

E DIN EN 1991-4:2024-03 (D/E)

Erscheinungsdatum: 2024-02-02

Eurocode 1 - Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 4: Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter; Deutsche und Englische Fassung prEN 1991-4:2024

Eurocode 1 - Actions on structures - Part 4: Silos and tanks; German and English version prEN 1991-4:2024

Inhalt

Seite

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

5.5	Spezielle Silolastfälle (SSLCs).....	50
5.5.1	Allgemeines.....	50
5.5.2	Situationen, die spezielle Silolastfälle erfordern.....	50
5.5.3	Asymmetrische Entleerung.....	51
5.5.4	Exzentrizitätsgrenzen.....	54
5.5.5	Lasten durch große Exzentrizitäten beim Befüllen von schlanken und sehr schlanken jeweils kreisförmigen Silos.....	55
5.5.6	Große Exzentrizitäten beim Befüllen von kreisförmigen niedrigen Silos und kreisförmigen Silos mit mittlerer Schlankheit.....	55
5.5.7	Lasten durch mittlere Exzentrizitäten beim Entleeren von schlanken und sehr schlanken jeweils kreisförmigen Silos.....	55
5.5.8	Lasten durch mittlere Exzentrizitäten beim Entleeren von kreisförmigen niedrigen Silos und kreisförmigen Silos mit mittlerer Schlankheit.....	56
5.5.9	Schlotfluss mit großer Exzentrizität in kreisförmigen und rechteckigen Silos.....	56
5.5.10	Silos mit fluidisiertem Schüttgut.....	56
5.5.11	Temperaturunterschiede zwischen Schüttgut und Silokonstruktion.....	57
5.5.12	Unterdruck durch unzureichende Belüftung.....	57
5.5.13	Lasten auf vertikale Wände von besonderen rechteckigen Silos.....	57
5.5.14	Innerer invertierter Kegel.....	57
5.5.15	Schiefe konische Trichter.....	58
5.5.16	Exzentrischer Schlotfluss in steilen konzentrischen oder schiefen Trichtern.....	58
5.5.17	Prinzipien für die Bemessung von Silos für Staubexplosionen.....	58
5.6	Lastmodifikationsfaktoren für die direkte Anwendung bei der Ermittlung von Lasten.....	59
5.7	Darstellung der auf Flüssigkeitsbehälter wirkenden Lasten.....	60
6	Schüttgutkennwerte.....	61
6.1	Allgemeines.....	61
6.1.1	Fließfähigkeitskategorie.....	61
6.1.2	Schüttgutkennwerte für Bemessungsberechnungen.....	61
6.1.3	Wandrauigkeitsklasse.....	61
6.1.4	Charakteristische Werte für Materialkennwerte.....	63
6.1.5	Anwendungen des effektiven Elastizitätsmoduls.....	64
6.2	Schüttgutkennwerte: Kurzbeschreibung und Hintergrund.....	65
6.2.1	Allgemeines.....	65
6.2.2	Ermittlung geeigneter Schüttgutkennwerte für die Bemessung.....	67
6.3	Messung der Schüttgutkennwerte in Versuchen.....	67
6.3.1	Experimentelle Ermittlung (Messverfahren).....	67
6.3.2	Bestimmung der Schüttgutwichte γ	67
6.3.3	Wandreibungskoeffizient μ	68
6.3.4	Winkel der inneren Reibung ϕ	68
6.3.5	Horizontaldruckverhältnis K	68
6.3.6	Kohäsion c	69
6.3.7	Porosität n	69
7	Symmetrische Lasten auf vertikale Wände (grundlegende Silolastfälle).....	70
7.1	Allgemeines.....	70
7.2	Schlanke und sehr schlanke Silos ($h_c/d_c \geq 2,0$).....	71
7.2.1	Symmetrische Fülllasten auf die vertikalen Wände von schlanken und sehr schlanken Silos.....	71
7.2.2	Symmetrische Entleerungslasten auf die vertikalen Wände von schlanken und sehr schlanken, von oben entleerten Silos.....	73
7.2.3	Symmetrische Entleerungslasten auf die vertikalen Wände von schlanken und sehr schlanken Silos bei Massenfluss.....	73
7.2.4	Symmetrische Entleerungslasten auf die vertikalen Wände von schlanken und sehr schlanken Silos bei gemischtem Fließen.....	74
7.3	Niedrige Silos und Silos mit mittlerer Schlankheit ($0,4 \leq h_c/d_c < 2,0$).....	77
7.3.1	Symmetrische Fülllasten auf die vertikalen Wände von niedrigen Silos und Silos mit mittlerer Schlankheit.....	77

7.3.2	Symmetrische Entleerungslasten auf die vertikalen Wände von schlanken und sehr schlanken Silos bei innerem Schlotfluss oder Entleerung von oben	79
7.3.3	Symmetrische Entleerungslasten auf die vertikalen Wände niedrigen Silos und Silos mit mittlerer Schlankheit bei Massenfluss oder gemischtem Fließen	79
7.4	Stützwandsilos ($h_c/d_c < 0,4$).....	80
7.4.1	Fülllasten auf vertikale Wände von Stützwandsilos	80
7.4.2	Entleerungslasten auf vertikale Wände von Stützwandsilos.....	81
8	Spezielle Silolastfälle für vertikale Wände	82
8.1	Allgemeines.....	82
8.2	Durch Ersatzlasten dargestellte unsymmetrische Druckverhältnisse in schlanken und sehr schlanken Silos.....	82
8.2.1	Allgemeines.....	82
8.2.2	Ersatzlast: dickwandige kreisförmige Silos ($d_c/t < 200$).....	82
8.2.3	Ersatzlast: dünnwandige kreisförmige Silos ($d_c/t \geq 200$).....	85
8.3	Große Exzentrizitäten beim Befüllen von niedrigen Silos und Silos mit mittlerer Schlankheit.....	86
8.4	Schlotfluss in allen Silos mit großer Fließkanalexzentrizität.....	87
8.4.1	Allgemeines.....	87
8.4.2	Schlotfluss beim exzentrischen Entleeren von sehr schlanken und schlanken kreisförmigen Silos.....	88
8.4.3	Große Exzentrizitäten beim Entleeren von kreisförmigen niedrigen Silos und kreisförmigen Silos mit mittlerer Schlankheit.....	92
8.4.4	Lasten beim Entleeren mit großer Exzentrizität bei rechteckigen Silos.....	92
8.5	Silos mit fluidisiertem Schüttgut.....	93
8.5.1	Allgemeines.....	93
8.5.2	Lasten in Silos zur Lagerung von fluidisiertem Schüttgut.....	94
8.6	Temperaturunterschiede zwischen Schüttgut und Silokonstruktion.....	94
8.6.1	Allgemeines.....	94
8.6.2	Lasten infolge einer Abnahme der atmosphärischen Umgebungstemperaturen oder des Aufquellens des Produkts.....	95
8.6.3	Durch das Befüllen eines Silos mit heißem Schüttgut entstehende Drücke	96
8.7	Unterdruck durch unzureichende Belüftung.....	96
8.8	Lasten auf vertikale Wände von besonderen rechteckigen Silos	96
8.8.1	Rechtecksilos	96
8.8.2	Rechteckige Silos mit inneren Zuggliedern	97
8.8.3	Rechteckige Silos mit flexiblen Wänden	97
9	Symmetrische Lasten auf Siloböden und -trichter (grundlegende Silolastfälle).....	99
9.1	Allgemeines.....	99
9.1.1	Physikalische Kennwerte	99
9.1.2	Allgemeine Regelungen.....	102
9.2	Steile Trichter.....	103
9.2.1	Mobilisierte Reibung.....	103
9.2.2	Fülllasten bei symmetrischen Bedingungen	103
9.2.3	Entleerungslasten bei symmetrischen Bedingungen	104
9.3	Flache Trichter.....	105
9.3.1	Mobilisierte Reibung.....	105
9.3.2	Fülllasten.....	106
9.3.3	Entleerungslasten	106
9.4	Waagerechte Siloböden.....	106
9.4.1	Vertikaldrücke auf waagerechte Siloböden in schlanken Silos	106
9.4.2	Vertikaldruckverteilung auf dem waagerechten Boden eines niedrigen Silos oder eines Silos mittlerer Schlankheit.....	107
10	Spezielle Silolastfälle für Trichter und Siloböden	108
10.1	Kreisförmige Silos mit innerem invertiertem Kegel.....	108
10.1.1	Allgemeines.....	108
10.1.2	Drücke auf die vertikale Wand und den Boden des Silos	109
10.1.3	Symmetrische Lasten auf den Kegel.....	110

10.1.4	Asymmetrische Lasten auf den Kegel	111
10.2	Schiefe konische Trichter	113
10.3	Entleerungslasten bei exzentrischem Schlotfluss in steilen konzentrischen oder schiefen Trichtern	115
10.3.1	Allgemeines	115
10.3.2	Exzentrisches Entleeren bei Schlotfluss in steilen konischen Trichtern	115
10.4	Trichter in Silos mit Gebläse	116
11	Lasten auf Flüssigkeitsbehälter	116
11.1	Allgemeines	116
11.2	Lasten infolge gelagerter Flüssigkeiten	117
11.3	Kennwerte der Flüssigkeiten	117
11.4	Lasten durch Luft-, Gas- oder Dampfdruck	117
11.5	Temperaturen des Flüssigkeitsbehälterinhalts	118
11.6	Bewertung von Ermüdungslastfällen	118
Anhang A (informativ) Einwirkungen und Kombinationen von Einwirkungen auf Silos		119
A.1	Anwendung dieses Anhangs	119
A.2	Anwendungsbereich	119
A.3	Allgemeines	119
A.4	Einwirkungen auf Silos	120
A.4.1	Eigengewicht	120
A.4.2	Fülllasten	120
A.4.3	Entleerungslasten	120
A.4.4	Nutzlasten	120
A.4.5	Schneelasten	120
A.4.6	Windlasten	120
A.4.7	Temperatureinwirkungen	121
A.4.8	Zwangsverformungen	121
A.4.9	Seismische Lasten	121
A.4.10	Außergewöhnliche Einwirkungen	122
A.4.11	Einwirkungen während der Bauausführung	122
A.5	Geplante Nutzungsdauer	122
A.6	Bemessungssituationen für Silos	122
Anhang B (informativ) Einwirkungen und Kombinationen von Einwirkungen auf Flüssigkeitsbehälter		124
B.1	Anwendung dieses Anhangs	124
B.2	Anwendungsbereich	124
B.3	Allgemeines	124
B.4	Einwirkungen auf Flüssigkeitsbehälter	125
B.4.1	Eigengewicht	125
B.4.2	Flüssigkeitsbehälterlasten	125
B.4.3	Nutzlasten	125
B.4.4	Schneelasten	125
B.4.5	Windlasten	126
B.4.6	Lasten aus Temperatur(-änderung)	126
B.4.7	Lasten aus vibrierenden Maschinen	126
B.4.8	Zwangsverformungen	127
B.4.9	Seismische Lasten	127
B.4.10	Prüflasten	127
B.4.11	Außergewöhnliche Einwirkungen	128
B.4.12	Einwirkungen während der Bauausführung	128
B.5	Geplante Nutzungsdauer	128
Anhang C (normativ) Angabe von Schüttgutkennwerten		129
C.1	Anwendung dieses Anhangs	129
C.2	Anwendungsbereich	129
C.3	Angegebene Werte	129

Anhang D (normativ) Messung von Schüttgutkennwerten für die Ermittlung von Silolasten.....	134
D.1 Anwendung dieses Anhangs	134
D.2 Anwendungsbereich.....	134
D.3 Klassifizierung von granularen Materialien.....	134
D.3.1 Allgemeines	134
D.3.2 Fließfähigkeitskategorie A: grobe granuläre Materialien, die nicht zu Kohäsion neigen	134
D.3.3 Fließfähigkeitskategorie B: Schüttgüter, die bei der Konsolidierung zur Ausbildung leichter Kohäsion neigen, die beim Fließen unter Scherdehnung verschwindet.....	135
D.3.4 Fließfähigkeitskategorie C: alle anderen relativ isotropen Schüttgüter, die signifikante Kohäsion ausbilden	135
D.3.5 Fließfähigkeitskategorie D: stark anisotrope Schüttgüter	135
D.4 Verhalten von Schüttgütern unterschiedlicher Fließfähigkeitskategorien in Silos.....	135
D.5 Gegenstand der Verfahren für die experimentelle Bestimmung von Kennwerten	137
D.6 Anwendung.....	137
D.7 Symbole	138
D.8 Definitionen	138
D.8.1 sekundärer Parameter	138
D.8.2 Probenahme.....	138
D.8.3 Referenzspannung	139
D.9 Probenahme und Probenvorbereitung.....	139
D.10 Schüttgutwichte γ	140
D.10.1 Kurzbeschreibung.....	140
D.10.2 Gerät.....	140
D.10.3 Durchführung	141
D.11 Wandreibung	141
D.12 Koeffizient der Wandreibung μ für die Ermittlung der Lasten (Wandreibungskoeffizient) ..	142
D.12.1 Kurzbeschreibung.....	142
D.12.2 Gerät.....	142
D.12.3 Durchführung	142
D.13 Wandreibungswinkel ϕ_{wh} zur Beurteilung des Fließverhaltens	143
D.14 Horizontaldruckverhältnis K	143
D.14.1 Direkte Messung	143
D.14.2 Indirekte Messung	145
D.15 Festigkeitsparameter: Kohäsion c und Winkel der inneren Reibung ϕ_i	145
D.15.1 Direkte Messung	145
D.15.2 Indirekte Messung	148
D.16 Böschungswinkel ϕ_r	149
D.17 Effektiver Elastizitätsmodul E_S	149
D.17.1 Direkte Messung.....	149
D.17.2 Indirekte Abschätzung.....	152
D.18 Bestimmung der oberen und unteren charakteristischen Werte von Schüttgutparametern und Ermittlung des Umrechnungsfaktors a	153
D.18.1 Kurzbeschreibung.....	153
D.18.2 Methoden zur Abschätzung.....	154
Anhang E (normativ) Abschätzung der Schüttgutkennwerte für bestimmte Bedingungen	156
E.1 Anwendung dieses Anhangs	156
E.2 Anwendungsbereich.....	156
E.3 Abschätzung des Wandreibungskoeffizienten für eine gewellte Wand	156
E.4 Innere Reibung und Wandreibung eines grobkörnigen Schüttgutes ohne Feinanteile	157
E.5 Ermittlung der effektiven Wandreibung für Silowände mit inneren Aussteifungselementen.....	158
Anhang F (informativ) Einwirkungen infolge von Staubexplosionen.....	159
F.1 Anwendung dieses Anhangs	159
F.2 Anwendungsbereich.....	159
F.3 Explosionsfähige Stäube und ihre Kennwerte	159
F.4 Zündquellen	160
F.5 Schutzmaßnahmen	160

F.6	Bemessung der Bauteile.....	161
F.7	Bemessung für die Folgen einer Staubexplosion.....	161
Anhang G (informativ) Ablaufdiagramme als Hilfe für die Anwendung dieser Norm.....		162
G.1	Anwendung dieses Anhangs	162
G.2	Anwendungsbereich.....	162
Literaturhinweise		169