

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 |