

# 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
<b>0</b> Einleitung.....	<b>9</b>
<b>1</b> Anwendungsbereich.....	<b>11</b>
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
<b>2</b> Normative Verweisungen .....	<b>17</b>
<b>3</b> Begriffe und Symbole .....	<b>17</b>
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
<b>4</b> Klassifizierung von Silos .....	<b>32</b>
4.1 Anforderungsklassen für Silos.....	32
4.2 Siloverwendungsklassen .....	34
<b>5</b> Bemessungssituationen und Modellierung der Einwirkungen.....	<b>34</b>
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 $\gamma$ .....	67
6.3.3	Wandreibungskoeffizient $\mu$ .....	68
6.3.4	Winkel der inneren Reibung $\phi$ .....	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
<b>Anhang A (informativ) Einwirkungen und Kombinationen von Einwirkungen auf Silos .....</b>		<b>119</b>
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
<b>Anhang B (informativ) Einwirkungen und Kombinationen von Einwirkungen auf Flüssigkeitsbehälter .....</b>		<b>124</b>
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
<b>Anhang C (normativ) Angabe von Schüttgutkennwerten .....</b>		<b>129</b>
C.1	Anwendung dieses Anhangs .....	129
C.2	Anwendungsbereich .....	129
C.3	Angegebene Werte .....	129

<b>Anhang D (normativ) Messung von Schüttgutkennwerten für die Ermittlung von Silolasten</b> .....	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 $\gamma$ .....	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 $\mu$ 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 $\phi_{wh}$ 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 $\phi_i$ .....	145
D.15.1 Direkte Messung .....	145
D.15.2 Indirekte Messung .....	148
D.16 Böschungswinkel $\phi_r$ .....	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
<b>Anhang E (normativ) Abschätzung der Schüttgutkennwerte für bestimmte Bedingungen</b> .....	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
<b>Anhang F (informativ) Einwirkungen infolge von Staubexplosionen</b> .....	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

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