Flüssigkeiten sind anzuwenden.

ANMERKUNG 1 Diese Regel gelten unter statischen Bedingungen für alle Arten von Flüssigkeitsbehältern. Flüssigkeitsbehälter, in denen sich dynamische Vorgänge abspielen, sind nicht einbezogen.

ANMERKUNG 2 Eine Liste von relevanten Einwirkungen, Teilsicherheitsfaktoren und Kombinationen von Einwirkungen auf Flüssigkeitsbehälter können Anhang B entnommen werden.

7.2 Lasten infolge gelagerter Flüssigkeiten

(1) Lasten aus gelagerten Flüssigkeiten sollten unter Berücksichtigung folgender Gesichtspunkte berechnet werden:

- der definierten Bandbreite der Flüssigkeiten, die im Flüssigkeitsbehälter gelagert werden sollen,
- der Geometrie des Flüssigkeitsbehälters,
- der maximal möglichen Einfüllhöhe im Flüssigkeitsbehälter.

(2) Der charakteristische Wert der Last p sollte nach (Gleichung (7.1)) berechnet werden:

$$p(z) = \gamma z \quad (7.1)$$

Dabei ist

- z die Tiefe unterhalb der Flüssigkeitsoberfläche;
- γ Wichte der gelagerten Flüssigkeit.

7.3 Kennwerte der Flüssigkeiten

(1) Es sollten die in EN 1991-1-1, Anhang A angegebenen Wichten verwendet werden.

7.4 Soglasten infolge von unzureichender Belüftung

(1)P Wenn das Belüftungssystem eines Flüssigkeitsbehälters ausfallen kann bzw. störungsanfällig ist, ist eine geeignete Berechnungsmethode anzuwenden, um die während der Entleerung unter Extrembedingungen auftretenden Unterdrücke zu bestimmen. Die Berechnung hat die möglichen adiabatischen Eigenschaften des beschriebenen Prozesses zu berücksichtigen.

Anhang A (informativ)

Grundlagen der Tragwerksplanung — Regeln in Ergänzung zu EN 1990 für Silos und Flüssigkeitsbehälter

REDAKTIONELLE ANMERKUNG Dieser Anhang sollte in EN 1990 „Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkungen auf Tragwerke“ als ein normativer Anhang mit aufgenommen werden.

A.1 Allgemeines

(1) Grundsätzlich ist für die Bemessungsverfahren das in EN 1990 vorgegebene Format anwendbar. Silos und Flüssigkeitsbehälter weisen jedoch gegenüber vielen anderen Gebäuden den wesentlichen Unterschied auf, dass sie die meiste Zeit ihrer Nutzungsdauer den vollen Lasten aus den gelagerten Schüttgütern und Flüssigkeiten ausgesetzt sind.

(2) Dieser Anhang liefert zusätzliche Regeln für die Teilsicherheitsfaktoren der Einwirkungen (γ_F -Beiwerte) und der Kombinationen mit anderen Einwirkungen sowie für die relevanten Kombinationsbeiwerte (ψ -Beiwerte) für Silos und Flüssigkeitsbehälter.

(3) Die möglichen Temperatureinwirkungen schließen klimatische Wirkungen und Wirkungen aus heißem Schüttgut ein. Die folgenden Bemessungssituationen sollten berücksichtigt werden:

- Heiße Schüttgüter, die in teilgefüllte Silos oder Behälter eingefüllt werden. Hierbei sollten die Auswirkungen der Erhöhung der Lufttemperatur oberhalb des Schüttgutes beachtet werden.
- Verformungsbehinderung der Silowandkonstruktion durch das Schüttgut beim Abkühlen.

(4) Bei der Ermittlung der Auswirkung unterschiedlicher Setzungen in Silobatterien oder Gruppierungen von Silozellen oder Flüssigkeitsbehältern sollte von der ungünstigsten Kombination von gefüllten und leeren Zellen ausgegangen werden.

A.2 Grenzzustand der Tragfähigkeit

A.2.1 Teilsicherheitsbeiwerte γ

(1) Für die Bemessung von Silos und Flüssigkeitsbehältern dürfen die Werte nach EN 1990, A.1 angesetzt werden.

(2) Wenn die maximale Füllhöhe und die größten anzusetzenden Wichten der zur Lagerung vorgesehenen Flüssigkeiten nicht überschritten werden können, darf der Sicherheitsbeiwert γ_F von 1,50 auf 1,35 reduziert werden.

A.2.2 Kombinationsbeiwerte ψ

Die Kombinationsbeiwerte ψ für Silolasten und Lasten in Flüssigkeitsbehälter und die Kombinationsbeiwerte mit anderen Einwirkungen werden in A.4 angegeben.

A.3 Einwirkungskombinationen

(1) Beim Nachweis des Grenzzustandes der Tragfähigkeit eines Silos sollten folgende Einwirkungen betrachtet werden:

- Füllen und Lagern von Schüttgütern (siehe Fülllasten in EN 1991-4);
- Entleeren von Schüttgütern (siehe Entleerungslasten in EN 1991-4);
- Eigen- und Nutzlasten (siehe EN 1991-1-1);
- Schnee- und Eislasten (siehe EN 1991-1-3);
- Windeinwirkungen, sowohl bei gefülltem als auch bei leerem Silo (siehe EN 1991-1-4);
- Temperatureinwirkungen (siehe EN 1991-1-5);
- Zwangsverformungen (eingeprägte Verformungen): Setzungen im Gründungsbereich (siehe EN 1997);
- Erdbeben (siehe EN 1998);
- Lasten aus Staubexplosion.

A.4 Bemessungssituation und Einwirkungskombinationen für die Anforderungsklassen 2 und 3

(1) Die vorherrschenden (dominierenden) und die ständigen Einwirkungen sollten für jeden Lastfall mit ihren vollen Werten angesetzt werden, während die begleitenden Einwirkungen durch die Kombinationsbeiwerte ψ reduziert werden können, um der geringeren Wahrscheinlichkeit eines gleichzeitigen Auftretens in Übereinstimmung mit EN 1990 Rechnung zu tragen. Die Kombinationen sollten in Übereinstimmung mit den Regeln von EN 1990 gewählt werden.

(2) In allen angeführten Lastkombinationen sollten die Kombinationsbeiwerte $\psi_{0,1}$ zu 1,0 und $\xi_1 = 0,9$ angenommen werden.

(3) Handelt es sich bei den dominierenden Einwirkungen um Erdbeben- oder Außergewöhnliche Lasteinwirkungen, darf unter der Voraussetzung, dass die geeigneten Verfahren nach 5.1, 5.3 und 6.1 angewendet werden, die begleitende Einwirkung der Schüttgutlasten mit den Mittelwerten des Wandreibungskoeffizienten μ_m , des Horizontallastverhältnisses K_m und des Trichterlastverhältnisses F_m berechnet werden.

ANMERKUNG Die Werte von ψ dürfen in Nationalen Anhängen festgelegt werden. Die Werte und die Kombinationen der Tabellen A.1, A.2, A.3, A.4 und A.5 sind Empfehlungen, die mit den begleitenden Einwirkungen 2 und 3 durch deren geeigneten Kombinationsbeiwert ψ reduziert werden.

DIN EN 1991-4:2010-12
EN 1991-4:2006 (D)

Tabelle A.1 — Zu betrachtende Bemessungssituationen und Kombinationen von Einwirkungen

Kurzbezeichnung	Bemessungssituation / vorherrschende Einwirkung 1	Ständige Lasten	Begleitende Einwirkung 2	$\psi_{0,2}$	Begleitende Einwirkung 3	$\psi_{0,3}$
D	Schüttgutentleerung	Eigengewicht	Fundamentsetzungen	1,0	Schnee oder Wind oder Temperatur	0,6
					Nutzlasten oder Verformungen	0,7
I	Nutzlasten oder Verformungen	Eigengewicht	Schüttgutfüllung (Silo voll)	1,0	Schnee oder Wind oder Temperatur	0,6
S	Schnee	Eigengewicht	Schüttgutfüllung	1,0		
WF	Wind bei gefülltem Silo	Eigengewicht	Schüttgutfüllung	1,0		
WE	Wind bei leerem Silo	Eigengewicht	Keine Schüttgutfüllung (Silo leer)	0,0		
T	Temperatur	Eigengewicht	Schüttgutfüllung	1,0		
F	Fundamentsetzungen	Eigengewicht	Schüttgutentleerung	1,0	Schnee oder Wind oder Temperatur	0,6
				$\psi_{2,2}$		$\psi_{2,3}$
E	Explosion	Eigengewicht	Schüttgutfüllung	0,9	Nutzlasten oder Verformungen	0,3
V	Fahrzeuganprall	Eigengewicht	Schüttgutfüllung	0,8	Nutzlasten oder Verformungen	0,3

ANMERKUNG 1 Diese Tabelle bezieht sich auf Begriffe der Lastkombinationsregeln auf EN 1990, Abschnitt 6.

ANMERKUNG 2 Die Indizes der Lastkombinationsbeiwerte ψ haben folgende Bedeutung: Erster Index steht für den Typ der Bemessungssituation: normale Kombinationen sind mit 0; häufige Werte mit 1; quasi-ständige Werte mit 2 bezeichnet. Der zweite Index bezieht sich auf die Lastnummer in der Kombination.

Tabelle A.2 — „Allgemeiner“ Grenzzustand der Tragfähigkeit („Ordinary“ ULS) — Zu betrachtende Bemessungssituationen und Kombinationen von Einwirkungen

Kurzbezeichnung	Bemessungssituation / vorherrschende Einwirkung	Ständige Einwirkungen		Leitende veränderliche Einwirkung		Unabhängige veränderliche Einwirkung 1 (Haupt-)		Unabhängige veränderliche Einwirkung 2		Unabhängige veränderliche Einwirkung 3, 4 usw.	
		Beschreibung	ξ_1	(siehe nächste Spalte, „Haupt-“)	Beschreibung	$\psi_{0,1}$	Beschreibung	$\psi_{0,2}$	Beschreibung	$\psi_{0,3}$ $\psi_{0,4}$ usw.	
D	Schüttgutentleerung	Eigen-gewicht	0,9		Schüttgutentleerung (voller Silo)	1,0	Fundamentsetzungen	0,7	Schnee, Wind, Temperatur	0,6	
									Nutzlasten oder Verformungen	0,7	
I	Eingeprägte Verformungen	Eigen-gewicht	0,9		Schüttgut-füllung (Silo voll gefüllt)	1,0	Eingeprägte Verformungen	0,7	Schnee, Wind, Temperatur	0,6	
									Nutzlasten	0,7	
S	Schnee	Eigen-gewicht	0,9		Schüttgut-füllung (Silo voll)	1,0	Schnee	0,6	Nutzlasten	0,7	
WF	Wind und gefüllter Silo	Eigen-gewicht	0,9		Schüttgut-füllung, Silo voll gefüllt	1,0	Wind	0,6	Nutzlasten	0,7	
WE	Wind und leerer Silo	Eigen-gewicht	0,9		Kein Schüttgut im Silo	0,0	Wind	0,6	Nutzlasten	0,7	
T	Temperatur	Eigen-gewicht	0,9		Schüttgut-füllung (Silo voll)	1,0	Temperatur	0,6	Nutzlasten	0,7	

ANMERKUNG Tabelle A.2 sollte unter Verwendung der Gleichungen (6.10a) und (6.10b) von EN 1990, 6.4.3.2 verwendet werden.

Tabelle A.3 — Grenzzustand der Tragfähigkeit für außergewöhnliche Lasten („Accidental“ ULS) - Zu betrachtende Bemessungssituationen und Kombinationen von Einwirkungen

Kurzbezeichnung	Bemessungssituation / vorherrschende Einwirkung	Ständige Einwirkungen		Leitende veränderliche Einwirkung		Unabhängige veränderliche Einwirkung 1 (Haupt-)		Unabhängige veränderliche Einwirkung 2		Unabhängige veränderliche Einwirkung 3, 4 usw.	
		Beschreibung		Beschreibung	Beschreibung	$\psi_{1,1}$ oder $\psi_{2,1}$	Beschreibung	$\psi_{2,2}$	Beschreibung	$\psi_{2,3}$ $\psi_{2,4}$ usw.	
E	Explosion	Eigen-gewicht		Druckwelle	Schüttgut-füllung, Silo voll gefüllt	0,9 oder 0,8	Eingeprägte Verformungen	0,3	Nutzlasten	0,3	
V	Fahrzeuganprall	Eigen-gewicht		Fahrzeuganprall	Schüttgut-füllung, Silo voll gefüllt	0,9 oder 0,8	Eingeprägte Verformungen	0,3	Nutzlasten	0,3	

ANMERKUNG Tabelle A.3 sollte unter Verwendung der Gleichungen (6.11b) von EN 1990, 6.4.3.3 verwendet werden.

DIN EN 1991-4:2010-12
EN 1991-4:2006 (D)

**Tabelle A.4 — Grenzzustand der Tragfähigkeit bei seismischer Beanspruchung („Seismic“ ULS) —
 Zu betrachtende Bemessungssituationen und Kombinationen von Einwirkungen**

Kurzbezeichnung	Bemessungssituation / vorherrschende Einwirkung	Ständige Einwirkungen	Leitende veränderliche Einwirkung	Unabhängige veränderliche Einwirkung 1 (Haupt-)		Unabhängige veränderliche Einwirkung 2		Unabhängige veränderliche Einwirkung 3, 4 usw.	
		Beschreibung	Beschreibung	Beschreibung	$\psi_{2,1}$	Beschreibung	$\psi_{2,2}$	Beschreibung	$\psi_{2,3}$ $\psi_{2,4}$ usw.
SF	Seismische Einwirkung und gefüllter Silo	Eigen-gewicht	Seismische Einwirkung (Erdbeben)	Schüttgut-füllung, Silo voll gefüllt	0,8	Eingeprägte Verformungen	0,3	Nutzlasten	0,3
SE	Seismische Einwirkung und leerer Silo	Eigen-gewicht	Seismische Einwirkung (Erdbeben)	Kein Schüttgut im Silo (Silo leer)	0,8	Eingeprägte Verformungen	0,3	Nutzlasten	0,3

ANMERKUNG Tabelle A.4 sollte unter Verwendung der Gleichung (6.12b) von EN 1990, 6.4.3.4 und der entsprechenden Gleichungen von EN 1998-1 und EN 1998-4 verwendet werden.

Tabelle A.5 — Grenzzustand der Gebrauchsfähigkeit (SLS) — Zu betrachtende Bemessungssituationen und Kombinationen von Einwirkungen

Kurzbezeichnung	Bemessungssituation / vorherrschende Einwirkung	Ständige Einwirkungen	Leitende veränderliche Einwirkung	Unabhängige veränderliche Einwirkung 1 (Haupt-)		Unabhängige veränderliche Einwirkung 2		Unabhängige veränderliche Einwirkung 3, 4 usw.		
				Beschreibung	$\psi_{1,1}$ oder $\psi_{2,1}$	Beschreibung	$\psi_{0,2}$ oder $\psi_{2,2}$	Beschreibung	$\psi_{0,3}$ oder $\psi_{0,4}$ oder $\psi_{2,3}$ oder $\psi_{2,4}$ usw.	
D	Schüttgutentleerung	Eigen-gewicht			Schüttgutentleerung	0,9 oder 0,8	Fundamentsetzungen	0,7 oder 0,3	Schnee, Wind, Temperatur	0,6 oder 0,0
									Nutzlasteneingeprägte Verformungen	0,7 oder 0,3
I	Eingeprägte Verformungen	Eigen-gewicht			Schüttgut-füllung	0,9 oder 0,8	Eingeprägte Verformungen	0,7 oder 0,3	Schnee, Wind, Temperatur	0,6 oder 0,0
									Nutzlasten	0,7 oder 0,3
S	Schnee	Eigen-gewicht			Schüttgut-füllung	0,9 oder 0,8	Schnee	0,6 oder 0,0	Nutzlasten	0,7 oder 0,3
WF	Wind und voll gefüllter Silo	Eigen-gewicht			Schüttgut-füllung, Silo voll gefüllt	0,9 oder 0,8	Wind	0,6 oder 0,0	Nutzlasten	0,7 oder 0,3
WE	Wind und leerer Silo	Eigen-gewicht			Kein Schüttgut im Silo, Silo leer	0,0	Wind	0,6 oder 0,0	Nutzlasten	0,7 oder 0,3
T	Temperatur	Eigen-gewicht			Schüttgut-füllung	0,9 oder 0,8	Temperatur	0,6 oder 0,0	Nutzlasten	0,7 oder 0,3

ANMERKUNG Tabelle A.5 sollte unter Verwendung der Gleichungen (6.14b), (6.15b) und (6.16b) von EN 1990, 6.5.3 wie folgt verwendet werden:

Seltene (charakteristische) Kombination, Gleichung (6.14b): Die seltene (charakteristische) Kombination wird üblicherweise für nicht umkehrbare (bleibende) Grenzzustände verwendet.

Häufige Kombination, Gleichung (6.15b): Die häufige Kombination wird üblicherweise für umkehrbare (nicht bleibende) Grenzzustände verwendet.

Quasi-ständige Kombination, Gleichung (6.16b): Die quasi-ständige Kombination wird üblicherweise für Situationen mit Langzeitauswirkungen und -erscheinungen auf das Tragwerk verwendet.

DIN EN 1991-4:2010-12
EN 1991-4:2006 (D)

A.5 Einwirkungskombinationen für die Anforderungsklasse 1

(1) Für Silos der Anforderungsklasse 1 dürfen die folgenden vereinfachten Bemessungssituationen angenommen werden:

- Füllen
- Entleeren
- Wind bei leerem Silo
- Silo voll gefüllt und Wind
- Schnee (für das Dach)

(2) Beim Lastfall Wind ist die Anwendung der vereinfachten Regeln von EN 1991-1-4 erlaubt.

Anhang B (informativ)

Einwirkungen, Teilsicherheitsfaktoren und Kombinationsbeiwerte der Einwirkungen auf Flüssigkeitsbehälter

REDAKTIONELLE ANMERKUNG Dieser Anhang sollte in EN 1990 „Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkungen auf Tragwerke“ als ein normativer Anhang mit aufgenommen werden.

B.1 Allgemeines

- (1)P Die Bemessung hat die charakteristischen Werte der Einwirkungen der Zusammenstellung B.2.1 bis B.2.14 zu berücksichtigen.
- (2) Auf diese charakteristischen Werte sollten die Teilsicherheitsbeiwerte der Einwirkungen nach B.3 und die Kombinationsregeln nach B.4 angewendet werden.

B.2 Einwirkungen

B.2.1 Lasten aus gelagerten Flüssigkeiten

- (1)P Während des Betriebs sind als Lasten infolge der Befüllung die Eigengewichtslasten des eingefüllten Produkts vom maximalen Füllstand bis zum völlig entleerten Zustand anzusetzen.
- (2)P Während der Probefüllung sind als Lasten infolge der Befüllung die Eigengewichtslasten des bei der Probefüllung eingefüllten Mediums vom maximalen Füllstand bis zum völlig entleerten Zustand anzusetzen.

B.2.2 Lasten aus Innendrücken

- (1)P Während des Betriebs sind unter „Lasten aus Innendruck“ die Lasten in Bezug auf die spezifischen Minimal- und Maximalwerte der Innendrücke zu verstehen.
- (2)P Während der Probefüllung sind unter „Lasten aus Innendruck“ die Lasten in Bezug auf die spezifischen Minimal- und Maximalwerte der Innendrücke während des Versuchs zu verstehen.

B.2.3 Lasten aus Temperatur(-änderung)

- (1) Spannungen aus Zwängungen infolge von Temperaturdehnungen dürfen vernachlässigt werden, wenn die Anzahl der Lastzyklen der Temperaturdehnungen zu keinem Risiko einer Ermüdung oder eines zyklischen plastischen Versagens führt.

B.2.4 Eigengewichtslasten

- (1)P Als Eigengewichtslast von Flüssigkeitsbehältern ist die Resultierende der Eigengewichte aller Einzelbauteile des Behälters und der an diesen befestigten Komponenten anzusetzen.
- (2) Rechenwerte sollten EN 1991-1-1, Anhang A entnommen werden.

DIN EN 1991-4:2010-12
EN 1991-4:2006 (D)

B.2.5 Lasten aus Dämmung

- (1)P Als Lasten infolge von Dämmungen sind die Eigengewichte der Dämmungen anzusetzen.
- (2) Rechenwerte sollten EN 1991-1-1, Anhang A entnommen werden.

B.2.6 Verteilte Nutzlasten

- (1) Die verteilt anzusetzenden Lasten aus der Nutzung sollten EN 1991-1-1 entnommen werden, außer sie werden vom Auftraggeber spezifiziert.

B.2.7 Konzentrierte Nutzlasten

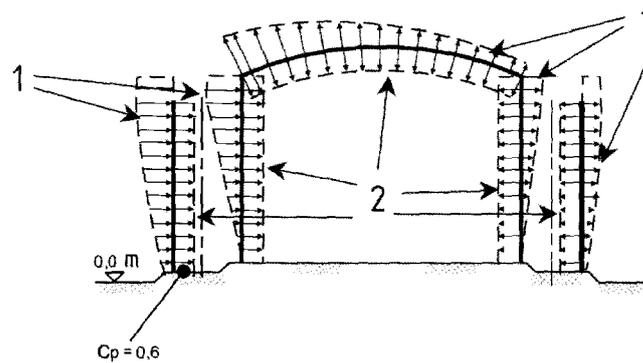
- (1) Konzentrierte Einzellasten aus der Nutzung sollten EN 1991-1-1 entnommen werden, außer sie werden vom Auftraggeber spezifiziert.

B.2.8 Schnee

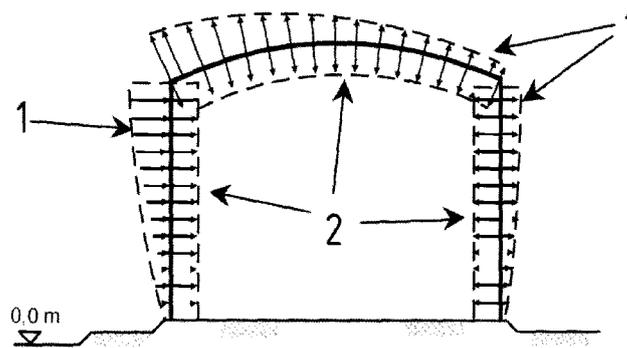
- (1) Die Schneelasten sollten EN 1991-1-3 entnommen werden.

B.2.9 Wind

- (1) Die Lasten aus Wind sollten EN 1991-1-4 entnommen werden.
- (2) Zusätzlich dürfen die folgenden Druckkoeffizienten für kreisförmige zylindrische Flüssigkeitsbehälter angenommen werden (siehe Bild B.1):
 - a) Innendruck bei oben offenen Flüssigkeitsbehältern und oben offenen Auffangbehältern: $c_p = -0,6$.
 - b) Innendruck bei belüfteten Flüssigkeitsbehältern mit kleinen Öffnungen: $c_p = -0,4$.
 - c) Wenn ein Auffangbehälter vorhanden ist, darf der außen auf den Flüssigkeitsbehälter wirkende Druck als mit der Höhe linear von oben nach unten abnehmend angesetzt werden.
- (3) Entsprechend ihres temporären Charakters dürfen während der Bauphase reduzierte Windlasten entsprechend EN 1991-1-4 und EN 1991-1-6 angesetzt werden.



a) Flüssigkeitsbehälter mit Auffangwanne



b) Flüssigkeitsbehälter ohne Auffangwanne

Legende

- 1 C_p nach EN 1991-1-4
2 $C_p = 0,4$ ausschließlich bei Belüftung

Bild B.1 — Druckkoeffizienten für Windlasten auf einem kreisförmigen zylindrischen Flüssigkeitsbehälter**B.2.10 Unterdruck durch unzureichende Belüftung**

(1)P Die Lasten infolge einer unzureichenden Belüftung sollten nach Abschnitt 7 angesetzt werden.

B.2.11 Seismische Lasten

(1)P Seismische Lasten sind nach EN 1998-4 anzusetzen, welche auch weitere Anforderungen für eine adäquate Bemessung vorgibt.

B.2.12 Lasten aus Verbindungsbauten

(1)P Lasten aus Rohrleitungen, Klappen oder anderen Gegenständen und Lasten resultierend aus Setzungen von relativ zu der Gründung des Flüssigkeitsbehälters unabhängigen Gebäudegründungen sind zu berücksichtigen. Rohrleitungsanlagen sind so zu konstruieren, dass nur so wenig wie möglich Lasten auf die Flüssigkeitsbehälter wirken.

DIN EN 1991-4:2010-12
EN 1991-4:2006 (D)

B.2.13 Lasten aus ungleichförmigen Setzungen

(1)P Lasten aus Setzungen sind zu berücksichtigen, wenn im Zeitraum der vorgesehenen Nutzung das Auftreten von ungleichmäßigen Setzungen zu erwarten ist.

B.2.14 Katastrophenlasten

(1) Diese Lasten sollten Folgen von Ereignissen wie äußere Druckwellen, Stoßbeanspruchung, Brandbeaufschlagung, Explosion, Undichtigkeiten des inneren Flüssigkeitsbehälters, Überschwappen und Überfüllung des inneren Tanks berücksichtigen.

ANMERKUNG Die Lasten dürfen im Nationalen Anhang spezifiziert werden, oder durch den jeweiligen Auftraggeber eines speziellen Projektes angegeben werden.

B.3 Teilsicherheitsbeiwerte der Einwirkungen

(1)P Auf die Einwirkungen von B.2.2 bis B.2.14 sind die Teilsicherheitsbeiwerte nach EN 1990 anzuwenden.

(2) Es wird empfohlen, den Teilsicherheitsbeiwert für Lasten aus Flüssigkeiten für den Betrieb (B.2.1 (1)) mit $\gamma_F = 1,20$ anzusetzen.

(3) Es wird empfohlen, den Teilsicherheitsbeiwert für Lasten aus Flüssigkeiten während der Probebefüllung (B.2.1 (2)) mit $\gamma_F = 1,00$ anzusetzen.

(4) Bei Bemessungssituationen für außergewöhnliche Einwirkungen wird empfohlen, für variable Einwirkungen den Teilsicherheitsbeiwert mit $\gamma_F = 1,00$ anzusetzen.

B.4 Kombinationen von Einwirkungen

(1)P Es ist den allgemeinen Anforderungen von EN 1990, Abschnitt 6 zu folgen.

(2) Nutzlasten und Lasten aus Schnee müssen nicht als gleichzeitig wirkend angesetzt werden.

(3) Seismische Einwirkungen müssen während der Versuchsbefüllung nicht betrachtet werden.

(4) Katastropheneinwirkungen müssen während der Versuchsbefüllung nicht betrachtet werden. Es sind aber die Kombinationsregeln für außergewöhnliche Lasten nach EN 1990 zu berücksichtigen.

Anhang C (normativ)

Messung von Schüttgutkennwerten für die Ermittlung von Silolasten

C.1 Allgemeines

(1) Dieser Anhang beschreibt Prüfverfahren, die in dieser Norm ausschließlich zur Ermittlung von Schüttgutkennwerten für die Ermittlung der Lasten in Silos eingeführt werden. Diese Verfahren sind nicht für die Auslegung von Silos hinsichtlich der Sicherstellung eines zuverlässigen Schüttgutfließens anwendbar. Das der Ermittlung der Schüttgutkennwerte zugrunde zu legende Druckniveau ist bei der Bestimmung der Schüttgutlasten viel höher anzusetzen als bei den schüttgutmechanischen Betrachtungen zum Schüttgutfließen, weil die untersuchte Schüttgutprobe den maßgeblichen Bedingungen in den Schüttgutbereichen mit hohen Drücken genügen muss. Daraus folgt, dass die Probenvorbereitung in einigen prinzipiellen Vorgehensweisen von der in Schüttgutmechanik üblichen abweichen muss.

(2) Bei den Vorbereitungen der Probe zur Erzielung einer repräsentativen Schüttgutpackung sollten hohe Lagerungsdichten angestrebt werden. Alle Parameter, die die Silolasten beeinflussen, sollten unter dieser Bedingung ermittelt werden, weil diese Bedingung der hohen Lagerungsdichte den Referenzzustand für die oberen charakteristischen Werte der Einwirkungen auf die Silokonstruktion beschreibt.

C.2 Anwendung

(1) Die in diesem Anhang beschriebenen Prüfverfahren sind für die Anwendung bei der Bemessung von Silos der Anforderungsklasse 3 und bei Schüttgütern angegeben, die nicht in Tabelle E.1 enthalten sind. Sie können auch zur Ermittlung der Schüttgutkennwerte als Alternative zu den in Tabelle E.1 angegebenen Werten herangezogen werden. Die Bezugsspannungen in den Versuchen wirken entweder in vertikaler oder in horizontaler Richtung. Sie sollen repräsentative Spannungen wiedergeben, wie sie im gespeicherten Schüttgut z. B. im Bereich des Trichterübergangs unter dem Lastfall Füllen vorherrschen.

(2) Die Prüfverfahren dürfen auch zur Messung von allgemeingültigen Schüttgutkennwerten zur Bemessung von Silos angewendet werden, also nicht nur für eine spezielle Silogeometrie. Versuche, die allgemeingültige Schüttgutkennwerte für die Bemessung von unterschiedlichen Silos liefern sollen, sollten unter Zugrundelegung folgender Referenzdruckniveaus durchgeführt werden:

- a) zur Berücksichtigung der Vertikaldrücke (C.6, C.8 und C.9): Referenzspannung $\sigma_r = 100 \text{ kPa}$
- b) zur Berücksichtigung der Horizontaldrücke (C.7.2): Referenzspannung $\sigma_r = 50 \text{ kPa}$

C.3 Symbole

In diesem Anhang werden folgende Symbole verwendet:

- a Umrechnungsfaktoren für die Schüttgutkennwerte zur Berücksichtigung der Streuung
- c Kohäsion (siehe Bild C.4)
- D innerer Durchmesser der Versuchszelle
- F_r Restscherwiderstand (-kraft) am Ende der Wandreibungsversuche (siehe Bild C.2b))
- K_{mo} Mittelwert des Horizontallastverhältnisses bei glatten Wänden

DIN EN 1991-4:2010-12 EN 1991-4:2006 (D)

- Δ Verschiebung des oberen Teils der Scherzelle während des Scherversuchs
- ϕ_i Winkel der inneren Reibung bei Belastung der Probe (Winkel der Gesamtscherfestigkeit)
- ϕ_c Winkel der inneren Reibung bei einer Entlastung der Probe („wirksamer innerer Reibungswinkel“)
- μ Koeffizient der Reibung zwischen Schüttgut- und Wandprobe (Wandreibungskoeffizient)
- σ_r Referenzspannung
- τ_a in einem Scherversuch gemessene Restscherfestigkeit nach Erhöhung der Normalspannung (siehe Bild C.4) (bei Erstbelastung)
- τ_b in einem Scherversuch gemessene maximale Scherfestigkeit nach Reduzierung der Normalspannung (siehe Bild C.4) (bei Entlastung)
- τ in einem Scherversuch gemessene Scherspannung

C.4 Begriffe

Für die Anwendung dieses Anhangs gelten folgende Begriffe.

C.4.1

sekundäre Parameter

Jeder Parameter, der die Kennwerte des gespeicherten Materials beeinflussen kann, aber nicht unter den Haupteinflussfaktoren für die Streuung der Kennwerte aufgeführt ist. Sekundäre Parameter sind z. B. die Zusammensetzung, die Kornabstufung (Korngrößenverteilung), der Feuchtigkeitsgehalt, die Temperatur, das Alter, die elektrische Aufladung während des Betriebs und die Produktionsmethoden. Streuungen in den unter C.2 definierten Referenzspannungen sollten als sekundäre Parameter betrachtet werden.

C.4.2

Probenahme

Die Auswahl von repräsentativen Proben des zur Lagerung vorgesehenen Schüttgutes oder des Materials der Silowand unter Einbezug der Veränderlichkeit derer Eigenschaften mit der Zeit.

C.4.3

Referenzspannung

Die Referenzspannung ist der Spannungszustand, bei welchem die Messungen der Schüttgutkennwerte durchgeführt werden. Die Referenzspannung wird üblicherweise so ausgewählt, dass sie dem nach dem Füllen des Silos im Schüttgut vorherrschenden Spannungsniveau entspricht. Manchmal kann es notwendig sein, die Referenzspannung über mehr als nur eine Hauptspannung zu definieren.

C.5 Probenahme und Probenvorbereitung

(1) Die Versuche sollten mit repräsentativen Proben der zur Lagerung im Silo vorgesehenen Schüttgütern durchgeführt werden.

(2) Die Auswahl der Probe sollte unter einer geeigneten Betrachtung der während der Nutzungsdauer des Silos möglichen Änderungen der Schüttgutparameter, außerdem der Änderungen infolge von sich wechselnden Umgebungsbedingungen, der Auswirkungen der Verfahren des Silobetriebes und der Auswirkungen von Entmischungen des Schüttgutes im Silo erfolgen.

(3) Der Mittelwert jedes Schüttgutkennwertes sollte unter Berücksichtigung einer geeigneten Streuung der relevanten sekundären Parameter bestimmt werden.

(4) Die Referenzspannung σ_r sollte für jeden Versuch im Verhältnis zu dem Spannungszustand im gespeicherten Schüttgut ermittelt werden. Der Wert der Referenzspannung muss jedoch nicht genau definiert sein.

ANMERKUNG Eine präzise Ermittlung der Referenzspannung würde bedeuten, dass das Versuchsergebnis vor Durchführung der Versuche bekannt sein müsste. Die Berücksichtigung eines präzisen Wertes der Referenzspannung ist für die Interpretation der Versuchsergebnisse nicht kritisch. Die Versuche sollten aber unter einem Spannungsniveau durchgeführt werden, welches für den Anwendungszweck, für den die Versuche durchzuführen sind, angemessen ist.

(5) Für die Versuche nach C.6, C.7.2, C.8.1 und C.9 sollte das nachfolgend beschriebene Verfahren zur Vorbereitung der Probe durchgeführt werden.

(6) Die Probe sollte ohne Vibrationen oder anderen Maßnahmen, die zur Verdichtung der Probe führen, in die Versuchszelle eingefüllt werden und mit der Referenzspannung σ_r belastet werden. Um die Probe zu konsolidieren, sollte eine Deckplatte in und gegen Uhrzeigerrichtung mehrere Male in einem Winkel von etwa 10° um ihre vertikale Achse hin und her gedreht werden („Twisten“).

ANMERKUNG 1 Bezüglich des Vorgehens sei auf den ASTM Standard D6128 verwiesen.

ANMERKUNG 2 Die Anzahl der erforderlichen Drehungen („Twists“) hängt von dem zu prüfenden Schüttgut ab.

(7) Die Mittelwerte aus den Versuchen sollten mit einem Umrechnungsfaktor versehen werden, um Extremwerte abzuleiten. Die Umrechnungsfaktoren sollten so gewählt werden, dass sie den Einfluss der sekundären Parameter, die Veränderlichkeit der Schüttgutkennwerte mit der Betriebsdauer und die Ungenauigkeiten bei der Probennahme berücksichtigen.

(8) Der Umrechnungsfaktor a eines Schüttgutkennwertes sollte angepasst werden, falls der Einfluss eines der sekundären Parameter mehr als 75 % der Streubreite beträgt, die durch den Umrechnungsfaktor (Konversionsfaktor) abgedeckt wird.

C.6 Bestimmung der Schüttgutwichte γ

C.6.1 Kurzbeschreibung

(1) Die Schüttgutwichte γ wird an einer konsolidierten („überkritisch“ verdichteten) Schüttgutprobe bestimmt.

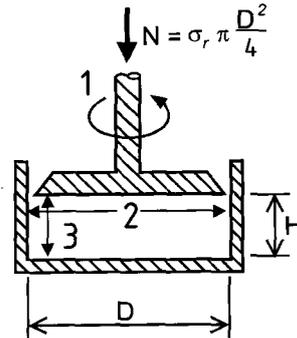
ANMERKUNG Mit dieser Prüfung soll eine gute Abschätzung der sich im Silo einstellenden maximalen Schüttgutdichte erreicht werden. Das Ziel wird dadurch erreicht, dass die Dichte ermittelt wird, die sich nach Belastung der Schüttgutprobe mit dem nach dem Füllen des Silos vorherrschenden Druckniveau maximal einstellt. Um dies zu erreichen, ist es erforderlich, das Schüttgut in die Versuchszelle so einzufüllen, dass sich eine geeignete dichte Schüttgutpackung einstellt, bevor die Konsolidierungsspannung auf die Probe aufgebracht wird. Dies kann entweder dadurch erreicht werden, dass das Schüttgut über das „Regenfüllverfahren“ in die Scherzelle eingefüllt wird, oder über eine Vorbehandlung der Probe durch das beschriebene „Twisten“ der Deckplatte. Dadurch soll eine Schüttgutdichte in der Messzelle erzielt werden, die für die Bedingungen im Hinblick auf die Ermittlung der Silolasten repräsentativ ist. Diese Prozedur weicht wesentlich von dem Verfahren ab, welches im ASTM D6683-01 angegeben ist, weil dort hauptsächlich staubförmige Schüttgüter mit dem Ziel, eine möglichst geringe Dichte zu erreichen, behandelt werden.

C.6.2 Prüfgerät

(1) Zur Bestimmung des Gewichts und Volumens einer Schüttgutprobe wird eine Scherzelle nach Bild C.1 angewendet. Der Zellendurchmesser D sollte mindestens das 5fache des maximalen Schüttgutkorn-durchmessers betragen und darf nicht kleiner als das 10fache der mittleren Korngröße sein. Die Höhe H der komprimierten Probe sollte zwischen $0,3D$ und $0,4D$ liegen.

ANMERKUNG Diese Einschränkungen in Bezug auf die Korngröße des Schüttgutes sind aus folgenden Gründen gewählt: Die begrenzte maximale Schüttgutkorngröße soll sicherstellen, dass die Beeinträchtigungen im Hinblick auf die Anordnung und Orientierung der Schüttgutkörner infolge des Einflusses der begrenzenden Wand nicht zu groß wird. Darüber hinaus ist bekannt, dass dieser Einfluss für den Fall größer ist, dass die Partikel alle in etwa die gleiche Größe haben, als in dem Fall, dass die kleineren Partikel die Zwischenräume zwischen den größeren Partikeln einnehmen können. Aus diesem Grund ist bei gleichmäßigen Partikelgrößen die Restriktion auf die 10fache Partikelgröße und bei einer breiten Verteilung Partikelgrößen die Restriktion auf das 5fache der maximalen Partikeldurchmesser maßgebend.

DIN EN 1991-4:2010-12
EN 1991-4:2006 (D)



Legende

- 1 genormtes Drehen
- 2 Oberfläche, glatt
- 3 Oberfläche, rau

Bild C.1 — Vorrichtung zur Bestimmung von γ

C.6.3 Durchführung

- (1) Die Referenzspannung σ_r sollte dem vertikalen Druckniveau des im Silo gespeicherten Schüttgutes ρ_v entsprechen.
- (2) Die Probenvorbereitung sollte nach dem Verfahren in C.5 erfolgen. Die Wichte der Probe wird über den Quotienten von gemessenem Gewicht der konsolidierten Probe und vom Schüttgut eingenommenen Volumen bestimmt. Die Probenhöhe H wird als Mittelwert von drei Messungen bestimmt, die in gleicher radialer Entfernung zum Mittelpunkt der Zelle innerhalb von drei in Umfangsrichtung zu wählenden 120°-Sektorenabschnitten gemessen wird.

ANMERKUNG Die nach dem Verfahren nach ASTM D6683 ermittelten Dichten können geringer ausfallen. Die Abweichung ist bei staubförmigem Schüttgut im Allgemeinen gering, bei grobkörnigem Schüttgut kann sie aber signifikante Beträge annehmen.

C.7 Wandreibung

C.7.1 Allgemeines

- (1) Es wird zwischen folgenden beiden Parametern unterschieden:
 - Koeffizient der Wandreibung μ_m für die Ermittlung der Lasten (Wandreibungskoeffizient);
 - Wandreibungswinkel ϕ_{wh} zur Beurteilung des Fließverhaltens.
- (2) Bei Schüttgütern mit einer breiten Korngrößenverteilung, die während des Füllvorganges zum Entmischen neigen, sollte die Auswahl der Materialproben zur Bestimmung des Wandreibungskoeffizienten μ_m unter Berücksichtigung von möglichen Materialentmischungen vorgenommen werden.
- (3) Wandreibungsversuche sollten mit Wandprobenstücken durchgeführt werden, die repräsentativ für das Material der Wandoberflächen der Silokonstruktion sind.

ANMERKUNG Obwohl die Versuchslaboratorien unter Umständen mit einer großen Bandbreite von Konstruktions- und Auskleidungsmaterialien ausgestattet sind, können die individuellen Wandprobenstücke Oberflächenbearbeitungen aufweisen, die sich von der Oberflächenbeschaffenheit zum Zeitpunkt der Siloherstellung unterscheiden. Wandprobenstücke mit nominell identischer Bezeichnung können Wandreibungswinkel ausweisen, die um mehrere Grade voneinander abweichen. Wo dies möglich ist, sind die Wandprobenstücke vom voraussichtlichen Hersteller des Konstruktionsmaterials zu beschaffen (z. B. Walzwerk oder Behälterhersteller). Beschichtete Stahloberflächen sind mit demselben Beschichtungsfabrikat zu beschichten. Bei Großprojekten wird empfohlen, die Wandprobenstücke für einen späteren Vergleich mit der tatsächlich hergestellten Oberfläche aufzubewahren. Es ist gegenwärtig nicht möglich, Wandoberflächen in der Art zu charakterisieren, dass damit das Verhalten der Wandreibung zuverlässig vorhergesagt werden kann.

(4) Wenn die Silowand später Korrosion oder Abrieb ausgesetzt sein kann, sollten die Wandreibungsversuche mit Wandprobenstücken durchgeführt werden, die die tatsächlich vorliegenden Bedingungen unmittelbar nach der Herstellung und nach den unterschiedlichen Verschleiß- und Nutzungsbedingungen entsprechend berücksichtigen.

ANMERKUNG Die Wandoberflächen in Silos können sich mit der Zeit ändern. Korrosion kann zu einer Aufrauung der Oberfläche führen, eine Beanspruchung auf Abrieb kann die Oberfläche sowohl aufrauen als auch glätten. Oberflächen aus Materialien wie Polyethylen können ausgehöhlt werden, beschichtete Oberflächen können verkratzen. Silowände können aber auch glatter werden, indem sich feine Bestandteile aus den Schüttgütern wie z. B. Fette oder Feinkorn in kleinen Poren der Wandoberfläche ansammeln. Diese Änderungen können zu einer Änderung des Fließverhaltens führen, sogar in einem Ausmaß, dass z. B. Kernfluss in einem ursprünglich für Massenfluss ausgelegten Silo entsteht oder umgekehrt. Die Fülllasten können in Silos mit polierten Wandoberflächen, die Wandreibungslasten bei aufgerauten Wänden zunehmen.

C.7.2 Wandreibungskoeffizient μ_m zur Ermittlung der Lasten

C.7.2.1 Kurzbeschreibung

(1) Eine Schüttgutprobe wird entlang einer die Wandoberfläche repräsentierenden Fläche abgeschert – im Falle eines Wellblechsilos entlang einer gewellten Probe. Dabei wird die Schubkraft entlang der gescherten Fläche gemessen.

ANMERKUNG Bei der Interpretation der Daten aus den Scherversuchen wird Sorgfalt insbesondere im Hinblick darauf walten gelassen, ob Lastberechnungen oder Betrachtungen zum Fließverhalten durchgeführt werden.

C.7.2.2 Prüfgerät

(1) Das Prüfgerät ist in Bild C.2 dargestellt. Der Zellendurchmesser sollte mindestens den 20fachen Wert des Größtkorndurchmessers des Schüttgutes betragen und sollte nicht kleiner sein als der 40fache Wert der mittleren Partikelgröße. Die Höhe H der komprimierten Probe sollte zwischen $0,15D$ und $0,2D$ liegen. Im Fall von Wandproben mit Unstetigkeiten, wie z. B. bei einer gewellten Wand, sollte die Zellengröße entsprechend angepasst werden.

ANMERKUNG Diese Einschränkungen in Bezug auf die Korngröße des Schüttgutes sind aus folgenden Gründen gewählt: Die begrenzte maximale Schüttgutkorngröße soll sicherstellen, dass die Beeinträchtigungen im Hinblick auf die Anordnung und Orientierung der Schüttgutkörner infolge des Einflusses der begrenzenden Wand nicht zu groß wird. Darüber hinaus ist bekannt, dass dieser Einfluss für den Fall größer ist, dass die Partikel alle in etwa die gleiche Größe haben, als in dem Fall, dass die kleineren Partikel die Zwischenräume zwischen den größeren Partikeln einnehmen können. Aus diesem Grund ist bei gleichmäßigen Partikelgrößen die Einschränkung auf die 40fache Partikelgröße und bei einer weiten Partikelgrößenverteilung die Einschränkung auf das 20fache der maximalen Partikeldurchmesser maßgebend.

C.7.2.3 Verfahren/Vorgehen

- (1) Als Referenzspannung σ_r wird die größte im Silo auftretende Horizontallast p_h zugrunde gelegt.
- (2) Die Probenvorbereitung sollte entsprechend dem Vorgehen nach C.5 erfolgen.
- (3) Nach dem Füllen der Scherzelle und vor dem Abscheren sollte die Zelle gedreht und vorsichtig von der Prüffläche angehoben werden, so dass Reibung nur zwischen den Partikeln und der Fläche gemessen wird.

DIN EN 1991-4:2010-12
EN 1991-4:2006 (D)

(4) Das Abscheren der Probe wird so durchgeführt, dass eine konstante Vorschubgeschwindigkeit von etwa 0,04 mm/s sichergestellt ist.

(5) Bei der Ermittlung des Wandreibungskoeffizienten sollte der Residualwert der Reibungskraft F_r (siehe Bild C.2) bei großen Verformungen verwendet werden.

(6) Der aus dem Versuch ermittelte Wandreibungskoeffizient für die Lastermittlung sollte bestimmt werden als

$$\mu = \frac{F_r}{N} \quad (\text{C.1})$$

Dabei ist

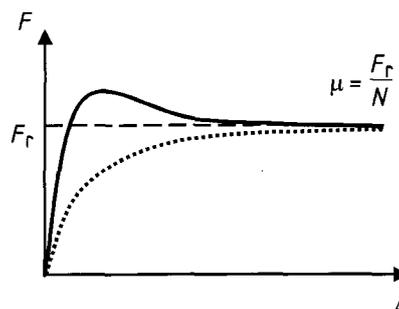
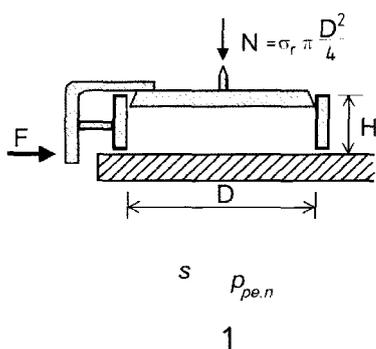
- F_r der End- bzw. Residualwert der Scherkraft (siehe Bild C.2b));
 N die auf den Deckel der Scherzelle aufbrachte Vertikallast.

C.7.3 Wandreibungswinkel ϕ_{wh} für Untersuchungen zum Fließverhalten

(1) Wenn es erforderlich ist, den Wandreibungswinkel ϕ_{wh} für Untersuchungen zum Fließverhalten zu bestimmen, wird auf den ASTM Standard D6128 verwiesen.

(2) Der Wandreibungswinkel für Untersuchungen zum Fließverhalten sollte bei niedrigen Druckverhältnissen ermittelt werden.

(3) Es sollte sorgfältig darauf geachtet werden, ob die Daten der Untersuchungen zum Wandreibungswinkel für Untersuchungen zum Fließverhalten des Schüttgutes oder zur Ermittlung der Einwirkungen benötigt werden.



a) Scherzelle zur Messung der Wandreibung

b) Typische Schubkraft-Verformungsbeziehungen

Legende

- 1 Wandprobe

Bild C.2 — Prüfverfahren zur Bestimmung des Wandreibungskoeffizienten

C.8 Horizontallastverhältnis K

C.8.1 Direkte Messung

C.8.1.1 Kurzbeschreibung

(1) Unter Behinderung der Horizontalverformungen wird auf eine Probe eine vertikale Spannung σ_1 aufgebracht und die aus dieser Belastung resultierende Horizontalspannung σ_2 gemessen. Daraus wird der Sekantenwert des Horizontallastverhältnisses K_0 bestimmt.

ANMERKUNG 1 Die Größe des Koeffizienten K_0 ist von der Richtung der sich in der Probe ausbildenden Hauptspannungen abhängig. Bei der Auswertung der Versuche sind die Horizontal- und Vertikalspannungen näherungsweise als Hauptspannungen in der Probe anzusehen. Im Silo ist dies in der Regel nicht der Fall.

ANMERKUNG 2 Unter einer Probe, bei der die Horizontalverformungen behindert sind, ist gemeint, dass die horizontalen Dehnungen im Schüttgut so klein gehalten werden, dass deren Einfluss auf die Spannungen in der Schüttgutprobe vernachlässigbar ist. Dennoch sind diese Dehnungen groß genug, dass sie in der dünnen Wand der Scherzelle oder in speziellen Bereichen der Wand, die für konzentrierte Dehnungen zu bemessen sind, messbare Beträge annehmen. Im Allgemeinen erfüllt eine mittlere Umfangsdehnung in der Größenordnung von 1/10 Promille dieses Kriterium von begrenzten Dehnungen in der Schüttgutprobe bei gleichzeitiger Messbarkeit von Verformungen in der Apparaturwand.

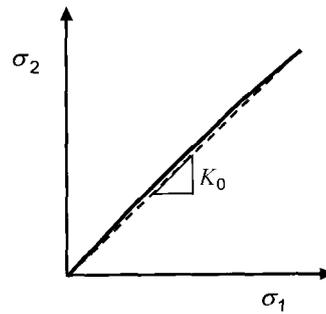
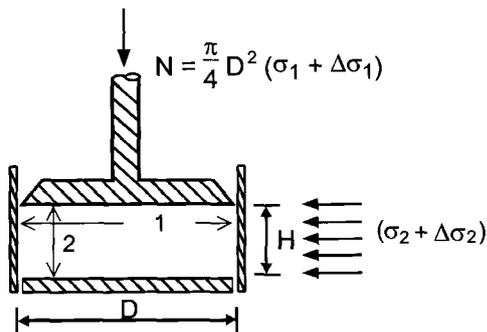
C.8.1.2 Prüfgerät

(1) Die Geometrie des Prüfgerätes zeigt Bild C.3. Die Horizontalspannungen werden aus den an der Außenfläche des vertikalen Ringes gemessenen Dehnungen abgeleitet. Hierzu sollte die Messzellenwand dünn genug und so dimensioniert sein, dass der Spannungszustand in der Wand richtig interpretiert werden kann.

ANMERKUNG Im Allgemeinen sind hierfür folgende Eigenschaften für die Scherzelle erforderlich:

- a) konstruktive Trennung von Ring der Zellwand und Grundplatte;
- b) Gewährleistung der Messung von sowohl horizontalen als auch vertikalen Dehnungen ohne gegenseitige Beeinträchtigung;
- c) Positionierung der Messstellen für die Dehnungen in ausreichender Entfernung von den Probenrändern;
- d) Sicherstellung, dass die gemessenen Dehnungen mit den inneren horizontalen Spannungen über einen Umrechnungsfaktor in Beziehung stehen, wobei die Biegung der Wände der Versuchsapparatur in dieser Beziehung vernachlässigt werden kann.

DIN EN 1991-4:2010-12
EN 1991-4:2006 (D)



Legende

- 1 Oberfläche, glatt
 2 Oberfläche, rau

Bild C.3 — Prüfverfahren zur Bestimmung von K_0

C.8.1.3 Vorgehen

- (1) Die Referenzspannung σ_r sollte dem größten zu erwartenden vertikalen Druckniveau des im Silo gespeicherten Schüttgutes ρ_v entsprechen.
- (2) Die Probenvorbereitung sollte entsprechend dem Vorgehen nach C.5 erfolgen.
- (3) Es sollte die aus der Vertikalbelastung σ_1 — die der Referenzspannung σ_r entspricht — resultierende Horizontalspannung σ_2 in der Probe betrachtet werden. Der Wert von K_0 wird aus diesen Spannungskomponenten (siehe Bild C.3) berechnet als:

$$K_0 = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad (\text{C.2})$$

- (4) Der Wert von K wird angenommen als:

$$K = 1,1 K_0 \quad (\text{C.3})$$

ANMERKUNG Über den Faktor 1,1 in Gleichung (C.3) sollte dem Unterschied zwischen dem unter nahezu keinen Wandreibungseinflüssen gemessenen Horizontallastverhältnis ($= K_0$) in der Scherzelle und dem Wert K unter Einfluss einer Wandreibung im Silo Rechnung getragen werden (siehe auch 4.2.2 (5)).

C.8.2 Indirekte Messung

- (1) Ein Näherungswert für K darf vom Winkel der inneren Reibung bei Belastung ϕ_i abgeleitet werden, der entweder über das in C.9 beschriebene Verfahren oder über einen Triaxialversuch bestimmt werden kann. Wenn der Wert K aus ϕ_i abgeleitet wird, sollte die Abschätzung in Gleichung (4.7) verwendet werden.

C.9 Festigkeitsparameter: Kohäsion c und Winkel der inneren Reibung ϕ

C.9.1 Direkte Messung

C.9.1.1 Kurzbeschreibung

(1) Die Festigkeit einer Schüttgutprobe darf über Scherzellenversuche bestimmt werden. Zur Beschreibung der Auswirkung der Festigkeit von in Silozellen gelagerten Schüttgütern auf die Silolasten sollten die beiden Parameter — c und ϕ — verwendet werden.

(2) Es sei auf ASTM D6128 verwiesen. Es sollte aber beachtet werden, dass die Parameter, die mit den Versuchen dieses Regelwerks ermittelt werden, nicht mit denen übereinstimmen, die in dieser Norm beschrieben werden.

C.9.1.2 Prüfgerät

(1) Als Prüfgerät wird eine zylindrische Scherzelle nach Bild C.4 verwendet. Der Zellendurchmesser D sollte mindestens den 20fachen Wert des Größtkorndurchmessers des Schüttgutes betragen und sollte nicht kleiner als der 40fache Wert der mittleren Partikelgröße sein. Die Höhe H der komprimierten Probe sollte zwischen $0,3D$ und $0,4D$ liegen.

ANMERKUNG Diese Einschränkungen in Bezug auf die Korngröße des Schüttgutes sind aus folgenden Gründen gewählt: Die begrenzte maximale Schüttgutkorngröße sollte sicherstellen, dass die Beeinträchtigungen im Hinblick auf die Anordnung und Orientierung der Schüttgutkörner infolge des Einflusses der begrenzenden Wand nicht zu groß wird. Darüber hinaus ist bekannt, dass dieser Einfluss für den Fall größer ist, dass die Partikel alle in etwa die gleiche Größe haben, als in dem Fall, dass die kleineren Partikel die Zwischenräume zwischen den größeren Partikeln einnehmen können. Aus diesem Grund ist bei gleichmäßigen Partikelgrößen die Restriktion auf die 40fache Partikelgröße und bei einer weiten Partikelgrößenverteilung die Restriktion auf das 20fache der maximalen Partikeldurchmesser maßgebend.

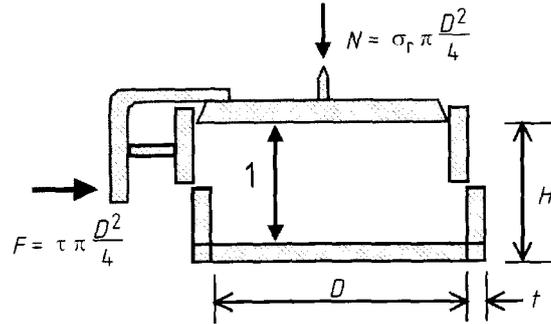
C.9.1.3 Durchführung

(1) Die Referenzspannung σ_r sollte näherungsweise dem zu erwartenden vertikalen Druckniveau des im Silo gespeicherten Schüttgutes p_v nach C.2 entsprechen. Die Probenvorbereitung sollte entsprechend dem Vorgehen nach C.5 vorgenommen werden.

(2) Das Abscheren der Probe erfolgt mit einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit von etwa $0,04$ mm/s.

(3) Der Bestimmung der Festigkeitsparameter des Schüttgutes sollte die bei oder vor einer Horizontalverschiebung von $\Delta = 0,06D$ ermittelte Scherspannung τ zugrunde gelegt werden, wobei D den inneren Zellendurchmesser darstellt (siehe Bild C.4).

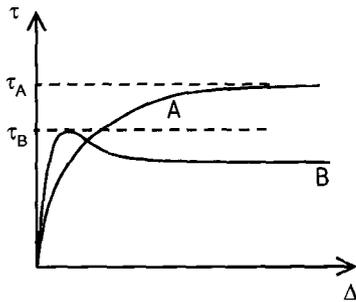
DIN EN 1991-4:2010-12
EN 1991-4:2006 (D)



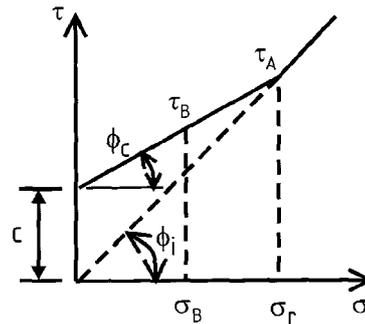
Legende

1 Oberfläche rau

a) Scherzelle



b) Typische Scherspannungs-Verschiebungs-Kurve



c) In einem Scherversuch gemessene typische Scherspannungs-Normalspannungsbeziehung

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

(4) Es sollten mindestens zwei Versuche nach den unter (5) und (6) definierten Bedingungen durchgeführt werden (Tabelle C.1 und Bild C.4).

(5) Zur Ermittlung der Schubspannung τ_A wird eine erste Materialprobe unter einer Normallast entsprechend der Referenzspannung σ_r abgeschert.

(6) Eine zweite Probe wird zunächst wie die erste Probe unter einer Normallast entsprechend der Referenzspannung σ_r nur gerade bis zum Abscheren gebracht. Danach wird die Normallast auf etwa den halben Wert der Referenzspannung reduziert werden ($\sigma_B \approx \sigma_r/2$). Anschließend wird sie bei diesem Spannungsniveau weiter abgeschert, um die maximale Schubspannung τ_B zu erhalten (siehe Bild C.4b)). Die aus diesen beiden Versuchen ermittelten Spannungen sind in Tabelle C.1 genannt.

Tabelle C.1 — Versuchsparameter

Ver-such	Betrag der Vorbelastung	Normalspannung im Versuch	Gemessene maximale Schubspannung
Nr. 1	σ_r	σ_r	τ_A
Nr. 2	σ_r	$\sigma_B \approx \sigma_r/2$	τ_B

C.9.1.4 Auswertung

(1) Der Winkel der inneren Reibung bei Belastung ϕ_1 des gespeicherten Schüttgutes wird ermittelt mit:

$$\phi_1 = \arctan (\tau_A / \sigma_r) \quad (\text{C.4})$$

(2) Die unter der Referenzspannung σ_r im Schüttgut aktivierte Kohäsion c wird berechnet mit:

$$c = \tau_A - \sigma_r \tan \phi_c \quad (\text{C.5})$$

mit:

$$\phi_c = \arctan \left(\frac{\tau_A - \tau_B}{\sigma_r - \sigma_B} \right) \quad (\text{C.6})$$

Dabei ist

ϕ_c der Winkel der inneren Reibung bei Entlastung einer überkritisch konsolidierten Probe.

ANMERKUNG Der Wert der Kohäsion c hängt stark von der Konsolidierungsspannung σ_r ab und darf somit nicht als eine feste Materialkenngröße angesehen werden.

(3) Bei einem kohäsionslosen Schüttgut (d. h. $c = 0$) sollte die Scherfestigkeit nur über den Winkel der inneren Reibung ϕ_1 — welcher dann ϕ_c entspricht — beschrieben werden.

ANMERKUNG Alternativ zu den oben beschriebenen Versuchen darf ein genommter Triaxialversuch angewendet werden.

C.9.2 Indirekte Messung

C.9.2.1 Kurzbeschreibung

(1) Die Kohäsion eines Schüttgutes darf auch näherungsweise aus den Ergebnissen aus Scherversuchen mit einer Scherzelle von Jenike (ASTM D6128) bestimmt werden.

(2) Die Kohäsion sollte unter Druckverhältnissen entsprechend dem maximalen Vertikaldruck σ_{vft} im Silo nach dem Füllen (siehe Ausführungen in C.2) ermittelt werden.

(3) Als maximale Konsolidierungsspannung σ_c sollte der maximale Vertikaldruck im Silo nach dem Füllen σ_{vft} angesetzt werden.

(4) Die dieser Konsolidierungsspannung entsprechende einachsige Fließspannung σ_u wird aus der Fließfunktion bestimmt. Zudem wird der Winkel der effektiven inneren Reibung δ unter den entsprechenden Spannungsbedingungen ermittelt.

(5) Es sollte folgender Näherungswert für die Kohäsion bestimmt werden:

$$c = \sigma_c \left(\frac{\sin \delta - \sin \phi_c}{\cos \phi_c (1 + \sin \delta)} \right) \quad (\text{C.7})$$

mit:

$$\phi_c = \arcsin \left(\frac{2 \sin \delta - k}{2 - k} \right) \quad (\text{C.8})$$

DIN EN 1991-4:2010-12
EN 1991-4:2006 (D)

$$k = \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_u} \right) (1 + \sin \delta) \quad (\text{C.9})$$

Dabei ist

- σ_c die maximale Konsolidierungsspannung im Versuch mit der Scherzelle von Jenike;
- σ_u einachsige Fließspannung aus dem Versuch mit der Scherzelle von Jenike;
- δ der effektive Winkel der inneren Reibung aus dem Versuch mit der Scherzelle von Jenike;
- ϕ_c der Winkel der inneren Reibung bei Entlastung (siehe Bild C.4c);

ANMERKUNG 1 Die Größenordnung der Kohäsion c hängt stark von der Konsolidierungsspannung σ_c ab und stellt somit keinen unabhängigen Materialkennwert des Schüttgutes dar.

ANMERKUNG 2 Der größte Wert der Konsolidierungsspannung σ_c wird in der Literatur der Schüttgutmechanik üblicherweise mit σ_1 bezeichnet.

(6) Ein Näherungswert für den Winkel der inneren Reibung bei Entlastung ϕ_1 darf aus den Versuchen mit der Scherzelle von Jenike nach (C.10) abgeschätzt werden:

$$\phi_1 = \arctan \left(\frac{\sin \delta \cos \phi_c}{1 - \sin \phi_c \sin \delta} \right) \quad (\text{C.10})$$

ANMERKUNG Die beiden Parameter c und ϕ_1 werden in dieser Norm nur zur Abschätzung der Auswirkung der Schüttgutfestigkeit auf die Silodrücke verwendet.

C.10 Effektiver Elastizitätsmodul E_s

C.10.1 Direkte Messung

C.10.1.1 Kurzbeschreibung

(1) Auf eine seitlich gehaltene Probe sollte eine Vertikallast σ_1 aufgebracht werden. Zu jedem Lastinkrement $\Delta\sigma_1$ (vertikal) wird die resultierende Horizontalspannung $\Delta\sigma_2$ und die Änderung der Vertikalverschiebung Δv_1 gemessen. Aus diesen Messungen wird der effektive Elastizitätsmodul bei Belastung E_{sL} (Belastungsmodul) über das inkrementelle Horizontallastverhältnis K abgeleitet. Die Vertikallast wird danach um den Betrag $\Delta\sigma_1$ reduziert, die Änderung der Horizontalspannung $\Delta\sigma_2$ und der Vertikalverschiebung Δv_1 wird gemessen. Aus diesen Messungen wird der effektive Elastizitätsmodul bei Entlastung E_{sU} (Entlastungsmodul) abgeleitet.

ANMERKUNG 1 Die Größenordnung von K_0 ist von der Richtung der Hauptspannungen in der Probe abhängig. Die horizontalen und vertikalen Spannungen entsprechen in der Probe näherungsweise den Hauptspannungen, wobei dies im Silo in der Regel nicht der Fall ist.

ANMERKUNG 2 Unter einer Probe, deren Horizontalverformungen behindert sind, ist zu verstehen, dass die horizontalen Dehnungen im Schüttgut so klein gehalten werden, dass deren Einfluss auf die Spannungen in der Schüttgutprobe vernachlässigbar ist. Dennoch sind diese Dehnungen groß genug, dass sie an der dünnen Wand der Prüfapparatur messbare Beträge annehmen. Allgemein erfüllt eine mittlere Umfangsdehnung in der Größenordnung von 1/10 ‰ dieses Kriterium.

C.10.1.2 Prüfgerät

(1) Die Geometrie der zu verwendenden Versuchsapparatur ist in Bild C.5 dargestellt. Sie ist der in C.8 beschriebenen Apparatur zur Messung des Horizontallastverhältnisses K ähnlich.

(2) Die Horizontalspannungen werden aus den an der Außenfläche des vertikalen Ringes gemessenen Dehnungen abgeleitet. Hierzu sollte die Messzellenwand dünn genug und so dimensioniert sein, dass der Spannungszustand in der Wand richtig interpretiert werden kann.

ANMERKUNG Im Allgemeinen ist hierfür eine von den Scherzellenwänden getrennte Grundplatte erforderlich, damit sowohl horizontale als auch vertikale Dehnungsmessungen ohne gegenseitige Beeinträchtigung möglich sind. Es ist weiterhin erforderlich, dass die Dehnungen in ausreichender Entfernung von den Proberändern gemessen werden. Es sollte sichergestellt sein, dass die gemessenen Dehnungen proportional zu den inneren horizontalen Spannungen sind, wobei die Biegung der Versuchsapparaturwände in dieser Beziehung vernachlässigt werden können.

(3)P Es muss dafür gesorgt werden, dass sich geeignete kleine inkrementelle Beträge der Vertikalverformungen der Probe einstellen.

C.10.1.3 Durchführung

(1) Als Referenzspannung σ_r wird das größte zu erwartende Niveau der Vertikaldrücke p_v des im Silo gespeicherten Schüttgutes angenommen.

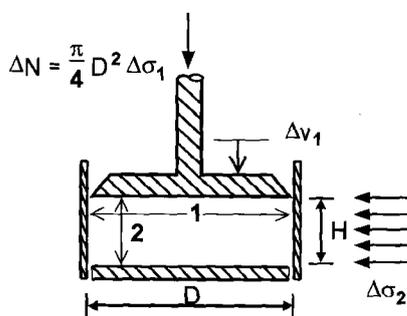
(2) Die Probenvorbereitung sollte entsprechend dem Vorgehen nach C.5 erfolgen.

(3) Nach dem Aufbringen einer Vertikallast σ_1 entsprechend der Referenzspannung σ_r werden die Horizontalspannungen und Vertikalverformungen abgelesen. Die Höhe der Materialprobe H ist sorgfältig zu messen (siehe C.6.3).

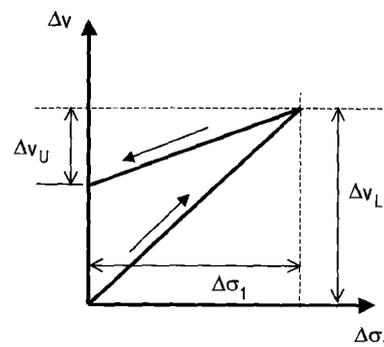
(4) Es wird ein kleines Inkrement der Vertikalspannung $\Delta\sigma_1$ aufgebracht und nochmals die Horizontalspannungen und Vertikalverformungen gemessen. Das Inkrement der Vertikalspannungen sollte näherungsweise bei 10 % der Referenzspannung σ_1 liegen.

(5) Es wird die Änderung in der Horizontalspannung $\Delta\sigma_2$ infolge des vertikalen Lastinkrementes $\Delta\sigma_1$ ermittelt und die Änderungen der vertikalen Verschiebungen Δv (beide negativ) gemessen. Der inkrementelle Wert unter Belastung von K wird dann bestimmt als K_L :

$$K_L = \frac{\Delta\sigma_2}{\Delta\sigma_1} \quad (\text{C.11})$$



a) Versuchseinrichtung



b) Typische vertikale Verschiebung bei vertikalen Spannungskrementen $\Delta\sigma_1$

Legende

- 1 Oberfläche, glatt
- 2 Oberfläche, rau

Bild C.5 — Prüfverfahren zur Bestimmung der Elastizitätsmoduli bei Be- und Entlastung

DIN EN 1991-4:2010-12
EN 1991-4:2006 (D)

(6) Der effektive Elastizitätsmodul E_{sL} unter Belastung wird dann abgeleitet als

$$E_{sL} = H \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta v} \left(1 - \frac{2K_L^2}{1+K_L} \right) \quad (\text{C.12})$$

(7) Es wird anschließend eine geringe inkrementelle Reduzierung der Vertikalbelastung $\Delta\sigma_1$ vorgenommen (zu behandeln als Größe mit negativem Vorzeichen) und die resultierenden Änderungen der Horizontalspannungen und vertikalen Verformungen gemessen. Das Inkrement der Vertikalbelastung $\Delta\sigma_1$ sollte näherungsweise 10 % der Referenzspannung σ_1 betragen.

(8) Es wird die Änderung in der Horizontalspannung $\Delta\sigma_2$ infolge des vertikalen Lastinkrementes $\Delta\sigma_1$ ermittelt und die Änderungen der vertikalen Verschiebungen Δv (beide negativ) gemessen. Der inkrementelle Wert von K bei Entlastung wird dann bestimmt als K_U :

$$K_U = \frac{\Delta\sigma_2}{\Delta\sigma_1} \quad (\text{C.13})$$

(9) Der effektive Elastizitätsmodul E_{sU} bei Entlastung wird dann abgeleitet als:

$$E_{sU} = H \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta v} \left(1 - \frac{2K_U^2}{1+K_U} \right) \quad (\text{C.14})$$

ANMERKUNG Der effektive Elastizitätsmodul bei Entlastung ist gewöhnlich viel größer als der bei Belastung. In einer Abschätzung, bei der ein großer Elastizitätsmodul für das Tragwerk schädlich ist (z. B. bei Temperaturänderungen) sollte der Elastizitätsmodul bei Entlastung (Entlastungsmodul) verwendet werden. Ist der Elastizitätsmodul des Schüttgutes für die Konstruktion günstig (z. B. in dünnwandigen rechteckigen Silos), sollte der Elastizitätsmodul bei Belastung (Belastungsmodul) verwendet werden.

C.10.2 Indirekte Abschätzung

(1) Als Hilfe zur speziellen Überprüfung der Justierung der Versuche darf E_{sU} als Näherungswert wie folgt abgeschätzt werden:

$$E_{sU} = \chi \rho_{vft} \quad (\text{C.15})$$

Dabei ist

ρ_{vft} die vertikale Spannung am unteren Ende des vertikalen Wandabschnittes (Gleichung (5.3) oder (5.79));

χ der Kontiguitätskoeffizient.

ANMERKUNG Der effektive Elastizitätsmodul bei Entlastung E_{sU} und die vertikale Spannung ρ_{vft} weisen in Gleichung (C.15) die gleiche Einheit auf.

(2) Bei fehlenden experimentellen Versuchsdaten entsprechend der Verfahren nach C.10.1 darf der Kontiguitätskoeffizient χ abgeschätzt werden:

$$\chi = 7 \gamma^{3/2} \quad (\text{C.16})$$

wobei für γ die Wichte des gespeicherten Schüttgutes dimensionsgebunden in kN/m^3 eingesetzt wird.

(3) Der Wert von χ darf alternativ dazu für trockene landwirtschaftliche Getreideprodukte zu 70, für feinkörnige mineralische Körnungen zu 100 und für grobkörnige mineralische Körnungen zu 150 angenommen werden.

C.11 Bestimmung der oberen und unteren charakteristischen Werte von Schüttgutparametern und Ermittlung des Umrechnungsfaktors a

C.11.1 Kurzbeschreibung

(1)P Der Silo ist für die ungünstigsten Belastungsbedingungen zu bemessen, denen er während seiner Nutzungsdauer ausgesetzt ist. Dieser Abschnitt behandelt die Abschätzung der Streuung der Schüttgutkennwerte, die in Schüttgutproben zum Zeitpunkt der Bemessung auftreten können.

ANMERKUNG Es ist wahrscheinlich, dass sich die Kennwerte des gespeicherten Schüttgutes während der Nutzungsdauer ändern. Diese zeitlichen Veränderungen der Kennwerte sind aber nicht einfach abzuschätzen.

(2)P Die Extremwerte der Bemessungslasten sind durch ihre charakteristischen Werte zu beschreiben. Dies sind Werte, die mit anerkannten vorgeschriebenen Wahrscheinlichkeiten — üblicherweise 5 %- und 95 %-Quantilwerte — während der vorgesehenen Nutzungsdauer oder Dauer des Bemessungszeitraums nicht überschritten werden.

(3)P Die Extremwerte der Kennwerte, die zum Erreichen dieses extremen Lastniveaus benötigt werden, sind als charakteristische Werte der Schüttgutparameter zu definieren.

(4) Bei der Ermittlung der maßgeblichen Lastverhältnisse werden sowohl die oberen als auch unteren charakteristischen Werte verwendet.

(5) Es sollte das hier beschriebene vereinfachte Verfahren verwendet werden, in dem der charakteristische Wert unter Zugrundelegung der 1,28fachen Standardabweichung vom Mittelwert betrachtet ist.

ANMERKUNG 1 Die entsprechenden Materialkennwerte für eine bestimmte Überschreitungswahrscheinlichkeit des Lastniveaus, hängen von der Geometrie und absoluten Größe des Behälters, dem betrachteten Lastfall und davon ab, ob die Lasten im vertikalen Siloschaft oder im Trichter zu betrachten sind. Zudem beeinflussen der Feuchtigkeitsgehalt, die Temperatur, die Neigung zur Entmischung und das Alter diese Werte.

ANMERKUNG 2 In EN 1990, Anhang D wird ein von 1,28 abweichender Wert empfohlen. Wie in dem obigen Abschnitt dargelegt, tragen mehrere voneinander unabhängige Schüttguteigenschaften zu den charakteristischen Lasten bei. Deshalb wird ein 10- oder 90-Prozentwert jedes Kennwertes als geeignete und vernünftige Abschätzung für den Wert angesehen, die eine angemessene Auftretenswahrscheinlichkeit für die Bemessungslast repräsentiert.

(6) Falls adäquate experimentelle Daten zur Verfügung stehen, werden die charakteristischen Werte über die Anwendung von statistischen Methoden ermittelt.

ANMERKUNG 1 Obwohl Versuchsdaten eine hilfreiche Basis für die Bestimmung von charakteristischen Werten darstellen, unterliegen auch sie Einschränkungen wie z. B. Beschränkungen bei den Probengrößen, eingeschränkte Probenaufbereitungsverfahren usw. Diese Einschränkungen können dazu führen, dass die Daten für die Gesamtheit der Eigenschaften, die während der Dauer des Betriebs maßgeblich werden können, unrepräsentativ sind.

ANMERKUNG 2 Die Werte aus Tabelle E.1 gehen auf Festlegungen zurück, die auf eine Kombination von Erfahrung und tatsächlich ermittelten experimentellen Daten basieren.

(7) Falls der Auftraggeber oder Konstrukteur für eine spezielle Bemessungssituation über Datenmaterial oder Erfahrungswerte verfügt, darf der Auftraggeber die charakteristischen Schüttgutkennwerte aus diesem Datenmaterial ableiten, wenn diese die Bandbreite der Kennwerte der während der Nutzungsdauer verwendeten Schüttgüter repräsentieren.

DIN EN 1991-4:2010-12
EN 1991-4:2006 (D)

C.11.2 Methoden zur Abschätzung

(1) Zur Beschaffung der charakteristischen Werte jedes Kennwertes dürfen folgende Verfahren verwendet werden. Im Folgenden repräsentiert die Variable x die jeweilig betrachteten Kennwerte.

(2) Der Mittelwert des Kennwertes \bar{x} wird aus den Versuchsdaten ermittelt.

(3) Wo dies möglich ist, wird der Variationskoeffizient δ aus den zur Verfügung stehenden Versuchsdaten bestimmt.

(4) Wenn die Versuchsdaten für eine Bestimmung eines Variationskoeffizienten ungeeignet sind, wird ein geeigneter Wert für das Schüttgut abgeschätzt. Tabelle C.2 kann hierfür als Leitfaden dienen.

(5) Der obere charakteristische Wert eines Kennwertes ($x_u = x_{0,90}$) wird bestimmt mit:

$$x_{0,90} = \bar{x} (1 + 1,28 \delta) \quad (\text{C.17})$$

(6) Der untere charakteristische Wert eines Kennwertes ($x_\ell = x_{0,10}$) wird bestimmt mit:

$$x_{0,10} = \bar{x} (1 - 1,28 \delta) \quad (\text{C.18})$$

(7) Der Umrechnungsfaktor a_x eines Kennwertes wird bestimmt mit:

$$a_x = \sqrt{\frac{1+1,28\delta}{1-1,28\delta}} \approx 1 + 1,28\delta + \delta^2 \quad (\text{C.19})$$

ANMERKUNG Gleichung (C.19) stellt die einfachste Methode dar einen einzelnen Wert für a_x zu bestimmen, der eine gute Abschätzung sowohl für den $x_{0,90}$ -Wert als auch den $x_{0,10}$ -Wert liefert. Es sei aber darauf hingewiesen, dass immer ein kleiner Unterschied zwischen den nach Gleichungen (C.17) und (C.18) ermittelten Werten einerseits sowie den nach der einfachen Methode nach Gleichung (C.19) und Gleichungen (4.1) bis (4.6) andererseits bestehen. Dies liegt daran, dass die Gleichungen (C.17) und (C.18) sich aus additiven Termen zusammensetzen, während a_x als multiplikative Größe verwendet wird.

(8) Wenn die Werte der Umrechnungsfaktoren abgeschätzt werden müssen, sollten die Variationskoeffizienten δ für die Schüttgutwichte mit 0,10 angesetzt werden. Bei den anderen Schüttgutkennwerten sollten die Werte über die Angaben für die in der Tabelle C.2 gelisteten Schüttgüter mit ähnlichen Eigenschaften abgeschätzt werden.

Tabelle C.2 — Typische Werte der Variationskoeffizienten für die Schüttgutkennwerte

Schüttgut	Variationskoeffizient δ				
	Horizont- tallastver- hältnis K	Winkel der inneren Reibung ϕ Grad	Wandreibungskoeffizient μ		
			Wandrauigkeitsklasse		
			D1	D2	D3
Betonkies	0,11	0,11	0,09	0,09	0,09
Aluminium	0,14	0,16	0,05	0,05	0,05
Krafftuttergemisch	0,08	0,06	0,19	0,19	0,19
Krafftutterpellets	0,05	0,05	0,14	0,14	0,14
Gerste	0,08	0,10	0,11	0,11	0,11
Zement	0,14	0,16	0,05	0,05	0,05
Zementklinker	0,21	0,14	0,05	0,05	0,05
Kohle	0,11	0,11	0,09	0,09	0,09
Kohlestaub	0,14	0,18	0,05	0,05	0,05
Koks	0,11	0,11	0,09	0,09	0,09
Flugasche	0,14	0,12	0,05	0,05	0,05
Mehl	0,08	0,05	0,11	0,11	0,11
Eisenpellets	0,11	0,11	0,09	0,09	0,09
Kalkhydrat	0,14	0,18	0,05	0,05	0,05
Kalksteinmehl	0,14	0,16	0,05	0,05	0,05
Mais	0,10	0,10	0,17	0,17	0,17
Phosphate	0,11	0,13	0,09	0,09	0,09
Kartoffeln	0,08	0,09	0,11	0,11	0,11
Sand	0,08	0,07	0,11	0,11	0,11
Schlackenklinker	0,08	0,07	0,11	0,11	0,11
Sojabohnen	0,08	0,12	0,11	0,11	0,11
Zucker	0,14	0,14	0,05	0,05	0,05
Zuckerrübenpellets	0,11	0,11	0,09	0,09	0,09
Weizen	0,08	0,09	0,11	0,11	0,11

Anhang D (normativ)

Abschätzung der Schüttgutkennwerte für die Ermittlung der Silolasten

D.1 Ziel

Dieser Anhang beschreibt Methoden zur Abschätzung der Schüttgutkennwerte, die in dieser Norm für die Zwecke der Berechnung der Silolasten benötigt werden und nicht unmittelbar anhand von Versuchen experimentell bestimmt werden können.

D.2 Abschätzung des Wandreibungskoeffizienten für eine gewellte Wand

(1) Für den Wandtyp D4 (gewellt oder Profilbleche oder Bleche mit horizontalen Schlitzern) sollte der effektive Wandreibungskoeffizient ermittelt werden aus:

$$\mu_{\text{eff}} = (1 - a_w) \tan \phi_1 + a_w \mu_w \quad (\text{D.1})$$

Dabei ist

μ_{eff} der effektive Wandreibungskoeffizient;

ϕ_1 der Winkel der inneren Reibung;

μ_w der Wandreibungskoeffizient (gegen eine ebene Wandoberfläche);

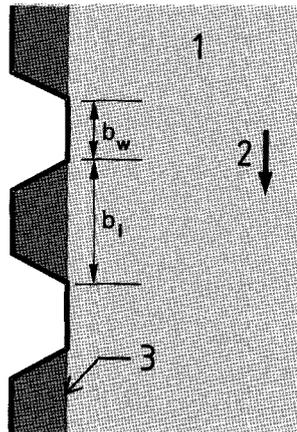
a_w der Wandkontaktfaktor.

ANMERKUNG Für den Wandtyp D4 hängt die effektive Wandreibung vom Winkel der inneren Reibung des Schüttgutes, dem Wandreibungskoeffizienten gegen die ebene Wand und vom Profil der Wandoberfläche ab.

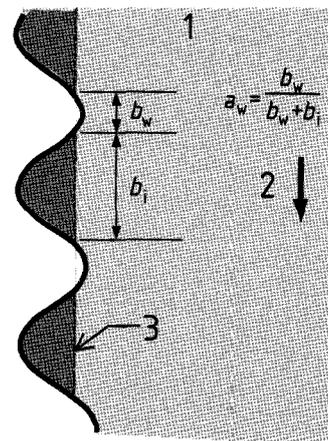
(2) Der Parameter a_w in Gleichung (D.1), der den Anteil der Gleitfläche gegen die Wandfläche repräsentiert, sollte aus der Geometrie des Profils der Wandoberfläche unter Berücksichtigung einer geeigneten Abschätzung der aktivierten Kontaktbereiche zwischen Schüttgut und Wandoberfläche ermittelt werden (siehe Bild D.1a):

$$a_w = \frac{b_w}{b_w + b_1} \quad (\text{D.2})$$

ANMERKUNG Die Trennfläche zwischen gleitenden und stehenden Zonen ist teilweise in Kontakt mit der Wand und teilweise eine Bruchfläche innerhalb des Schüttgutes. Der Anteil, der entlang der Wandfläche gleitet, wird durch den Faktor a_w ausgedrückt. Dieser Anteil lässt sich nicht einfach bestimmen und ist in Abhängigkeit von dem Profil der Wandoberfläche abzuschätzen.



a) Trapezförmig gefaltetes Profil



b) Sinusförmig gewelltes Profil

Legende

- 1 Schüttgut
- 2 Schüttgutfluss
- 3 Gleitfläche

Bild D.1 — Abmessungen der Profilierung der Wandoberfläche

(3) Falls erforderlich, sollte eine geeignete Abschätzung des Kontaktbereiches Schüttgut/Wand erfolgen (siehe Bild D.1b)).

ANMERKUNG Bei Profilierungen der Wandoberfläche, die dem in Bild D.1b) dargestellten Profil ähneln, kann der Faktor a_w näherungsweise zu 0,20 angenommen werden.

D.3 Innere Reibung und Wandreibung eines grobkörnigen Schüttgutes ohne Feinanteile

(1) Bei grobkörnigen Schüttgütern ohne Feinanteile (z. B. Lupinen, Erbsen, Bohnen oder Kartoffeln) kann der Wandreibungskoeffizient μ und Winkel der inneren Reibung ϕ_i nicht so einfach bestimmt werden. Hier sollte für den Winkel der inneren Reibung der Böschungswinkel ϕ_f eines auf eine ebene Grundplatte locker aufgeschütteten Schüttguthaufens (Schüttgutkegel) angenommen werden.

DIN EN 1991-4:2010-12
EN 1991-4:2006 (D)

Anhang E **(normativ)**

Angabe von Schüttgutkennwerten

E.1 Allgemeines

(1) Dieser Anhang gibt Kennwerte einiger üblicher in Silos gelagerter Schüttgüter für Bemessung an.

E.2 Angegebene Werte

(1) Bei der Ermittlung der Einwirkungen sollten die in der Tabelle E.1 angegebenen Schüttgutkennwerte verwendet werden.

Tabelle E.1 — Schüttgutkennwerte

Art des Schüttgutes ^{d,e}	Wichte ^b		Böschungswinkel	Winkel der inneren Reibung			Horizontal- lastverhältnis		Wandreibungskoeffizient ^c μ ($\mu = \tan \phi_w$)				Kennwert für Teil- flächen- last C_{op}
	γ			ϕ_r	ϕ	a_ϕ	K	a_K	Wand- typ D1	Wand- typ D2	Wandtyp D3	a_μ	
	unterer Wert	oberer Wert	Mittel- wert										Um- rech- nungs- faktor
	kN/m ³	kN/m ³	Grad	Grad									
Allgemeines Schüttgut ^a	6,0	22,0	40	35	1,3	0,50	1,5	0,32	0,39	0,50	1,40	1,0	
Betonkies	17,0	18,0	36	31	1,16	0,52	1,15	0,39	0,49	0,59	1,12	0,4	
Aluminium	10,0	12,0	36	30	1,22	0,54	1,20	0,41	0,46	0,51	1,07	0,5	
Krafftuttermischung	5,0	6,0	39	36	1,08	0,45	1,10	0,22	0,30	0,43	1,28	1,0	
Krafftutterpellets	6,5	8,0	37	35	1,06	0,47	1,07	0,23	0,28	0,37	1,20	0,7	
Gerste [⊙]	7,0	8,0	31	28	1,14	0,59	1,11	0,24	0,33	0,48	1,16	0,5	
Zement	13,0	16,0	36	30	1,22	0,54	1,20	0,41	0,46	0,51	1,07	0,5	
Zementklinker [‡]	15,0	18,0	47	40	1,20	0,38	1,31	0,46	0,56	0,62	1,07	0,7	
Kohle [⊙]	7,0	10,0	36	31	1,16	0,52	1,15	0,44	0,49	0,59	1,12	0,6	
Kohlestaub [⊙]	6,0	8,0	34	27	1,26	0,58	1,20	0,41	0,51	0,56	1,07	0,5	
Koks	6,5	8,0	36	31	1,16	0,52	1,15	0,49	0,54	0,59	1,12	0,6	
Flugasche	8,0	15,0	41	35	1,16	0,46	1,20	0,51	0,62	0,72	1,07	0,5	
Mehl [⊙]	6,5	7,0	45	42	1,06	0,36	1,11	0,24	0,33	0,48	1,16	0,6	
Eisenpellets	19,0	22,0	36	31	1,16	0,52	1,15	0,49	0,54	0,59	1,12	0,5	
Kalkhydrat	6,0	8,0	34	27	1,26	0,58	1,20	0,36	0,41	0,51	1,07	0,6	
Kalksteinmehl	11,0	13,0	36	30	1,22	0,54	1,20	0,41	0,51	0,56	1,07	0,5	
Mais [⊙]	7,0	8,0	35	31	1,14	0,53	1,14	0,22	0,36	0,53	1,24	0,9	
Phosphat	16,0	22,0	34	29	1,18	0,56	1,15	0,39	0,49	0,54	1,12	0,5	
Kartoffeln	6,0	8,0	34	30	1,12	0,54	1,11	0,33	0,38	0,48	1,16	0,5	
Sand	14,0	16,0	39	36	1,09	0,45	1,11	0,38	0,48	0,57	1,16	0,4	
Schlackenklinker	10,5	12,0	39	36	1,09	0,45	1,11	0,48	0,57	0,67	1,16	0,6	
Sojabohnen	7,0	8,0	29	25	1,16	0,63	1,11	0,24	0,38	0,48	1,16	0,5	
Zucker [⊙]	8,0	9,5	38	32	1,19	0,50	1,20	0,46	0,51	0,56	1,07	0,4	
Zuckerrübenpellets	6,5	7,0	36	31	1,16	0,52	1,15	0,35	0,44	0,54	1,12	0,5	
Weizen [⊙]	7,5	9,0	34	30	1,12	0,54	1,11	0,24	0,38	0,57	1,16	0,5	

ANMERKUNG Wenn ein Schüttgut gelagert werden soll, welches nicht in der Tabelle aufgelistet ist, sollten Versuche durchgeführt werden.

^a Wenn sich die Kosten für Versuche nicht rechtfertigen, insbesondere wenn eine Kostenschätzung ergibt, dass bei Verwendung einer großen Bandbreite der Bemessungswerte sich nur geringfügige Auswirkungen auf die Gesamtkosten ergeben, können die Werte vom so genannten „Allgemeinen Schüttgut“ verwendet werden. Diese Werte können insbesondere für kleine Siloanlagen angemessen sein. Bei großen Siloanlagen werden sie im Allgemeinen jedoch zu einer unwirtschaftlichen Bemessung führen. Hier sollten Versuche in der Regel bevorzugt werden.

^b Bei der Ermittlung der Silolasten ist immer der obere charakteristische Wert der Schüttgutwichte γ_u zu verwenden. Der untere charakteristische Wert γ_l in Tabelle E.1 ist zur Unterstützung von Berechnungen zu Lagerungskapazitäten vorgesehen, wenn z. B. in einem Silo eine bestimmte vorgegebene Lagerkapazität zu gewährleisten ist.

^c Der effektive Wandreibungskoeffizient für Wandtyp D4 (gewellte Wand) darf nach den Methoden von D.2 abgeschätzt werden.

^d Schüttgüter, die zur Staubexplosion neigen, werden mit diesem Symbol \odot gekennzeichnet.

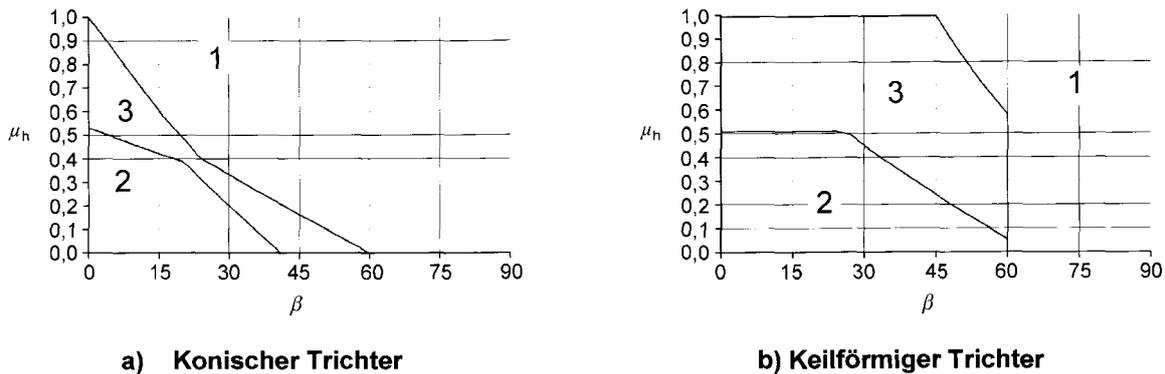
^e Schüttgüter, die zu einem mechanischen Verzahnen und somit zu Auslaufstörungen neigen, werden mit diesem Symbol \ddagger gekennzeichnet.

Anhang F (informativ)

Bestimmung der Fließprofile

F.1 Massen- und Kernfluss

(1) Die funktionale verfahrenstechnische Bemessung des Silos im Hinblick auf das Fließprofil ist außerhalb des Anwendungsbereichs dieser Norm. Die folgenden Informationen in Bild F.1 werden bereitgestellt, um die Möglichkeit einer auf der sicheren Seite liegenden Abschätzung zu geben, ob in einem zu bemessenden Silo spezielle Lastverhältnisse für Massenflussbedingungen vorliegen. Diese Information wird zudem benötigt, wenn das alternative Verfahren zur Ermittlung der Trichterlasten nach Anhang G verwendet wird.



Legende

- 1 Kernfluss
- 2 Massenfluss
- 3 zwischen den beiden Linien kann Massen- oder Kernfluss auftreten
- β halber Scheitelwinkel des Trichters
- μ_h Wandreibungskoeffizient des Trichters

ANMERKUNG In der Zone zwischen den Grenzlinien von Massen- und Kernfluss hängt das sich einstellende Fließprofil von weiteren Parametern ab, die nicht in dieser Norm enthalten sind.

Bild F.1 — Abgrenzung von Massen- und Kernflussbedingungen bei konischen und keilförmigen Trichtern

Anhang G (normativ)

Alternative Regeln zur Ermittlung von Trichterlasten

G.1 Allgemeines

- (1) Dieser Anhang gibt zwei alternative Verfahren zur Abschätzung von Schüttgutlasten auf Trichter an.
- (2) G.3 bis G.9 können zur Beschreibung der Lasten sowohl für den Lastfall Füllen als auch für den Lastfall Entleeren verwendet werden. Es sollte jedoch berücksichtigt werden, dass die Summen dieser Lasten nicht mit dem Gewicht des im Trichter gelagerten Schüttgutes korrespondieren.
- (3) Die Gleichung nach G.10 darf alternativ zu den nach 6.3 angegebenen Ansätzen bei steilen Trichtern für den Lastfall Entleeren verwendet werden.

G.2 Symbole

- l_h Abstand zwischen der Trichterspitze und dem Trichterübergang entlang der geneigten Fläche (siehe Bild G.1)
- p_n Lasten senkrecht auf die geneigte Trichterwand
- p_{ni} unterschiedliche Lastkomponenten senkrecht auf die geneigte Trichterwand ($i = 1, 2$ und 3)
- p_s Lastspitze am Trichterübergang

G.3 Begriffe

G.3.1

Lastspitze

(kick load)

Lastspitze, die während des Entleerens eines Silos bei Auftreten eines Massenflusses am Trichterübergang auftreten kann

G.4 Bemessungssituation

- (1) Der Trichter sollte für den Zustand nach dem Füllen und für den Lastfall Entleeren bemessen werden.
- (2) Das für den Trichter zu erwartende Fließverhalten des Schüttgutes sollte unter Anwendung von Bild F.1 bestimmt werden.
- (3) Falls im Silo sowohl Kern- als auch Massenfluss auftreten kann, sollten bei der Bemessung die Auswirkungen aus beiden Fließprofilen berücksichtigt werden.

DIN EN 1991-4:2010-12
EN 1991-4:2006 (D)

G.5 Ermittlung des Bodenlastvergrößerungsfaktors C_b

(1) Bei Silos, die nicht die unter (2) definierten Silobauwerke fallen, sollte der Bodenlastvergrößerungsfaktor angesetzt werden mit:

$$C_b = 1,3 \quad (\text{G.1})$$

(2) Bei Silos, bei denen mit bestimmter Wahrscheinlichkeit dynamische Lasten während der Entleerung zu erwarten sind (siehe (3)), wirken höhere vertikale Schüttgutlasten auf den Trichter und den Siloboden. Der Bodenlastvergrößerungsfaktor sollte dort angesetzt werden mit:

$$C_b = 1,6 \quad (\text{G.2})$$

(3) Von einer Neigung zu dynamischen Lasten (Bedingungen von Absatz (2)) sollte insbesondere bei Vorliegen folgender Fälle ausgegangen werden:

- in einem Silo mit einem schlanken vertikalen Siloschaft bei Lagerung von Schüttgütern, die nicht der Klasse von Schüttgütern mit geringer Kohäsion zugeordnet werden können (siehe 1.5.23);
- wenn das gelagerte Schüttgut zur mechanischen Verzahnung der Schüttgutpartikel untereinander und zur Brückenbildung (z. B. Zementklinker) neigt;
- oder aus anderen als den genannten Gründen zu stoßartigen Belastungen beim Entleeren neigt (z. B. Pulsieren, Schlagen).

ANMERKUNG Die Bestimmung der Kohäsion c eines Schüttgutes ist in C.9 beschrieben. Die Kohäsion c wird als gering eingestuft, wenn sie nach einer Verdichtung des Schüttgutes unter dem Spannungsniveau σ_r den Wert $c/\sigma_r = 0,04$ nicht übersteigt (siehe 1.5.23).

G.6 Fülllasten auf waagerechte und nahezu waagerechte Böden

(1) Die vertikalen Fülllasten auf waagerechte und nahezu waagerechte Siloböden (Neigung $\alpha \leq 20^\circ$) sollten nach Gleichung (G.4) berechnet werden:

$$p_{vft} = C_b p_{vf} \quad (\text{G.3})$$

Dabei ist

p_{vf} die vertikale Fülllast nach den Gleichungen (5.3) oder (5.79) an der maßgeblichen Tiefe z ; unterhalb der äquivalenten Schüttgutoberfläche;

C_b der Bodenlastvergrößerungsfaktor.

G.7 Fülllasten auf die Trichterwände

(1) Bei einer Neigung der Trichterwände gegen die Horizontale α von größer als 20° (siehe Bild 1.1b)) sollten die Lasten senkrecht auf die geneigten Trichterwände p_n wie folgt berechnet werden:

$$p_n = p_{n3} + p_{n2} + (p_{n1} - p_{n2}) \frac{x}{l_h} \quad (\text{G.4})$$

mit:

$$p_{n1} = p_{\text{vft}} (C_b \sin^2 \beta + \cos^2 \beta) \quad (\text{G.5})$$

$$p_{n2} = p_{\text{vft}} C_b \sin^2 \beta \quad (\text{G.6})$$

$$p_{n3} = 3,0 \frac{A}{U} \frac{\gamma K}{\sqrt{\mu_n}} \cos^2 \beta \quad (\text{G.7})$$

Dabei ist

- β die Neigung der Trichterwände gegen die Vertikale (siehe Bild G.1);
- x der Abstand zwischen unterem Trichterende und betrachtetem Punkt (Betrag zwischen 0 und l_h) nach Bild G.1;
- p_{n1} und p_{n2} Anteile zur Beschreibung der Trichterlasten infolge Trichterfüllung;
- p_{n3} Anteil des Lastanteiles infolge des im Trichter befindlichen Schüttgutes;
- C_b der Bodenlastvergrößerungsfaktor;
- p_{vft} die Vertikallast am Trichteransatzpunkt nach dem Füllen nach den Gleichungen (5.3) oder (5.79)
- μ_n der untere charakteristische Wert des Wandreibungskoeffizienten im Trichter;
- K der obere charakteristische Wert des Horizontallastverhältnisses des gespeicherten Schüttgutes;
- A Querschnittsfläche des vertikalen Siloschaftes;
- U Umfangsfläche des Querschnittes des vertikalen Siloschaftes.

(2) Die Wandreibungslasten p_t ergeben sich zu:

$$p_t = p_n \mu_n \quad (\text{G.8})$$

Dabei ist p_n der sich aus Gleichung (G.4) errechnende Wert.

(3) Wenn die Drücke nach den Gleichungen (G.5), (G.6) und (G.7) ermittelt werden, sollten die selben charakteristischen Werte K verwendet werden. Sowohl der untere als auch der obere charakteristische Wert sollten betrachtet werden.

ANMERKUNG Da der untere charakteristische Wert K den höchsten Wert von p_{vft} (siehe Gleichung G.3), jedoch der obere charakteristische Wert K den höchsten Wert von p_{n3} ergibt, ist es nicht möglich, eine allgemeine Aussage darüber zu treffen, welcher charakteristische Wert den ungünstigsten Lastfall für den Trichter ergibt. Daher sollten beide charakteristischen Werte ermittelt werden.

G.10 Alternative Gleichungen für den Trichterlastbeiwert F_e für den Lastfall Entleeren

(1) In einem Trichter mit steilen Trichterwänden darf im Lastfall Entleeren der mittlere Vertikaldruck an beliebiger Stelle im Schüttgut nach den Gleichungen (6.7) und (6.8) alternativ unter Verwendung des folgenden Parameters F_e berechnet werden:

$$F_e = \left(\frac{1}{1 + \mu \cot \beta} \right) \left\{ 1 + 2 \left[1 + \left(\frac{\sin \phi_1}{1 + \sin \phi_1} \right) \left(\frac{\cos \varepsilon \sin(\varepsilon - \beta)}{\sin \beta} \right) \right] \right\} \quad (\text{G.10})$$

wobei:

$$\varepsilon = \beta + \frac{1}{2} \left(\phi_{wh} + \sin^{-1} \left\{ \frac{\sin \phi_{wh}}{\sin \phi_1} \right\} \right) \quad (\text{G.11})$$

$$\phi_{wh} = \arctan \mu_h \quad (\text{G.12})$$

Dabei ist

μ_h der untere charakteristische Wert des Wandreibungskoeffizienten im Trichter;

ϕ_1 der Winkel der inneren Reibung des gespeicherten Schüttgutes.

ANMERKUNG Die Gleichung (G.10) ist anstatt der Gleichung (6.21) zu verwenden. Die Gleichung (G.10) für F_e basiert auf die für die Entleerungsdrücke etwas komplexere Theorie von Enstad.

Anhang H (normativ)

Einwirkungen infolge von Staubexplosionen

H.1 Allgemeines

(1) Dieser Anhang enthält Hinweise zur Berücksichtigung von Staubexplosionen in Siloanlagen.

H.2 Anwendung

(1) Dieser Anhang gilt für alle Siloanlagen und vergleichbare Anlagen, bei deren Betrieb brenn- und explosionsfähige, nichttoxische Stäube bearbeitet oder gelagert werden oder als Abfall in größerer Menge anfallen.

(2) Er muss nicht bei Anlagenteile berücksichtigt werden, in denen durch gezielte Maßnahmen Explosionen ausgeschlossen werden.

(3) Für die Nachrüstung bestehender Anlagen kann dieser Anhang sinngemäß angewendet werden. Dabei ist der tatsächliche Zustand der Anlage zu berücksichtigen und nicht der Planungszustand. Im Zweifelsfall sollte eine sachkundige Beratung eingeholt werden.

H.3 Symbole

- p_{\max} maximaler Überdruck
 p_{red} reduzierter maximaler Überdruck
 p_a Ansprechdruck des Entlastungssystems

H.4 Explosionsfähige Stäube und ihre Kennwerte

(1) Die Stäube vieler Schüttgüter, die üblicherweise in Siloanlagen gelagert werden, sind explosionsfähig. Explosionen können auftreten, wenn vorhandene organische oder anorganische Stäube mit hinreichend kleiner Partikelgröße exotherm mit Sauerstoff reagieren und damit eine rasch fortschreitende Reaktion ermöglichen.

(2) Während einer Explosion von Stäuben aus üblichen in Silos gelagerten Schüttgütern können in geschlossenen Räumen ohne Entlastungsöffnungen Überdrücke bis zu 8 bar bis 10 bar entstehen.

(3) Die Kennwerte für das Explosionsverhalten eines Staubes sind:

- der Staubkennwert K_{ST} ;
- der maximale Explosionsüberdruck p_{\max} .

(4) Der Staubkennwert K_{ST} entspricht der maximalen Druckerhöhungsgeschwindigkeit dp/dt .

(5) Die Bemessung sollte nach den in EN 26184-1 festgelegten Verfahren erfolgen.

(6) Die wichtigsten explosionsfähigen Staubarten sind: Cellulose, Düngemittel, Erbsenmehl, Futtermittel, Gummi, Getreide, Holz, Holzmehl, Braunkohle, Kunststoffe, Kraftfuttergemische, Getreidemehl, Harz, Kartoffelmehl, Malz, Maismehl, Maisstärke (getrocknet), Milchpulver, Papier, Pigmente, Sojaschrot, Sojamehl, Steinkohle, Weizenmehl, Waschmittel und Zucker.

H.5 Zündquellen

(1) Für die Zündung dieser Stäube reichen im Allgemeinen kleine Energiemengen aus. Typische Zündquellen in Silozellen oder Nebenräumen und an technischen Einrichtungen sind:

- heiße Oberflächen, die z. B. durch Reibung schadhafter Anlagenteile entstehen können;
- Funken beim Schweißen, Schleifen und Schneiden z. B. während Reparaturarbeiten;
- Glimmnester, die auch von außen mit dem Schüttgut in die Silozelle eingetragen werden können;
- Funken durch Fremdkörper wie z. B. durch Fördereinrichtungen;
- Ungeeignete oder schadhafte elektrische Betriebsmittel (z. B. Glühlampen);
- Hitzeentwicklung von Trockner und
- Selbstzündung durch elektrostatische Entladung.

H.6 Schutzmaßnahmen

(1) Die Schäden infolge einer Staubexplosion lassen sich dadurch minimieren, indem das Auftreten der Explosion möglichst auf den Bereich eingegrenzt wird, in dem die Entzündung auftritt. Ein Überspringen der Explosionen auf andere Gebäudeabschnitte sollte vermieden werden. Die auftretenden Explosionsüberdrücke sollten minimiert werden.

(2) Die Folgen einer Explosion können durch geeignete Vorsorgemaßnahmen während der Planung vermindert werden (z. B. durch das Einrichten von Explosionssperren ähnlich wie Feuerschutzwände).

(3) Die einzelnen Gebäudeabschnitte zwischen den Explosionsbarrieren sollten für eine der beiden folgenden Bedingungen bemessen werden:

- wenn keine Druckentlastung vorgesehen ist, müssen die Abschnitte für den maximalen Explosionsüberdruck p_{max} bemessen werden;
- wenn eine geeignete Entlastung vorgesehen wird, müssen die Abschnitte mit dem größten reduzierten Explosionsüberdruck p_{red} bemessen werden.

(4) Die Beträge der reduzierten Explosionsüberdrücke p_{red} hängen von der Art des Staubes, der Größe des zu entlastenden Abschnittes und der Entlastungsöffnungen, dem Ansprechdruck p_a und der Trägheit der Entlastungssystems ab.

(5) Die Folgen von Stichflammen, die bei einer Explosion aus Entlastungsöffnungen austreten, sollten bei der Planung berücksichtigt werden. Es sollte weder zu Beeinträchtigungen der Umgebung führen, noch die Explosion in einen anderen Explosionsabschnitt weitergeleitet werden.

(6) Der Entwurf sollte eine Gefahrengrenzung für Menschen durch Vermeidung von herumfliegenden Glassplittern oder anderen Bauteilen berücksichtigen. Druckentlastungsöffnungen sollen deshalb möglichst direkt ins Freie führen. Bei einzelnen Silozellen kann dies durch belüftete Dächer erfolgen. Bei Silobatterien bzw. Silogruppen können hierzu z. B. Treppenhäuser oder hochliegende Fensterflächen herangezogen werden.

(7) Das Entlastungssystem sollte einen möglichst geringen Ansprechdruck und eine niedrige Massenträgheit aufweisen.

(8) Der Entwurf sollte dabei berücksichtigen, dass bei einem frühen Ansprechen eines Entlastungssystems eine wesentlich größere Menge des brennbaren Staub-Luft-Gemisches weitergeleitet wird als bei trägeren Systemen.

DIN EN 1991-4:2010-12
EN 1991-4:2006 (D)

H.7 Bemessung der Bauteile

(1) Die Bemessung der betroffenen Bauteile sollte nach den Regeln für außergewöhnliche Lasten (Katastrophenlastfälle) durchgeführt werden.

H.8 Bemessung für Explosionsüberdruck

(1) Alle tragenden und raumabschließenden Bauteile eines Explosionsabschnittes sollten für den Widerstand gegen den Bemessungsdruck bei Explosionen ausgelegt werden.

H.9 Bemessung für Unterdruck

(1) Trägheitskräfte infolge schneller Gasentladung, die durch Abkühlung des heißen Staubes begleitet werden, sollten beim Entwurf berücksichtigt werden. Diese Phänomene sind mit der Explosion verbunden und können zu einem Unterdruck führen, der bei der Bemessung berücksichtigt werden sollte.

H.10 Sicherung der Abschlusselemente der Entlastungsöffnungen

(1) Alle wichtigen Abschlusselemente sollten gegen Wegfliegen infolge Explosionswellen gesichert werden (z. B. Klappen durch Gelenke, Deckel durch Auffangkonstruktionen, Seile o. Ä. Befestigungen).

ANMERKUNG Die Bemessung darf nach den im DIN-Fachbericht 140 „Auslegung von Siloanlagen gegen Staubexplosionen“, veröffentlicht im Januar 2005 durch den Beuth Verlag, angegebenen Verfahren erfolgen.

H.11 Rückstoßkräfte durch Druckentlastung

(1) Bei der Druckentlastung treten Rückstoßkräfte auf, die beim Standsicherheitsnachweis gegebenenfalls berücksichtigt werden müssen. Dies ist insbesondere bei leichten Konstruktionen mit horizontalen und unsymmetrisch über den Querschnitt verteilten Entlastungsöffnungen zu prüfen.

ANMERKUNG Die Rückstoßkräfte können nach den Angaben im DIN-Fachbericht 140 „Auslegung von Siloanlagen gegen Staubexplosionen“, veröffentlicht im Januar 2005 durch den Beuth Verlag, ermittelt werden.