

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

## Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 4: Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter; Deutsche Fassung EN 1991-4:2006

---

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
<b>1 Allgemeines .....</b>	<b>11</b>
1.1 Anwendungsbereich .....	11
1.1.1 Anwendungsbereich von EN 1991 -- Eurocode 1 .....	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
<b>2 Darstellung und Klassifikation der Einwirkungen .....</b>	<b>25</b>
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
<b>3 Bemessungssituationen .....</b>	<b>28</b>
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
<b>4 Schüttgut .....</b>	<b>37</b>
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 .....	41
4.3.3 Wandreibungskoeffizient .....	41

4.3.4	Winkel der inneren Reibung $i$ .....	42
4.3.5	Horizontalverhältnis $K$ .....	42
4.3.6	Kohäsion $c$ .....	43
4.3.7	Schüttgutbeiwert für die Teilflächenlast $Cop$ .....	43
<b>5</b>	<b>Lasten auf vertikale Silowände .....</b>	<b>43</b>
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
<b>6</b>	<b>Lasten auf Silotrichter und Siloböden .....</b>	<b>70</b>
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
<b>7</b>	<b>Lasten auf Flüssigkeitsbehälter .....</b>	<b>78</b>
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
<b>Anhang A (informativ) Grundlagen der Tragwerksplanung -- Regeln in Ergänzung zu EN 1990 für Silos und Flüssigkeitsbehälter .....</b>		<b>80</b>
A.1	Allgemeines .....	80
A.2	Grenzzustand der Tragfähigkeit .....	80

A.2.1	Teilsicherheitsbeiwerte .....	80
A.2.2	Kombinationsbeiwerte .....	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
<b>Anhang B (informativ) Einwirkungen, Teilsicherheitsfaktoren und Kombinationsbeiwerte der Einwirkungen auf Flüssigkeitsbehälter .....</b>		
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
<b>Anhang C (normativ) Messung von Schüttgutkennwerten für die Ermittlung von Silolasten .....</b>		
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 .....	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 $m$ zur Ermittlung der Lasten .....	95
C.7.3	Wandreibungswinkel $\varphi_h$ 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 $i$ .....	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
<b>Anhang D (normativ) Abschätzung der Schüttgutkennwerte für die Ermittlung der Silolasten .....</b>		
D.1	Ziel .....	108
D.2	Abschätzung des Wandreibungskoeffizienten für eine gewellte Wand .....	108

D.3	Innere Reibung und Wandreibung eines grobkörnigen Schüttgutes ohne Feinanteile .....	109
Anhang E (normativ) Angabe von Schüttgutkennwerten .....		110
E.1	Allgemeines .....	110
E.2	Angegebene Werte .....	110
Anhang F (informativ) Bestimmung der Fließprofile .....		112
F.1	Massen- und Kernfluss .....	112
Anhang G (normativ) Alternative Regeln zur Ermittlung von Trichterlasten .....		113
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 .....		118
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

<b>Bild 5.3 -- Längs- und Querschnitt mit Darstellung der Lastbilder der Teilflächenlasten für nicht kreisförmige Silos .....</b>	<b>49</b>
<b>Bild 5.4 -- Längs- und Querschnitt mit Darstellung der Lastbilder der Teilflächenlasten bei Entleerung .....</b>	<b>52</b>
<b>Bild 5.5 -- Fließkanal und Druckverteilung bei der Entleerung mit großen Exzentrizitäten .....</b>	<b>57</b>
<b>Bild 5.6 -- Lasten in einem niedrigen Silo oder Silo mit mittlerer Schlankheit nach dem Füllen (Fülllasten) .....</b>	<b>61</b>
<b>Bild 5.7 -- Fülldrücke bei exzentrisch gefüllten niedrigen Silos oder Silos mit mittlerer Schlankheit .....</b>	<b>64</b>
<b>Bild 5.8 -- Fülldrücke in einem Stützwandsilo .....</b>	<b>66</b>
<b>Bild 6.1 -- Grenze zwischen steilem und flachem Trichter .....</b>	<b>71</b>
<b>Bild 6.2 -- Verteilung der Fülldrücke in einem steilen und flachen Trichter .....</b>	<b>72</b>
<b>Bild 6.3 -- Bodenlasten in niedrigen Silos und in Silos mit mittlerer Schlankheit .....</b>	<b>75</b>
<b>Bild 6.4 -- Entleerungsdrücke in einem steilen und einem flach geneigten Trichter .....</b>	<b>77</b>
<b>Bild B.1 -- Druckkoeffizienten für Windlasten auf einem kreisförmigen zylindrischen Flüssigkeitsbehälter .....</b>	<b>89</b>
<b>Bild C.1 -- Vorrichtung zur Bestimmung von .....</b>	<b>94</b>
<b>Bild C.2 -- Prüfverfahren zur Bestimmung des Wandreibungskoeffizienten .....</b>	<b>96</b>
<b>Bild C.3 -- Prüfverfahren zur Bestimmung von <math>K_0</math> .....</b>	<b>98</b>
<b>Bild C.4 -- Prüfverfahren zur Bestimmung der Winkel der inneren Reibung <math>i</math> und <math>c</math> und der Kohäsion <math>c</math> basierend auf der beim Vorverdichten aufgetragenen Spannung <math>r</math> .....</b>	<b>100</b>
<b>Bild C.5 -- Prüfverfahren zur Bestimmung der Elastizitätsmoduli bei Be- und Entlastung .....</b>	<b>103</b>
<b>Bild D.1 -- Abmessungen der Profilierung der Wandoberfläche .....</b>	<b>109</b>
<b>Bild F.1 -- Abgrenzung von Massen- und Kernflussbedingungen bei konischen und keilförmigen Trichtern .....</b>	<b>112</b>
<b>Bild G.1 -- Alternative Anordnung für die Trichterlasten .....</b>	<b>116</b>
 <b>Tabellen</b>	
<b>Tabelle 2.1 -- Klassifikation von Bemessungssituationen .....</b>	<b>28</b>
<b>Tabelle 3.1 -- Maßgebliche Kennwerte für die unterschiedlichen Lastansätze .....</b>	<b>30</b>
<b>Tabelle 4.1 -- Kategorien der Wandoberflächen .....</b>	<b>40</b>
<b>Tabelle A.1 -- Zu betrachtende Bemessungssituationen und Kombinationen von Einwirkungen .....</b>	<b>82</b>
<b>Tabelle A.2 -- „Allgemeiner“ Grenzzustand der Tragfähigkeit („Ordinary“ ULS) -- Zu betrachtende Bemessungssituationen und Kombinationen von Einwirkungen .....</b>	<b>83</b>
<b>Tabelle A.3 -- Grenzzustand der Tragfähigkeit für außergewöhnliche Lasten („Accidental“ ULS) -- Zu betrachtende Bemessungssituationen und Kombinationen von Einwirkungen .....</b>	<b>83</b>

<b>Tabelle A.4 -- Grenzzustand der Tragfähigkeit bei seismischer Beanspruchung („Seismic“ ULS) -- Zu betrachtende Bemessungssituationen und Kombinationen von Einwirkungen .....</b>	<b>84</b>
<b>Tabelle A.5 -- Grenzzustand der Gebrauchsfähigkeit (SLS) -- Zu betrachtende Bemessungssituationen und Kombinationen von Einwirkungen .....</b>	<b>85</b>
<b>Tabelle C.1 -- Versuchsparameter .....</b>	<b>100</b>
<b>Tabelle C.2 -- Typische Werte der Variationskoeffizienten für die Schüttgutkennwerte .....</b>	<b>107</b>
<b>Tabelle E.1 -- Schüttgutkennwerte .....</b>	<b>111</b>