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_i 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 granulare 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