

DIN 1055-6

ICS 91.010.30

Ersatz für
DIN 1055-6:1987-05**Einwirkungen auf Tragwerke –
Teil 6: Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter**

Actions on structures –

Part 6: Design loads for buildings and loads in silo bins

Actions sur les structures –

Partie 6: Charges en cellules de silos

Gesamtumfang 111 Seiten

Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN

Inhalt

Seite

Vorwort	7
1 Anwendungsbereich	8
2 Normative Verweisungen	10
3 Begriffe und Formelzeichen	11
3.1 Begriffe	11
3.2 Formelzeichen	15
3.2.1 Allgemeines	15
3.2.2 Große lateinische Buchstaben	15
3.2.3 Kleine lateinische Buchstaben	17
3.2.4 Große griechische Buchstaben	20
3.2.5 Kleine griechische Buchstaben	20
4 Darstellung und Klassifikation der Einwirkungen	21
4.1 Darstellung von Einwirkungen in Silos	21
4.2 Darstellung der Einwirkung auf Flüssigkeitsbehälter.....	22
4.3 Einstufung der Einwirkung auf Silozellen	23
4.4 Einstufung der Einwirkungen auf Flüssigkeitsbehälter	23
4.5 Anforderungsklassen.....	23
5 Bemessungssituationen	24
5.1 Allgemeines	24
5.2 Bemessungssituationen infolge von in Silos gelagerte „Schüttgüter“	24
5.3 Bemessungssituationen infolge unterschiedlicher geometrischer Ausbildungen der Silogeometrie.....	26
5.4 Bemessungssituationen infolge spezieller Konstruktionsformen von Silos	30
5.5 Bemessungssituationen infolge in Flüssigkeitsbehältern gelagerten Flüssigkeiten.....	30
5.6 Bemessungsprinzipien für Explosionen	30
6 Schüttgutkennwerte	31
6.1 Allgemeines	31
6.2 Schüttgutkennwerte	32
6.2.1 Allgemeines	32
6.2.2 Ermittlung der Schüttgutkennwerte	34
6.2.3 Vereinfachte Vorgehensweise.....	35
6.3 Messung der Schüttgutkennwerte in Versuchen	35
6.3.1 Experimentelle Ermittlung (Messverfahren)	35
6.3.2 Schüttgutwichte γ	36
6.3.3 Wandreibungskoeffizient μ	36
6.3.4 Winkel der inneren Reibung φ_i	36
6.3.5 Horizontallastverhältnis K	37
6.3.6 Kohäsion c	37
6.3.7 Schüttgutbeiwert für die Teilflächenlast C_{op}	37
7 Lasten auf vertikale Silowände	38
7.1 Allgemeines	38
7.2 Schlanke Silos	39
7.2.1 Fülllasten auf vertikale Silowände	39
7.2.2 Entleerungslasten auf vertikale Wände.....	44
7.2.3 Gleichförmige Erhöhung der Lasten als Ersatz für die Teilflächenlasten der Lastfälle Füllen und Entleeren bei kreisförmigen Silos	49
7.2.4 Entleerungslasten für kreisförmige Silos mit großen Exzentrizitäten bei der Entleerung.....	50
7.3 Niedrige Silos und Silos mit mittlerer Schlankheit	55
7.3.1 Fülllasten auf die vertikalen Wände.....	55

7.3.2	Entleerungslasten auf die vertikalen Silowände	57
7.3.3	Große Exzentrizitäten beim Befüllen von kreisförmigen niedrigen Silos und kreisförmigen Silos mit mittlerer Schlankheit	59
7.3.4	Große Entleerungsexzentrizitäten in kreisförmigen niedrigen Silos und kreisförmigen Silos mit mittlerer Schlankheit	60
7.4	Stützwandsilos	61
7.4.1	Fülllasten auf vertikale Wände	61
7.4.2	Entleerungslasten auf vertikale Wände	62
7.5	Silos mit fluidisiertem Schüttgut	62
7.5.1	Allgemeines	62
7.5.2	Lasten in Silos zur Lagerung von fluidisiertem Schüttgut	62
7.6	Temperaturunterschiede zwischen Schüttgut und Silokonstruktion	63
7.6.1	Allgemeines	63
7.6.2	Lasten infolge einer Abnahme der atmosphärischen Umgebungstemperaturen	64
7.6.3	Lasten infolge heiß eingefüllter Schüttgüter	64
7.7	Lasten in rechteckigen Silos	65
7.7.1	Rechtecksilos	65
7.7.2	Silos mit inneren Zuggliedern	65
8	Lasten auf Silotrichter und Siloböden	65
8.1	Allgemeines	65
8.1.1	Physikalische Kennwerte	65
8.1.2	Allgemeine Regelungen	67
8.2	Waagerechte Siloböden	69
8.2.1	Vertikallasten auf waagerechte Siloböden in schlanken Silos	69
8.2.2	Vertikallasten auf ebene Siloböden in niedrigen Silos und Silos mit mittlerer Schlankheit	69
8.3	Steiler Trichter	71
8.3.1	Mobilisierte Reibung	71
8.3.2	Fülllasten	71
8.3.3	Entleerungslasten	71
8.4	Flacher Trichter	72
8.4.1	Mobilisierte Reibung	72
8.4.2	Fülllasten	73
8.4.3	Entleerungslasten	73
8.5	Trichterlasten in Silos mit Lufteinblasevorrichtungen	73
9	Lasten auf Flüssigkeitsbehälter	74
9.1	Allgemeines	74
9.2	Lasten infolge gelagerter Flüssigkeiten	74
9.3	Kennwerte der Flüssigkeiten	74
9.4	Soglasten infolge von unzureichender Belüftung	74
Anhang A (informativ) Grundlagen der Tragwerksplanung – Regeln in Ergänzung zu DIN 1055-100 für Silos und Flüssigkeitsbehälter		75
A.1	Allgemeines	75
A.2	Grenzzustand der Tragfähigkeit	75
A.2.1	Teilsicherheitsbeiwerte γ	75
A.2.2	Kombinationsbeiwerte ψ	75
A.3	Einwirkungskombinationen	75
A.4	Bemessungssituation und Einwirkungskombinationen für die Anforderungsklassen 2 und 3	76
A.5	Einwirkungskombinationen für die Anforderungsklasse 1	77
Anhang B (normativ) Einwirkungen, Teilsicherheitsfaktoren und Kombinationsbeiwerte der Einwirkungen auf Flüssigkeitsbehälter		78
B.1	Allgemeines	78
B.2	Einwirkungen	78
B.2.1	Lasten aus gelagerten Flüssigkeiten	78
B.2.2	Lasten aus Innendrücken	78

	Seite
B.2.3 Lasten aus Temperatur(-änderung).....	78
B.2.4 Eigenlasten	78
B.2.5 Lasten aus Dämmung	78
B.2.6 Verteilte Nutzlasten	79
B.2.7 Konzentrierte Nutzlasten	79
B.2.8 Schnee.....	79
B.2.9 Wind.....	79
B.2.10 Unterdruck durch unzureichende Belüftung	81
B.2.11 Seismische Lasten	81
B.2.12 Lasten aus Verbindungsbauten	81
B.2.13 Lasten aus ungleichförmigen Setzungen	81
B.2.14 Katastrophenlasten	81
B.3 Teilsicherheitsbeiwerte der Einwirkungen.....	81
B.4 Kombinationen von Einwirkungen	81
Anhang C (normativ) Messung von Schüttgutkennwerten für die Ermittlung von Silolasten	82
C.1 Allgemeines	82
C.2 Anwendung	82
C.3 Symbole.....	82
C.4 Begriffe	83
C.5 Probennahme und Probenvorbereitung.....	83
C.6 Bestimmung der Schüttgutwichte γ	84
C.6.1 Kurzbeschreibung	84
C.6.2 Prüfapparatur.....	84
C.6.3 Verfahren/Vorgehen	85
C.7 Wandreibung.....	85
C.7.1 Allgemeines	85
C.7.2 Wandreibungskoeffizient μ_m zur Ermittlung der Lasten	86
C.7.3 Wandreibungswinkel φ_{wh} für Untersuchungen zum Fließverhalten.....	87
C.8 Horizontallastverhältnis K	88
C.8.1 Direkte Messung	88
C.8.2 Indirekte Messung	89
C.9 Festigkeitsparameter: Kohäsion c und Winkel der inneren Reibung φ_i	89
C.9.1 Direkte Messung	89
C.9.2 Indirekte Messung	91
C.10 Effektiver Elastizitätsmodul E_s	93
C.10.1 Direkte Messung	93
C.10.2 Indirekte Abschätzung	95
C.11 Bestimmung der oberen und unteren charakteristischen Werte von Schüttgutparametern und Ermittlung des Umrechnungsfaktors a	96
C.11.1 Versuchsprinzip.....	96
C.11.2 Methoden zur Abschätzung.....	97
Anhang D (normativ) Abschätzung der Schüttgutkennwerte für die Ermittlung der Silolasten	99
D.1 Ziel	99
D.2 Abschätzung des Wandreibungskoeffizienten für eine gewellte Wand.....	99
D.3 Innere Reibung und Wandreibung eines grobkörnigen Schüttgutes ohne Feinanteile	100
Anhang E (normativ) Angabe von Schüttgutkennwerten	101
Anhang F (normativ) Bestimmung der Fließprofile, Massen- und Kernfluss	102
Anhang G (normativ) Seismische Einwirkungen	103
G.1 Allgemeines	103
G.2 Symbole.....	103
G.3 Bemessungssituation	103
G.4 Seismische Einwirkungen	104
G.4.1 Silounterbau und Gründungen	104

G.4.2 Silowände	104
Anhang H (normativ) Alternative Regeln zur Ermittlung von Trichterlasten	106
H.1 Allgemeines	106
H.2 Begriffe	106
H.3 Symbole	106
H.4 Bemessungssituation	106
H.5 Lasten auf die Trichterwände	107
H.6 Bestimmung der Anschlusskräfte am Trichterübergang	108
H.7 Alternative Gleichungen für den Trichterlastbeiwert F_e für den Lastfall Entleeren	108
Anhang I (normativ) Einwirkungen infolge von Staubexplosionen	109
I.1 Allgemeines	109
I.2 Anwendung	109
I.3 Zusätzliche Normen, Richtlinien und Bestimmungen	109
I.4 Explosionsfähige Stäube und ihre Kennwerte	109
I.5 Zündquellen	110
I.6 Schutzmaßnahmen	110
I.7 Bemessung der Bauteile	111
I.8 Bemessung für Explosionsüberdruck	111
I.9 Bemessung für Unterdruck	111
I.10 Sicherung der Abschlüsselemente der Entlastungsöffnungen	111
I.11 Rückstoßkräfte durch Druckentlastung	111

Bilder

Bild 1 — Darstellung von Silozellen mit Benennung der geometrischen Kenngrößen und Lasten	9
Bild 2 — Grundlegende Fließprofile	26
Bild 3 — Fließprofile mit Schlotfluss	27
Bild 4 — Fließprofile mit gemischtem Schüttgutfließen	28
Bild 5 — Auswirkung der Schlankheit (Verhältnis Höhe zu Durchmesser) auf das gemischte Schüttgutfließen und den Schlotfluss	28
Bild 6 — Spezielle Füll- und Entleerungsanordnungen	29
Bild 7 — Bedingungen, unter denen Drücke infolge Massenfluss auftreten	32
Bild 8 — Symmetrische Fülllasten im Bereich der vertikalen Silowände	40
Bild 9 — Längs- und Querschnitt mit Darstellung der Lastbilder der Teilflächenlasten	42
Bild 11 — Längs- und Querschnitt mit Darstellung der Lastbilder der Teilflächenlasten bei Entleerung	47
Bild 12 — Fließkanal und Druckverteilung bei der Entleerung mit großen Exzentrizitäten	52
Bild 13 — Lasten in einem niedrigen Silo oder Silo mit mittlerer Schlankheit nach dem Füllen (Fülllasten)	56
Bild 14 — Fülldrücke bei exzentrisch gefüllten niedrigen Silos oder Silos mit mittlerer Schlankheit	59
Bild 15 — Fülldrücke in einem Stützwandsilo	62
Bild 16 — Grenze zwischen steilem und flachem Trichter	66

Bild 17 — Verteilung der Fülldrücke in einem steilen und flachen Trichter	67
Bild 18 — Bodenlasten in niedrigen Silos und in Silos mit mittlerer Schlankheit.....	70
Bild 19 — Entleerungsdrücke in einem steilen und einem flach geneigten Trichter.....	72
Bild B.1 — Druckkoeffizienten für Windlasten bei kreisförmigen zylindrischen Flüssigkeitsbehältern	80
Bild C.1 — Vorrichtung zur Bestimmung von γ	85
Bild C.2 — Prüfverfahren zur Bestimmung des Wandreibungskoeffizienten	87
Bild C.3 — Prüfverfahren zur Bestimmung von K_o	88
Bild C.4 — Prüfverfahren zur Bestimmung der Winkel der inneren Reibung φ_i und φ_c und der Kohäsion c basierend auf der beim Vorverdichten aufgetragenen Spannung σ_r	90
Bild C.5 — Prüfverfahren zur Bestimmung der Elastizitätsmoduli bei Be- und Entlastung	94
Bild D.1 — Abmessungen der Profilierung der Wandoberfläche.....	100
Bild F.1 — Abgrenzung von Massen- und Kernflussbedingungen bei konischen und keilförmigen Trichtern.....	102
Bild G.1 — Mögliche Umlagerungen an der Schüttgutoberfläche infolge seismischer Einwirkungen.....	103
Bild G.2 — Seismische Einwirkungen für den Unterbau (z. B. Stützen)	104
Bild G.3 — Querschnitt durch den vertikalen Siloschaft mit Angaben zu den zusätzlichen Horizontallasten infolge seismischer Einwirkungen	105
Bild H.1 — Alternative Regeln für die Trichterlasten	108
Tabellen	
Tabelle 1 — Klassifikation von Bemessungssituationen	23
Tabelle 2 — Maßgebliche Kennwerte für die unterschiedlichen Lastansätze	25
Tabelle 3 — Kategorien der Wandoberflächen	34
Tabelle A.1 — Kombinationsbeiwerte ψ.....	77
Tabelle C.1 — Versuchsparameter	91
Tabelle C.2 — Typische Werte der Variationskoeffizienten für die Schüttgutkennwerte.....	98
Tabelle E.1 — Schüttgutkennwerte.....	101

Vorwort

Die vorliegende Norm wurde im NABau-AA 00.02.00 „Einwirkungen auf Bauten“ (Spiegelausschuss zu CEN/TC 250/SC 1) ausgearbeitet.

Die Norm ist Teil einer neuen Reihe DIN 1055 *Einwirkungen auf Tragwerke*, die aus folgenden Teilen bestehen wird:

- Teil 1: *Wichten und Flächenlasten von Baustoffen, Bauteilen und Lagerstoffen*
- Teil 2: *Bodenkenngößen (zz. Entwurf)*
- Teil 3: *Eigen- und Nutzlasten für Hochbauten*
- Teil 4: *Windlasten*
- Teil 5: *Schnee- und Eislasten (zz. Entwurf)*
- Teil 6: *Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter*
- Teil 7: *Temperatureinwirkungen*
- Teil 8: *Einwirkungen während der Bauausführung*
- Teil 9: *Außergewöhnliche Einwirkungen*
- Teil 10: *Einwirkungen infolge Krane und Maschinen*
- Teil 100: *Grundlagen der Tragwerksplanung, Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln*

Verweise auf Normen der Reihe DIN 1055 in dieser Norm beziehen sich ausschließlich auf die o. g. neue Reihe DIN 1055.

Die vorliegende Norm wurde unter Verantwortung des Arbeitsausschusses NABau 00.02.00 auf der Grundlage von DIN V ENV 1991-4 erarbeitet und stimmt weitgehend mit dem für die Formelle Umfrage vorbereiteten Entwurfsmanuskript prEN 1991-4 überein.

Abweichungen der vorliegenden Norm vom o. g. Entwurfsmanuskript prEN 1991-4 entsprechen im Wesentlichen den in diesem Papier vorgesehenen Möglichkeiten zur Festlegung des nationalen Sicherheitsniveaus, so dass bei einer späteren Übernahme von EN 1991-4 diese in einen nationalen Anhang überführt werden können.

Änderungen

Gegenüber DIN 1055-6:1987-05 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) strukturelle Anpassung an die zu erwartende EN 1991-4;
- b) begriffliche Anpassung an die zu erwartende EN 1991-4;
- c) Anpassung des Bemessungs- und Sicherheitskonzeptes an die zu erwartende EN 1991-4;
- d) Aufnahme von Regelungen für Einwirkungen aus Staubexplosionen;
- e) Aufnahme von Regelungen für Einwirkungen infolge Erdbeben;
- f) Aufnahme von Regelungen für Einwirkungen von Schüttguteigenschaften.

Frühere Ausgaben

DIN 1055-6: 1964-11, 1987-05

1 Anwendungsbereich

(1) Diese Norm enthält allgemeine Prinzipien und Vorgaben zu den Einwirkungen für den Entwurf und die Bemessung von Silos für die Lagerung von Schüttgütern und von Flüssigkeitsbehältern. Sie ist in Verbindung mit den anderen Teilen der Reihe DIN 1055 anzuwenden.

(2) Diese Norm enthält auch einige Bestimmungen für Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter, die über die unmittelbaren Einwirkungen infolge von den gelagerten Schüttgütern oder Flüssigkeiten hinausgehen (z. B. Auswirkungen von Temperaturunterschieden).

(3) Für die Anwendung der Bemessungsregeln für Silozellen und Silobauwerke gelten folgende geometrische Begrenzungen:

— Die Querschnittsformen von Silozellen sind auf die in Bild 1d dargestellten Fälle begrenzt. Kleinere Abweichungen sind unter der Voraussetzung erlaubt, dass die möglichen Auswirkungen auf die Silostruktur infolge von aus diesen Abweichungen resultierenden Druckänderungen beachtet werden.

— Für die geometrischen Abmessungen gelten folgende Begrenzungen:

$$h_b/d_c < 10$$

$$h_b < 100 \text{ m}$$

$$d_c < 60 \text{ m}$$

— Der Übergang vom vertikalen Siloschaft in den Trichter erfolgt in einer einfachen horizontalen Ebene (auch in mehreren Stufen möglich) (siehe Bild 1a).

— Einflüsse auf die Silodrücker infolge von Einbauten oder spezielle Querschnittseinengungen bzw. Einbauten wie Entlastungskegel, Entlastungsbalken, Konsolen und Nasen usw. werden nicht erfasst (außer Entleerungstrichter).

(4) Für die Anwendung der Bemessungsregeln für Silozellen und Silobauwerke gelten hinsichtlich des gelagerten Schüttgutes folgende Anwendungsgrenzen:

— Jeder Silo ist für einen definierten Bereich von Schüttguteigenschaften zu bemessen.

— Das Schüttgut ist frei fließend oder es kann sichergestellt werden, dass es sich im speziellen Fall wie ein frei fließendes Schüttgut verhält (siehe 3.1.12 und Anhang C).

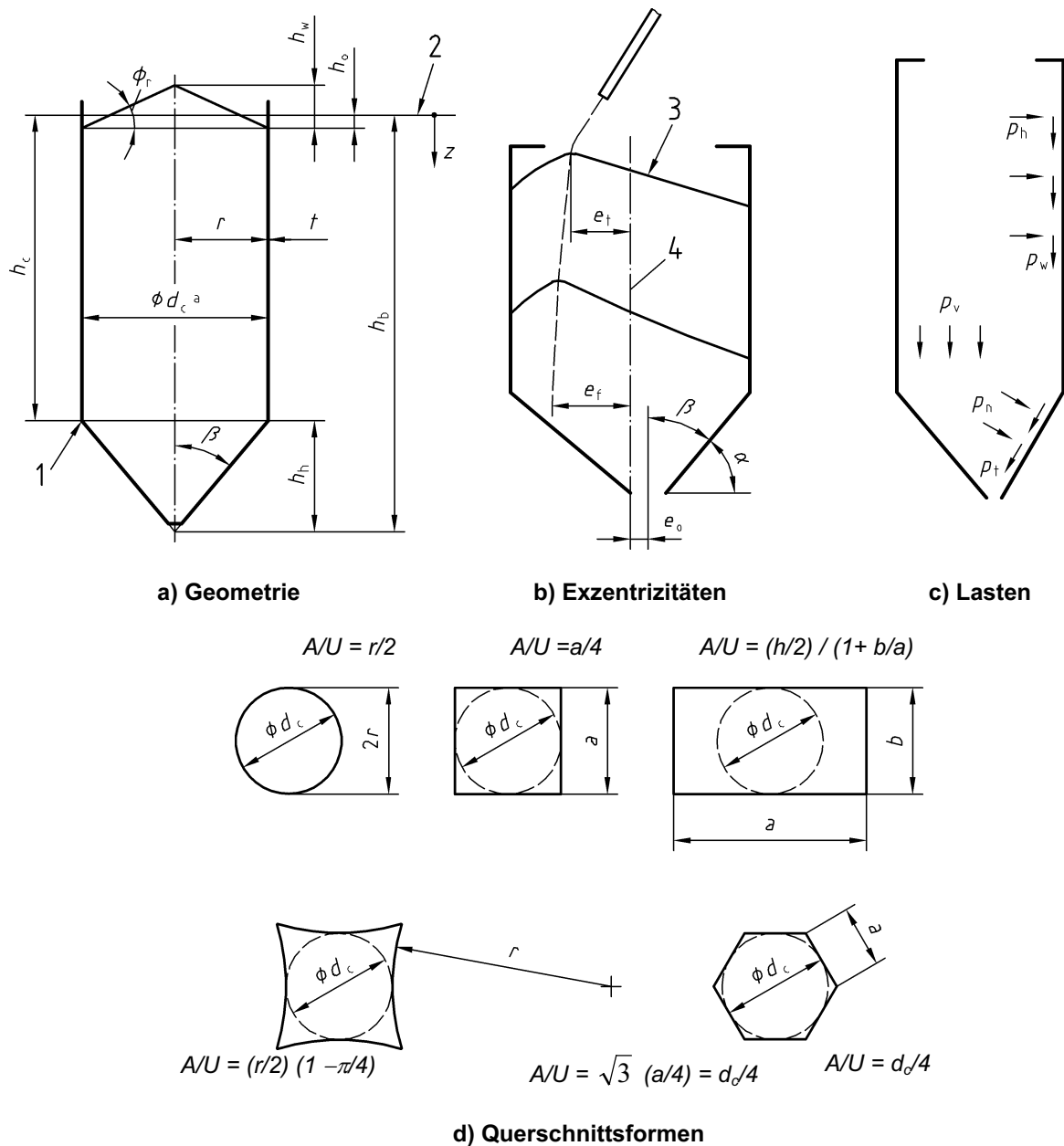
— Die maximale Korngröße des Schüttgutes ist nicht größer als $0,03 d_c$ (siehe Bild 1d).

ANMERKUNG Wenn die Schüttgutpartikel im Vergleich zur Dicke der Silowand groß sind, sind die Auswirkungen des Kontaktes einzelner großer Schüttgutpartikel mit der Wand in Form eines Ansatzes von Einzellasten zu berücksichtigen.

(5) Für die Anwendung der Bemessungsregeln für Silozellen und Silobauwerke gelten hinsichtlich der Betriebsbedingungen beim Füllen und Entleeren folgende Anwendungsgrenzen:

— Beim Befüllen entstehen nur geringfügige, vernachlässigbare Einwirkungen infolge von Trägheits- und Stoßkräften.

— Bei Anwendung von Austrags- bzw. Entleerungshilfen (zum Beispiel Förderanlagen (feeders) oder Zentralrohre mit Schlucköffnungen) ist der Schüttgutfluss gleichmäßig ungestört und zentral.



Legende

- 1 Übergang
- 2 äquivalente Schüttgutoberfläche
- 3 Oberflächenprofil bei vollem Silo
- 4 Silomittelachse

Bild 1 — Darstellung von Silozellen mit Benennung der geometrischen Kenngrößen und Lasten

Hinweis für die Überarbeitung von Bild 1: In Bild 1 wird ein weiterer Silotyp mit aufgenommen.

(6) Die angegebenen Lastansätze auf Silotrichter gelten nur für konische (i. Allg. axialsymmetrisch geformte, oder pyramidenförmig mit quadratischen bzw. rechteckigen Querschnitten ausgebildete) und keilförmig (i. Allg. mit vertikalen Wänden an der Stirn- und Rückseite) ausgebildete Trichter. Davon abweichende Trichterformen oder Trichter mit Einbauten erfordern spezielle, weitergehende Überlegungen.

(7) Silos mit entlang der vertikalen Achse sich ändernden Symmetrieachsen der geometrischen Grundrissform sind nicht Gegenstand dieser Norm. Darunter fallen z. B. Silos mit einem von einer Zylinderform in eine Keilform übergehenden Trichter.

(8) Die Bemessungsregeln für Flüssigkeitsbehälter gelten nur für Flüssigkeiten unter üblichem atmosphärischen Druck.

(9) Lasten auf die Dächer von Silos und Flüssigkeitsbehältern sind den entsprechenden Normen DIN 1055-3, DIN 1055-4, E DIN 1055-5, DIN 1055-9 und DIN 1055-10 zu entnehmen.

(10) Die Bemessung von Silos mit Umlaufbetrieb ist außerhalb des Anwendungsbereiches dieser Norm.

(11) Die Bemessung von Silos gegen dynamische Beanspruchungen, die beim Entleeren auftreten können, wie z. B. Silobeben, Stöße, Hupen oder Siloschlagen, ist außerhalb des Anwendungsbereichs dieser Norm.

ANMERKUNG Diese Phänomene sind bis heute noch nicht ganz geklärt, so dass bei Anwendung dieser Norm weder sichergestellt werden kann, dass diese nicht auftreten werden, noch dass die Silostruktur für die daraus resultierende Beanspruchung ausreichend dimensioniert ist.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

DIN 1045-1, *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton — Teil 1: Bemessung und Konstruktion*

DIN 1055-1, *Einwirkungen auf Tragwerke — Teil 1: Wichten und Flächenlasten von Baustoffen, Bauteilen und Lagerstoffen*

DIN 1055-3, *Einwirkungen auf Tragwerke — Teil 3: Eigen- und Nutzlasten für Hochbauten*

DIN 1055-4, *Einwirkungen auf Tragwerke — Teil 4: Windlasten*

E DIN 1055-5, *Einwirkungen auf Tragwerke — Teil 5: Schnee- und Eislasten*

DIN 1055-7, *Einwirkungen auf Tragwerke — Teil 7: Temperatureinwirkungen*

DIN 1055-9, *Einwirkungen auf Tragwerke — Teil 9: Außergewöhnliche Einwirkungen*

DIN 1055-10, *Einwirkungen auf Tragwerke — Teil 10: Einwirkungen infolge Krane und Maschinen*

DIN 1055-100, *Einwirkungen auf Tragwerke — Teil 100: Grundlagen der Tragwerksplanung; Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln*

DIN EN 26184-1, *Explosionsschutzsysteme — Teil 1: Bestimmung der Explosionskenngrößen von brennbaren Stäuben in Luft*

DIN EN 1127-1, *Explosionsfähige Atmosphären — Explosionsschutz — Teil 1: Grundlagen und Methodik*

DIN EN 50014, *Elektrische Betriebsmittel für explosionsgefährdete Bereiche — Allgemeine Bestimmungen*

ISO 3898:1997, *Grundlagen für die Bemessung von Bauwerken — Bezeichnungen, Allgemeine Formelzeichen*

VDI 2263, *Staubbrände und Staubexplosionen; Gefahren, Beurteilung, Schutzmaßnahmen*

VDI 3673 Blatt 1, *Druckentlastung von Staubexplosionen*

3 Begriffe und Formelzeichen

3.1 Begriffe

Für die Anwendung dieser Norm gelten die in DIN 1055-100 angegebenen sowie die folgenden Begriffe.

3.1.1

belüfteter Siloboden

Siloboden, in welchem Schlitze (Belüftungsrinnen) angeordnet sind, durch die Luft in das Schüttgut injiziert wird, um Schüttgutfließen im Bereich oberhalb des Silobodens zu aktivieren (siehe Bild 6b)

3.1.2

innerer Durchmesser eines Siloquerschnittes d_c

der Durchmesser des größten eingeschriebenen Kreises des inneren Querschnittes einer Silozelle (siehe Bild 1d)

3.1.3

kreisförmiger Silo

Silo, dessen Grundriss bzw. Schaftquerschnitt eine Kreisform aufweist (siehe Bild 1d)

3.1.4

Kohäsion

Scherfestigkeit des Schüttgutes in dem Fall, dass in der Bruchebene keine Normalspannungen wirken

3.1.5

konischer Trichter

Trichter, bei dem die geneigten Seitenflächen in einem Punkt zusammenlaufen, womit in der Regel ein axialsymmetrisches Schüttgutfließen sichergestellt werden kann

3.1.6

exzentrisches Entleeren

Fließprofil im Schüttgut mit einer in Bezug auf die vertikale Mittelachse unsymmetrischen Verteilung des sich bewegenden Schüttgutes. Dies ist üblicherweise die Folge einer exzentrisch angeordneten Auslauföffnung (siehe Bilder 3c und 3d, 4b und 4c). Es kann aber auch durch andere zur Unsymmetrie führende Phänomene hervorgerufen sein (siehe Bild 5d)

3.1.7

exzentrisches Füllen

Zustand während bzw. nach dem Befüllen des Silos, bei dem die Spitze der angeschütteten Schüttgutoberfläche (Spitze des Anschüttkegels) nicht mehr in der vertikalen Mittelachse des Silos zentriert ist (siehe Bild 1b)

3.1.8

äquivalente Schüttgutoberfläche

Höhe der gedachten eingeebneten (horizontalen) Schüttgutoberfläche, die sich aus der Volumenbilanz zwischen diesem gedachten und dem tatsächlichen Verlauf der Oberflächenform ergibt (siehe Bild 1a)

3.1.9

Trichter für „erweitertes Fließen“ (en: „expanded flow“)

Trichter, bei dem die Trichterseitenflächen im unteren Bereich des Trichters ausreichend steil ausgebildet sind, um einen Massenfluss zu erzeugen, während der Trichter im oberen Bereich flacher geneigte Seitenflächen aufweist, wodurch dort Kernfluss zu erwarten ist (siehe Bild 6d). Diese Anordnung reduziert die Trichterhöhe bei gleichzeitiger Sicherstellung einer zuverlässigen Entleerung

3.1.10

waagerechter (Silo)boden

innere Grundfläche eines Silos mit einer Neigung von weniger als 5°

3.1.11

Fließprofil

geometrische Form des ausfließenden Schüttgutes, wenn sich diese bereits voll ausgebildet hat (siehe Bilder 2 bis 5). Der Silo ist dabei fast vollständig gefüllt (maximaler Füllzustand)

3.1.12

fluidisiertes Schüttgut

Zustand eines gespeicherten staubförmigen Schüttgutes, in dem dieses einen großen Anteil von Luftporen enthält, mit einem Druckgradienten der dem Gewicht der Partikel entgegenwirkt und dieses kompensiert. Die Luft kann entweder durch eine spezielle Belüftung oder durch den Füllprozess eingetragen sein. Ein Schüttgut wird als teilweise fluidisiert bezeichnet, wenn nur ein Teil des Gewichtes der Schüttgutpartikel durch den Porendruckgradienten kompensiert wird

3.1.13

frei fließendes granulares Material

granulares Schüttgut, dessen Fließverhalten nicht merklich von Kohäsion beeinflusst ist

3.1.14

vollständig gefüllter Zustand

ein Silo ist im vollständig gefüllten Zustand, wenn sich die Oberfläche des Schüttgutes an ihrer höchstmöglichen Position befindet, die sie innerhalb der Nutzungsdauer der Konstruktion während des Silobetriebs einnehmen kann

ANMERKUNG Dies wird für den Silo als die maßgebliche Bemessungsbedingung angenommen.

3.1.15

Kernfluss

Fließprofil, bei dem sich im Schüttgut ein Fließkanal über der Auslauföffnung entwickelt, während das Schüttgut im Bereich zwischen diesem Fließkanal und der Silowand in Ruhe verbleibt (siehe Bild 2)

ANMERKUNG Der Fließkanal kann hierbei in Kontakt mit der vertikalen Silowand kommen – man spricht dann von „gemischtem Fließen“ – oder er kann sich ohne jegliche Kontaktbereiche mit der Wand bis zur Oberfläche hin erstrecken. Dieser Fall wird mit „Schlotfluss“ oder „Schachtfließen“ bezeichnet.

3.1.16

granulares Material

Material, das sich aus einzelnen voneinander getrennten Körnern aus festen Partikeln zusammensetzt, mit Partikeln in etwa gleicher Größenordnung, bei dem bei der Ermittlung der Lasten die zwischen den Einzelkörnern befindliche Luft nur eine geringe Rolle spielt und auf das Schüttgutfließen nur geringen Einfluss hat

3.1.17

hohe Füllgeschwindigkeiten

Bedingung in einem Silo, bei der die Geschwindigkeit des Einfüllens zu einem Lufteintrag in einer Größenordnung führt, sodass dadurch die Druckverhältnisse an der Wand beeinflusst werden

3.1.18

Homogenisierungssilo

Silo, in dem das Schüttgut unter Zuhilfenahme von Fluidisierung homogenisiert, d. h. durch Mischung vergleichmäßigt wird

3.1.19

Trichter

Siloboden mit geneigten Wänden

3.1.20**Trichterlastverhältniswert F**

Wert, der angibt, in welchem Verhältnis die Normallast p_n auf die geneigten Trichterwände und die mittlere Vertikallast p_v an dieser Stelle im Schüttgut zueinander stehen

3.1.21**Silo mit mittlerer Schlankheit**

Silo, dessen Verhältnis von Höhe zum Durchmesser zwischen $1,0 < h_c/d_c < 2,0$ liegt

ANMERKUNG Ausnahmen sind in 5.3 definiert.

3.1.22**innerer Schlotfluss**

Fließprofil mit Schlotfluss, in dem die Fließkanalgrenze sich bis zur Schüttgutoberfläche erstreckt, ohne dass es dabei zu Berührungen des Fließbereiches mit der Silowand kommt (siehe Bilder 2 und 3)

3.1.23**Horizontallastverhältnis K**

Wert, der angibt, in welchem Verhältnis die auf die vertikale Silowand wirkende mittlere Horizontallast p_h und die mittlere Vertikallast p_v an dieser Stelle im Schüttgut zueinander stehen

3.1.24**geringe Kohäsion**

eine Schüttgutprobe weist eine geringe Kohäsion auf, wenn die Kohäsion c kleiner als 4 % der Vorkonsolidierungsspannung σ_r ist

ANMERKUNG Ein Verfahren zur Bestimmung der Kohäsion ist in C.9 gegeben.

3.1.25**Massenfluss**

Fließprofil, bei dem alle im Silo befindlichen Schüttgutpartikel beim Entleeren gleichzeitig in Bewegung sind (siehe Bild 2a)

3.1.26**gemischtes Fließen**

Kernflussprofil, bei dem der Fließkanal noch unterhalb der Schüttgutoberfläche mit der vertikalen Silowand in Berührung kommt (siehe Bilder 2c und 4)

3.1.27**nicht kreisförmiger Silo**

Silo, dessen Querschnitt von der Kreisform abweicht (siehe Bild 1d)

3.1.28**Schüttgut**

Bezeichnung für ein staubförmiges bis grobkörniges granulares Material mit und ohne Kohäsion, das neben einzelnen Feststoffteilchen (Partikel) auch Hohlräume zwischen diesen enthält, die evtl. mit Luft oder Feuchtigkeit gefüllt sind

3.1.29**Teilflächenlast**

lokale Last, die in beliebiger Höhenlage auf eine bestimmte Teilfläche senkrecht zur vertikalen Silowand wirkend angesetzt wird

3.1.30**Schlotfluss**

Fließprofil, in dem das Schüttgut in einem vertikalen oder nahezu vertikalen Fließkanal oberhalb der Auslauföffnung in Bewegung ist, sich aber neben dem Fließkanal in Ruhe befindet (siehe Bilder 2 und 3)

ANMERKUNG Wenn die Auslauföffnung exzentrisch angeordnet ist (siehe Bilder 3c und d), oder wenn spezielle Faktoren dazu führen, dass der Fließkanal von der vertikalen Achse über dem Auslauf abweicht (siehe Bild 5), kann sich ein Schüttgutfließen gegen die Silowand einstellen.

3.1.31

ebenes Fließen

Fließprofil in einem Silo mit rechteckiger oder quadratischer Querschnittsfläche und einer schlitzförmigen Auslauföffnung. Der Auslaufschlitz verläuft parallel zu zwei Silowänden. Seine Länge entspricht der Länge dieser beiden Silowände

3.1.32

staubförmiges Schüttgut

ein Material, dessen mittlere Partikelgröße kleiner als 0,05 mm ist

3.1.33

Stützwandsilo

Silo mit einem waagerechten Boden und einem Verhältnis von Höhe zu Durchmesser von $h_c/d_c \leq 0,4$

3.1.34

flacher Trichter

Trichter, in dem nach dem Befüllen nicht der volle Betrag der Wandreibung mobilisiert wird

3.1.35

Silo

Behälterkonstruktion zur Speicherung von Schüttgütern

3.1.36

schlanker Silo

Silo mit einem Verhältnis von Höhe zu Durchmesser von $h_c/d_c \geq 2,0$ oder bei dem die zusätzlichen Bedingungen nach 5.3 erfüllt sind

3.1.37

Schlankheit

Verhältnis von Höhe zu Durchmesser h_c/d_c des vertikalen Teils eines Silos

3.1.38

niedriger Silo

Silo mit einem Verhältnis von Höhe zu Durchmesser von $0,4 < h_c/d_c \leq 1,0$ oder bei dem die zusätzlichen Bedingungen nach 5.3 erfüllt sind

ANMERKUNG Bei einem Verhältnis von Höhe zu Durchmesser von $h_c/d_c \leq 0,4$ und wenn der Silo einen Trichter besitzt, fällt der Silo auch unter die Kategorie eines niedrigen Silos. Ansonsten – bei einem ebenen Siloboden – fällt er unter die Kategorie Stützwandsilo.

3.1.39

steiler Trichter

Trichter, in dem nach dem Befüllen die volle Wandreibung mobilisiert wird

3.1.40

Spannung im Schüttgut

Kraft durch Flächeneinheit innerhalb des gespeicherten Schüttgutes

3.1.41

Flüssigkeitsbehälter

Behälterkonstruktion zur Lagerung von Flüssigkeiten

3.1.42**dickwandiger Silo**

Silo mit einem Verhältnis von Durchmesser zur Wanddicke von kleiner als $d_o/t = 200$

3.1.43**dünnwandiger kreisförmiger Silo**

kreisförmiger Silo mit einem Verhältnis von Durchmesser zur Wanddicke von größer als $d_o/t = 200$

3.1.44**Wandreibungslast**

Kraft durch Flächeneinheit entlang der Silowand (vertikal oder geneigt) aufgrund der Reibung zwischen Schüttgut und Silowand

3.1.45**Trichterübergang**

Schnittfläche zwischen Trichter und vertikalem Siloschaft, d. h. Übergang vom vertikalen Teil des Silos in den Trichter

3.1.46**vertikaler Siloschaft**

der Teil eines Silos mit vertikalen Wänden

3.1.47**keilförmiger Trichter**

Trichter, bei dem die geneigten Flächen zu einem Schlitz mit dem Ziel eines ebenen Schüttgutflusses konvergieren. Die jeweils anderen beiden Trichterwände verlaufen in der Regel vertikal.

3.2 Formelzeichen**3.2.1 Allgemeines**

Eine Liste von grundlegenden Symbolen (Kurzzeichen) ist in DIN 1055-100 enthalten. Im Folgenden werden zusätzliche Kurzzeichen (Symbole) für diesen Teil der Norm angegeben. Die verwendeten Kurzzeichen basieren auf den Konventionen von ISO 3898:1997.

3.2.2 Große lateinische Buchstaben

- A Querschnittsfläche des vertikalen Schaftes
- A_c Querschnittsfläche des Fließkanals beim exzentrischen Entleeren (große Exzentrizitäten)
- B Tiefenparameter bei exzentrisch befüllten niedrigen Silos
- C Lastvergrößerungsfaktor
- C_o Entleerungsfaktor (Lastvergrößerungsfaktor beim Entleeren) für das Schüttgut
- C_{op} Schüttgutkennwert der Teilflächenlast (Lastvergrößerungsfaktor)
- C_b Vergrößerungsfaktor für die Bodenlasten
- C_h Lastvergrößerungsfaktor der horizontalen Entleerungslasten
- C_{pe} Lastvergrößerungsfaktor der Teilflächenlast beim Entleeren
- C_{pf} Lastvergrößerungsfaktor der Teilflächenlast beim Lastfall Füllen

C_S	Schlankheitsbeiwert bei einem Silo mit mittlerer Schlankheit
C_T	Lastvergrößerungsfaktor bei der Berücksichtigung von Temperaturunterschieden bzw. -änderungen
C_w	Entleerungsbeiwert für die Wandreibungslasten (Lastvergrößerungsfaktor)
E	Verhältnis von Exzentrizität beim Füllen und Entleeren zum Siloradius
E_s	effektiver Elastizitätsmodul des gespeicherten Schüttgutes beim betreffenden Spannungsniveau
E_w	Elastizitätsmodul der Silowand
F	Verhältnis zwischen den Lasten senkrecht auf die Trichterwand und mittlerer Vertikallast im Schüttgut an dieser Stelle
F_e	Lastverhältnis im Trichter während der Entleerung (Verhältnis zwischen Lasten senkrecht auf die Trichterwand und mittleren Vertikallasten im Schüttgut)
F_f	Lastverhältnis im Trichter nach dem Füllen (Verhältnis zwischen Lasten senkrecht auf die Trichterwand und mittleren Vertikallasten im Schüttgut)
F_{pe}	Integral der horizontalen Teilflächenlast bei dünnwandigen kreisförmigen Silos beim Lastfall Entleeren
F_{pf}	Integral der horizontalen Teilflächenlast bei dünnwandigen kreisförmigen Silos beim Lastfall Füllen
G	Verhältnis zwischen dem Radius des Fließkanals und dem Radius des inneren Querschnittes eines kreisförmigen Silos
K	charakteristischer Wert des Horizontallastverhältnisses
K_m	Mittelwert des Horizontallastverhältnisses
K_o	Wert von K bei Ausschluss von horizontalen Dehnungen sowie horizontal und vertikal gerichteten bzw. verlaufenden Hauptspannungen
P_{we}	charakteristischer Wert der aufsummierten Wandreibungslasten je laufendem Meter in Umfangsrichtung der vertikalen Silowand im Lastfall Entleeren
P_{wf}	charakteristischer Wert der aufsummierten Wandreibungslasten je laufendem Meter in Umfangsrichtung der vertikalen Silowand im Lastfall Füllen
P_{zSk}	charakteristischer Wert der Wandlasten je laufendem Meter in Umfangsrichtung der vertikalen Silowand bei niedrigen Silos und großen Füllexzentrizitäten
S	Geometriefaktor für die Trichterlasten (= 2 bei konisch geformten Trichtern, = 1 bei keilförmigen Trichtern)
U	innerer Umfang des Querschnittes des vertikalen Siloschaftes
U_{sc}	(innere) Umfangslänge des Fließkanals im Kontaktbereich zum nichtfließenden Bereich des Schüttgutes bei der Entleerung mit großen Exzentrizitäten
U_{wc}	(innere) Umfangslänge des Fließkanals im Kontaktbereich mit der Silowand bei der Entleerung mit großen Exzentrizitäten

- Y Tiefenvariationsfunktion: Funktion zur Beschreibung der Lastzunahme mit zunehmender Tiefe im Silo
- Y_J Tiefenvariationsfunktion der Theorie nach Janssen
- Y_R Tiefenvariationsfunktion bei niedrigen Silos

3.2.3 Kleine lateinische Buchstaben

- a Seitenlänge eines Silos mit rechteckigem oder hexagonalem Querschnitt (siehe Bild 1d)
- a_x Streukoeffizient (-faktor) bzw. Umrechnungsfaktor zur Berechnung der oberen und unteren charakteristischen Schüttgutkennwerte aus den Mittelwerten
- a_K Streukoeffizient bzw. Umrechnungsfaktor für das Horizontallastverhältnis
- a_γ Streukoeffizient bzw. Umrechnungsfaktor für die Schüttgutwichte
- a_φ Streukoeffizient bzw. Umrechnungsfaktor für den Winkel der inneren Reibung
- a_μ Streukoeffizient (-faktor) bzw. Umrechnungsfaktor für den Wandreibungskoeffizienten
- b Breite eines rechteckigen Silos (siehe Bild 1d)
- b empirischer Koeffizient für die Trichterlasten
- c Kohäsion des Schüttgutes
- d_c charakteristische Abmessung für den inneren Siloquerschnitt (siehe Bild 1d)
- e der größere Wert der Exzentrizitäten e_f und e_o
- e_c Exzentrizität der Mittelachse des Fließkanals beim Entleeren mit großen Exzentrizitäten (siehe Bild 11)
- e_f größte Exzentrizität des Schüttkegels an der Schüttgutoberfläche beim Füllen (siehe Bild 1b)
- $e_{f,cr}$ größte Füllexzentrizität, für die die vereinfachten Regeln zur Berücksichtigung geringer Exzentrizitäten verwendet werden können ($e_{f,cr} = 0,25d_c$)
- e_o Exzentrizität des Mittelpunktes der Auslauföffnung (siehe Bild 1b)
- $e_{o,cr}$ größte Exzentrizität der Auslauföffnung, für die die vereinfachten Regeln zur Berücksichtigung der Exzentrizitäten verwendet werden können ($e_{o,cr} = 0,25d_c$)
- e_t Exzentrizität der Spitze des Aufschüttkegels an der Schüttgutoberfläche beim gefüllten Silo (siehe Bild 1b)
- $e_{t,cr}$ größte Exzentrizität des Aufschüttkegels, für die die vereinfachten Regeln zur Berücksichtigung von Exzentrizitäten verwendet werden können ($e_{t,cr} = 0,25d_c$)
- h_b Gesamthöhe eines Silos mit Trichter, gemessen von der gedachten Trichterspitze bis zur äquivalenten Schüttgutoberfläche (siehe Bild 1a)

h_c	Höhe der vertikalen Siloschaftes, gemessen vom Trichterübergang bis zur äquivalenten Schüttgutoberfläche (siehe Bild 1a)
h_h	Trichterhöhe, gemessen von der gedachten Trichterspitze bis zum Trichterübergang (siehe Bild 1a)
h_o	Abstand zwischen äquivalenter Schüttgutoberfläche und dem tiefsten Fußpunkt des Schüttkegels (am tiefsten gelegener Punkt der Silowand, der bei einem bestimmten Füllzustand nicht in Kontakt mit dem gespeicherten Schüttgut ist) (siehe Bilder 1, 13 und 17)
h_{tp}	Gesamthöhe des Anschüttkegels an der Schüttgutoberfläche (vertikaler Abstand vom tiefsten Punkt der Silowand, der bei einem bestimmten Füllzustand nicht in Kontakt mit dem gespeicherten Schüttgut ist, bis zur Spitze des Aufschüttkegels) (siehe Bilder 1a und 17)
n	Parameter in den Bestimmungsgleichungen der Trichterlasten
p	Last in der Einheit Kraft pro Fläche
p_h	Horizontallast aus dem gespeicherten Schüttgut (siehe Bild 1c)
p_{hae}	Horizontallast im sich in Ruhe befindlichen Bereich des Schüttgutes neben dem Fließkanal bei einer Entleerung mit großen Exzentrizitäten
p_{hce}	Horizontallast im Fließkanal bei einer Entleerung mit großen Exzentrizitäten
p_{hco}	asymptotische Horizontallast in großer Tiefe im Fließkanal bei einer Entleerung mit großen Exzentrizitäten
p_{he}	Horizontallasten beim Entleeren
$p_{he,u}$	Horizontallasten beim Entleeren und Verwendung der vereinfachten Rechenverfahren
p_{hf}	Horizontallasten nach dem Füllen
p_{hfb}	Horizontallasten nach dem Füllen am unteren Ende des vertikalen Siloschaftes
$p_{hf,u}$	Horizontallasten nach dem Füllen bei Anwendung der vereinfachten Rechenverfahren
p_{ho}	asymptotische Horizontallasten in großer Tiefe aus gespeichertem Schüttgut
p_{hse}	Horizontallasten im sich in Ruhe befindlichen Schüttgut in größerem Abstand zum Fließkanal während einer Entleerung mit großen Exzentrizitäten
p_{hT}	Zunahme der Horizontallasten infolge Temperaturunterschieden bzw. -änderungen
p_n	Lasten senkrecht auf die Trichterwände aus dem gelagerten Schüttgut (siehe Bild 1c)
p_{ne}	Lasten senkrecht auf die Trichterwände während der Entleerung
p_{nf}	Lasten senkrecht auf die Trichterwände nach dem Füllen
p_p	Teilflächenlast
p_{pe}	Grundwert der Teilflächenlast während des Entleerens

p_{pei}	komplementäre Teilflächenlast beim Entleeren
$p_{pe,nc}$	streifenförmige Teilflächenlast bei Silos mit nicht kreisförmigen Querschnitten beim Entleeren
p_{pf}	Grundwert der Teilflächenlast nach dem Füllen
p_{pfi}	komplementäre Teilflächenlast nach dem Füllen
$p_{pe,nc}$	streifenförmige Teilflächenlast bei Silos mit nicht kreisförmigen Querschnitten nach dem Füllen
p_{pes}	Teilflächenlast an der Zylinderkoordinate θ bei dünnwandigen kreisförmigen Silos während der Entleerung
p_{pfs}	Teilflächenlast an der Zylinderkoordinate θ bei dünnwandigen kreisförmigen Silos nach dem Füllen
p_t	Reibungslasten im Trichter (siehe Bild 1c)
p_{te}	Reibungslasten im Trichter beim Entleeren
p_{tf}	Reibungslasten im Trichter nach dem Füllen
p_v	Vertikallasten im Schüttgut (siehe Bild 1c)
p_{vb}	Vertikallasten am Boden niedriger Silos
p_{vf}	Vertikallasten im Schüttgut nach dem Füllen
p_{vft}	Vertikallasten nach dem Füllen am Trichterübergang (Fußpunkt des vertikalen Siloschaftes)
p_{vho}	am Fußpunkt des Anschüttkegels an der Schüttgutoberfläche nach Gleichung (86) und mit der Schüttguttiefe $z = h_o$ berechnete Vertikallast
p_{vsq}	Vertikallasten auf dem waagerechten Boden eines niedrigen Silos oder Silos mittlerer Schlankheit
p_{vtp}	geostatische Vertikallast am Fußpunkt des Anschüttkegels an der Schüttgutoberfläche
p_w	Wandreibungslasten entlang der vertikalen Wand (Scherkraft infolge Reibung je Flächeneinheit) (siehe Bild 1c)
p_{wae}	Wandreibungslasten im sich in Ruhe befindlichen Schüttgut unmittelbar neben dem Fließkanal während der Entleerung mit großen Exzentrizitäten (am Übergang vom ruhenden zum fließenden Schüttgut)
p_{wce}	Wandreibungslasten im Fließkanal während der Entleerung mit großen Exzentrizitäten
p_{we}	Wandreibungslasten während der Entleerung
$p_{we,u}$	Wandreibungslasten während der Entleerung unter Verwendung des vereinfachten Berechnungsverfahrens
p_{wf}	Wandreibungslasten nach dem Füllen
$p_{wf,u}$	Wandreibungslasten nach dem Füllen unter Verwendung des vereinfachten Berechnungsverfahrens

p_{wse}	Wandreibungslasten im sich in Ruhe befindlichen Schüttgut in größerem Abstand zum Fließkanal während der Entleerung mit großen Exzentrizitäten
r	äquivalenter Siloradius ($r = 0,5d_c$)
r_c	Radius des exzentrischen Fließkanals bei der Entleerung mit großen Exzentrizitäten
s	Abmessung der mit der Teilflächenlast belasteten Fläche ($s = \pi d_c / 16 \simeq 0,2d_c$)
t	Dicke der Silowand
x	vertikale Koordinate im Trichter mit dem Ursprung in der Trichterspitze (siehe Bild 16)
z	Tiefe unterhalb der äquivalenten Schüttgutoberfläche im gefüllten Zustand (siehe Bild 1a)
z_0	charakteristische Tiefe nach der Theorie nach Janssen
z_{oc}	charakteristische Tiefe nach der Theorie nach Janssen für den Fließkanal bei der Entleerung mit großen Exzentrizitäten
z_p	Tiefe des Mittelpunktes der Teilflächenlast unterhalb der äquivalenten Schüttgutoberfläche in einem dünnwandigen Silo
z_s	Tiefe unterhalb der höchstliegenden Kontaktstelle zwischen Schüttgut und Silowand (siehe Bilder 13 und 14)
z_v	Maß für die Tiefe beim Ansatz der Vertikallasten in niedrigen Silos

3.2.4 Große griechische Buchstaben

Δ	Horizontalverschiebung des oberen Teils einer Scherzelle
Δ	Operator für inkrementelle Größen (siehe folgende Kurzzeichen)
ΔT	Temperaturunterschied zwischen dem gespeicherten Schüttgut und der Silowand
Δv	bei Materialuntersuchungen gemessene inkrementelle Vertikalverschiebung
$\Delta \sigma$	bei Materialuntersuchungen auf eine Probe aufgebrauchte inkrementelle Spannung

3.2.5 Kleine griechische Buchstaben

α	mittlerer Neigungswinkel der Trichterwände bezogen auf die Horizontale (siehe Bild 1b)
α_w	thermischer Ausdehnungskoeffizient der Silowand
β	Neigungswinkel der Trichterwand bezogen auf die Vertikale (siehe Bilder 1a und 1b) bzw. der Winkel der steilsten Trichterwände bei einem quadratischen oder rechteckigen Trichter
γ	charakteristischer Wert der Wichte der gespeicherten Flüssigkeit oder des gespeicherten Schüttgutes
γ_1	Wichte des Schüttgutes in fluidisiertem Zustand

γ_u	oberer charakteristischer Wert der Wichte der gespeicherten Flüssigkeit oder des gespeicherten Schüttgutes
δ	Standardabweichung eines Kennwertes
θ	Zylinderkoordinate: Winkel in Umfangsrichtung
θ_c	Umfangswinkel des Fließkanals beim Entleeren mit großen Exzentrizitäten (siehe Bild 11) bezogen auf die Mittelachse des Siloschaftes
ψ	Wandkontaktwinkel des exzentrischen Fließkanals bezogen auf die Mittelachse des Fließkanals
μ	charakteristischer Wert des Wandreibungswinkels an der vertikalen Silowand
μ_{heff}	effektiver oder mobilisierter Wandreibungskoeffizient in einem flachen Trichter
μ_h	Wandreibungskoeffizient im Trichter
μ_m	Mittelwert des Wandreibungskoeffizienten zwischen Schüttgut und Silowand
ν	Poissonzahl des Schüttgutes
φ_c	charakteristischer Wert des Winkels der inneren Reibung eines vorverdichteten Schüttgutes bei Entlastung (d. h. mit Anteil aus Kohäsion)
φ_i	charakteristischer Wert des Winkels der inneren Reibung eines Schüttgutes bei Erstbelastung (d. h. ohne Anteil aus Kohäsion)
φ_{im}	Mittelwert des Winkels der inneren Reibung
φ_r	Böschungswinkel eines Schüttgutes (konischer Schütthaufen) (siehe Bild 1a)
φ_w	Wandreibungswinkel ($\arctan \mu$) zwischen Schüttgut und Trichterwand
φ_{wh}	Wandreibungswinkel im Trichter ($\arctan \mu_h$) zwischen Schüttgut und Trichterwand
σ_r	Bezugs- bzw. Referenzspannung für die Versuche zur Bestimmung der Schüttgutkennwerte

4 Darstellung und Klassifikation der Einwirkungen

4.1 Darstellung von Einwirkungen in Silos

(1) Die Einwirkungen auf Silos sind unter Berücksichtigung der Silostruktur, der Eigenschaften der gespeicherten Schüttgüter und der sich beim Entleeren der Silos einstellenden Fließprofile zu ermitteln.

(2) Unsicherheiten bezüglich der sich einstellenden Fließprofile, des Einflusses der Füll- und Entleerungsexzentrizitäten auf die Füll- und Entleerungsvorgänge, des Einflusses der Siloform auf die Art des Fließprofiles und bezüglich der zeitabhängigen Füll- und Entleerungsdrücke sind zu berücksichtigen.

ANMERKUNG 1 Die Größenordnung und die Verteilung der Bemessungslasten hängen von der Silostruktur, von den Materialkennwerten der gelagerten Schüttgüter und von den Fließprofilen ab, die sich beim Entleeren ausbilden. Die inhärenten Unterschiede in den Eigenschaften der unterschiedlich gelagerten Schüttgüter und die Vereinfachungen in den Lastmodellen führen zu Abweichungen zwischen den tatsächlich auftretenden Silolasten und den Lastannahmen

(Bemessungslasten) nach den Abschnitten 5 und 6. So ändert sich mit der Zeit zum Beispiel auch die Verteilung der Entleerungsdrücke entlang der Silowand. Eine genaue Vorhersage des vorherrschenden mittleren Drucks, seiner Streuung und seiner zeitlichen Veränderlichkeit ist mit den heutigen Erkenntnissen nicht möglich.

(3) Lasten auf die vertikalen Wände von Silos im Füllzustand und während des Entleerens mit geringen Füll- und Entleerungsexzentrizitäten sind durch einen symmetrischen Lastanteil und eine unsymmetrische Teilflächenlast zu berücksichtigen. Bei größeren Exzentrizitäten sind die Lasten durch unsymmetrische Druckverteilungskurven zu beschreiben.

(4) Reagiert die gewählte Form der Silostruktur empfindlich gegenüber Änderungen der anzusetzenden Lastvorgaben, ist dies durch entsprechende Untersuchungen zu berücksichtigen.

(5) Die symmetrischen Lasten auf Silowände sind durch horizontale Lastanteile p_h auf die inneren Oberflächen der senkrechten Silowand, durch senkrecht auf geneigte Wände wirkende Lasten p_n , durch in tangentialer Richtung der Wand wirkende Reibungslasten p_w und p_t und durch vertikale Lastanteile im gelagerten Schüttgut p_v anzusetzen (siehe Bild 1c).

(6) Die unsymmetrischen Lasten auf die vertikalen Silowände bei geringen Füll- und Entleerungsexzentrizitäten sind durch den Ansatz einer Teilflächenlast zu berücksichtigen. Diese Teilflächenlasten bestehen aus lokal wirkenden Horizontaldrücken p_h auf die innere Oberfläche der Silowand.

(7) Die unsymmetrischen Lasten auf die vertikalen Silowände bei großen Füll- und Entleerungsexzentrizitäten sind zusätzlich durch eine unsymmetrische Verteilung der Horizontaldrücke p_h und Reibungslasten p_w zu erfassen.

(8) Unplanmäßige nicht berücksichtigte Lasteinflüsse sind durch Lastvergrößerungsfaktoren C zu erfassen.

(9) Die Lastvergrößerungsfaktoren C bei Silozellen der Anforderungsklassen 2 und 3 (siehe 4.5) erfassen ausschließlich nicht berücksichtigte zusätzliche Lasteinflüsse, die durch den Schüttgutfluss beim Entleeren des Silos auftreten.

(10) Die Lastvergrößerungsfaktoren C bei Silozellen der Anforderungsklasse 1 (siehe 4.5) erfassen sowohl zusätzliche Lasteinflüsse beim Entleeren infolge der Schüttgutbewegungen als auch Einflüsse durch die Streuung der Schüttgutparameter.

ANMERKUNG 2 Die Lastvergrößerungsfaktoren C haben die Aufgabe, die Unsicherheiten bezüglich der sich einstellenden Fließprofile, die Einflüsse von Exzentrizitäten beim Füllen und Entleeren, den Einfluss der Siloform auf die Art des Fließprofils und Näherungseinflusses infolge der Nichtberücksichtigung vorhandener zeitabhängiger Füll- und Entleerungsdrücke abzudecken. Für Silos der Anforderungsklasse 1 (siehe 4.5) berücksichtigt der Lastvergrößerungsfaktor auch die inhärente Streuung der Materialeigenschaften der Schüttgüter. Für Silos der Anforderungsklassen 2 und 3 wird die Streuung der die Lasten beeinflussenden Materialkennwerte der Schüttgüter nicht durch einen Lastvergrößerungsfaktor C , sondern durch den Ansatz von entsprechenden charakteristischen Bemessungswerten der Schüttgutparameter γ , μ , K und φ_i berücksichtigt.

(11) Für Silos der Anforderungsklasse 1 (siehe 4.5) sind die unsymmetrischen Lasten durch eine Erhöhung der symmetrischen Lasten durch Verwendung eines Vergrößerungsfaktors für die Entleerungslasten C zu berücksichtigen.

(12) Für Silos der Anforderungsklasse 2 (siehe 4.5) können die unsymmetrischen Teilflächenlasten auch alternativ durch eine ersatzweise Vergrößerung der symmetrischen Lasten berücksichtigt werden.

4.2 Darstellung der Einwirkung auf Flüssigkeitsbehälter

(1) Lasten auf Flüssigkeitsbehälter infolge ihrer Füllung sind durch hydrostatische Lastansätze zu berücksichtigen.

4.3 Einstufung der Einwirkung auf Silozellen

- (1) Lasten infolge von in Silozellen gelagerten Schüttgütern sind als veränderliche Einwirkungen nach DIN 1055-100 einzustufen.
- (2) Symmetrische Lasten auf Silos sind als veränderliche ortsfeste Einwirkungen nach DIN 1055-100 einzustufen.
- (3) Teilflächenlasten zur Berücksichtigung der Füll- und Entleerungsprozesse in Silozellen sind als veränderliche freie Einwirkungen nach DIN 1055-100 einzustufen.
- (4) Exzentrische Lasten zur Berücksichtigung exzentrischer Füll- und Entleerungsprozesse in Silozellen sind als veränderliche ortsfeste Einwirkungen einzustufen.
- (5) Lasten aus Luft- bzw. Gasdrücken in Verbindung mit pneumatischen Förderungsanlagen sind als veränderliche ortsfeste Einwirkungen anzusehen.
- (6) Lasten infolge von Staubexplosionen sind als außergewöhnliche Einwirkungen im Sinne DIN 1055-100 einzustufen.

4.4 Einstufung der Einwirkungen auf Flüssigkeitsbehälter

Lasten auf Flüssigkeitsbehälter infolge deren Befüllung sind als veränderliche ortsfeste Einwirkungen nach DIN 1055-100 einzustufen.

4.5 Anforderungsklassen

- (1) In Abhängigkeit von der Konstruktion des Silobauwerkes und seiner Anfälligkeit für unterschiedliche Versagensarten können bei der Ermittlung der Einwirkungen auf Silostrukturen verschiedene Genauigkeitsniveaus verwendet werden.
- (2) Die Siloeinwirkungen sollte nach einer der folgenden drei, in dieser Norm verwendeten Anforderungsklassen ermittelt werden (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1 — Klassifikation von Bemessungssituationen

Anforderungsklasse	Beschreibung
Anforderungsklasse 3	Silos mit einem Fassungsvermögen von mehr als 10 000 Tonnen Silos mit einem Fassungsvermögen von mehr als 1 000 Tonnen, bei denen eine der folgenden Bemessungssituationen vorliegt: a) exzentrische Entleerung mit $e_0/d_C > 0,25$ (siehe Bild 1b) b) niedrige Silos mit einer exzentrischen Befüllung von mehr als $e_0/d_C > 0,25$
Anforderungsklasse 2	Alle Silos, die durch diese Lastnorm abgedeckt sind und nicht in den anderen beiden Klassen enthalten sind.
Anforderungsklasse 1	Silos mit einem Fassungsvermögen von weniger als 100 Tonnen

ANMERKUNG Die in Tabelle 1 angeführte Unterscheidung in unterschiedliche Anforderungsklassen ist unter Berücksichtigung der Unsicherheiten einer genauen Bestimmung der Einwirkungen festgelegt worden. Die Regelungen für kleine Silos sind einfach und konservativ auf der sicheren Seite, weil sie eine ihnen eigene Robustheit besitzen und die hohen Kosten z. B. für eine Bestimmung von Schüttgutkennwerten nicht gerechtfertigt sind.

(3) Es kann für ein Silo immer eine höhere Anforderungsklasse als nach Tabelle 1 gefordert ausgewählt werden. Für jeden Teil der in dieser Lastnorm beschriebenen Vorgehensweise (Lastansätze) kann, wenn dies zweckdienlich ist, eine höhere Anforderungsklasse als nach Tabelle 1 zugrunde gelegt werden.

(4) Sind mehrere Silozellen miteinander verbunden, sollte für jede Zelle die geeignete Anforderungsklasse einzeln bestimmt werden, nicht für die gesamte Silobatterie.

5 Bemessungssituationen

5.1 Allgemeines

(1) Die Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter sind für jede relevante Bemessungssituation in Übereinstimmung mit den allgemeinen Festlegungen in DIN 1055-100 zu bestimmen.

(2) Es sind die maßgebenden Bemessungssituationen zu betrachten und die kritischen Lastfälle zu ermitteln. Für jeden kritischen Lastfall sind die Bemessungswerte der Auswirkungen aus der Kombination der Einwirkungen zu bestimmen.

(3) Die Kombinationsregeln hängen vom jeweiligen Nachweis ab und sind nach DIN 1055-100 zu wählen.

ANMERKUNG Maßgebende Kombinationsregeln sind in Anhang A angegeben.

(4) Einwirkungen, die von angrenzenden Gebäudestrukturen übertragen werden, sind zu berücksichtigen.

(5) Einwirkungen aus Förder- und Einfüllanlagen sind zu berücksichtigen. Besondere Aufmerksamkeit ist bei nicht fest installierten Förderanlagen geboten. Sie können über das eingelagerte Schüttgut Lasten auf die Silostruktur übertragen.

(6) Je nach Situation sind die folgenden außergewöhnlichen Einwirkungen und Situationen zu berücksichtigen:

- Einwirkungen infolge von Explosionen;
- Einwirkungen infolge von Fahrzeuganprall;
- Einwirkungen infolge von Erdbeben;
- Einwirkungen infolge von Brandbelastungen.

5.2 Bemessungssituationen infolge von in Silos gelagerte „Schüttgüter“

(1) Lasten auf Silos infolge der gelagerten Schüttgüter sind für den größtmöglichen Füllstand zu bestimmen.

(2) Die Lastansätze für das Befüllen und Entleeren können sowohl für die Tragsicherheitsnachweise als auch die Gebrauchstauglichkeitsnachweise verwendet werden.

(3) Die Bemessung für das Befüllen und Entleeren von Schüttgütern hat sich nach den Hauptlastfällen zu richten, die zu unterschiedlichen Grenzzuständen für das Bauwerk führen können:

- maximale Lasten senkrecht auf die vertikale Silowand (Horizontallasten);
- maximale vertikale Wandreibungslast auf die vertikale Silowand;
- maximale Vertikallasten auf den Siloboden;
- maximale Lasten auf den Silotrichter.

(4) Bei der Ermittlung der Lasten sind immer die oberen charakteristischen Werte der Schüttgutwichte γ zu verwenden.

(5) Die Ermittlung der Lasten eines Lastfalles hat immer für eine bestimmte Kombination von zusammengehörigen Schüttgutkennwerten μ , K und φ_i zu erfolgen, so dass jedem Grenzzustand eine spezielle, definierte Beschaffenheit eines Schüttgutes zugeordnet ist.

(6) Für jeden dieser Lastfälle werden seine Extremwerte erreicht, wenn die Schüttgutkennwerte μ , K und φ_i jeweils unterschiedliche Extremwerte innerhalb der Streubreiten ihrer charakteristischen Schüttgutkennwerte annehmen. Um bei der Bemessung eine ausreichende Sicherheit für alle Grenzzustände sicherzustellen, sind unterschiedliche Kombinationen der Extremwerte dieser Materialparameter zu betrachten. Die zu verwendenden Extremwerte der Schüttgutkennwerte sind für jeden der zu untersuchenden Lastfälle in Tabelle 2 angegeben.

Tabelle 2 — Maßgebliche Kennwerte für die unterschiedlichen Lastansätze

Lastfalluntersuchung	Anzusetzender charakteristischer Wert		
	Wandreibungs- koeffizient μ	Horizontallast- verhältnis K	Winkel der inneren Reibung φ_i
Vertikaler Wandabschnitt			
Maximale Horizontallasten senkrecht auf die vertikalen Wände	Unterer Grenzwert	Oberer Grenzwert	Unterer Grenzwert
Maximale Wandreibungslasten auf die vertikalen Wände	Oberer Grenzwert	Oberer Grenzwert	Unterer Grenzwert
Maximale Vertikallasten auf den Trichter oder den Siloboden	Unterer Grenzwert	Unterer Grenzwert	Oberer Grenzwert
Lastfalluntersuchung	Wandreibungs- koeffizient μ	Lastverhältnis im Trichter F	Winkel der inneren Reibung φ_i
Trichterwände			
Maximale Trichterlasten im Füllzustand	Unterer Grenzwert für den Trichter	Unterer Grenzwert	Unterer Grenzwert
Maximale Trichterlasten beim Entleeren	Unterer Grenzwert für den Trichter	Oberer Grenzwert	Oberer Grenzwert
ANMERKUNG 1 Es ist zu beachten, dass der Wandreibungswinkel immer kleiner oder gleich dem Winkel der inneren Reibung des gelagerten Schüttgutes ist (d. h. $\varphi_{wh} \leq \varphi_i$). Ansonsten bildet sich innerhalb des Schüttgutes eine Gleitfläche aus, wenn an der Wandkontaktfläche größere Schubspannungen aufnehmbar sind als durch die innere Reibung des Schüttgutes selbst. Das bedeutet, dass in allen Fällen der Wandreibungskoeffizient nicht größer als $\tan \varphi_i$ angenommen werden sollte ($\mu = \tan \varphi_w \leq \tan \varphi_i$). ANMERKUNG 2 Die Lasten senkrecht auf die Trichterwände p_n sind in der Regel am größten, wenn die Wandreibung im Trichter klein ist, weil dadurch ein kleinerer Teil der Lasten im Trichter über Reibung an der Wand abgetragen wird. Es ist zu beachten, welche maximalen Kennwerte bei den einzelnen Bemessungsaufgaben maßgeblich werden (d. h. ob die Wandreibungslasten oder Lasten senkrecht zur Trichterwand als maximal anzusetzen sind, hängt von dem zu untersuchenden Versagenszustand des Bauteils ab).			

(7) Ungeachtet der obigen Ausführungen können Silos der Anforderungsklasse 1 mit den Mittelwerten der Schüttgutkennwerte, also des Mittelwerts des Wandreibungskoeffizienten μ_m , des Mittelwerts des Horizontallastverhältnisses K_m und des Mittelwerts des Winkels der inneren Reibung φ_{im} bemessen werden.

(8) Die grundlegenden Gleichungen zur Berechnung der Silolasten sind in den Abschnitten 7 und 8 enthalten. Sie sind der Berechnung folgender charakteristischen Lasten zugrunde zu legen:

— Fülllasten auf vertikale Wandabschnitte (siehe Abschnitt 7);

- Entleerungslasten auf vertikale Wandabschnitte (siehe Abschnitt 7);
- Füll- und Entleerungslasten auf waagerechte Böden (siehe Abschnitt 8);
- Fülllasten auf Trichter (siehe Abschnitt 8);
- Entleerungslasten auf Trichter (siehe Abschnitt 8).

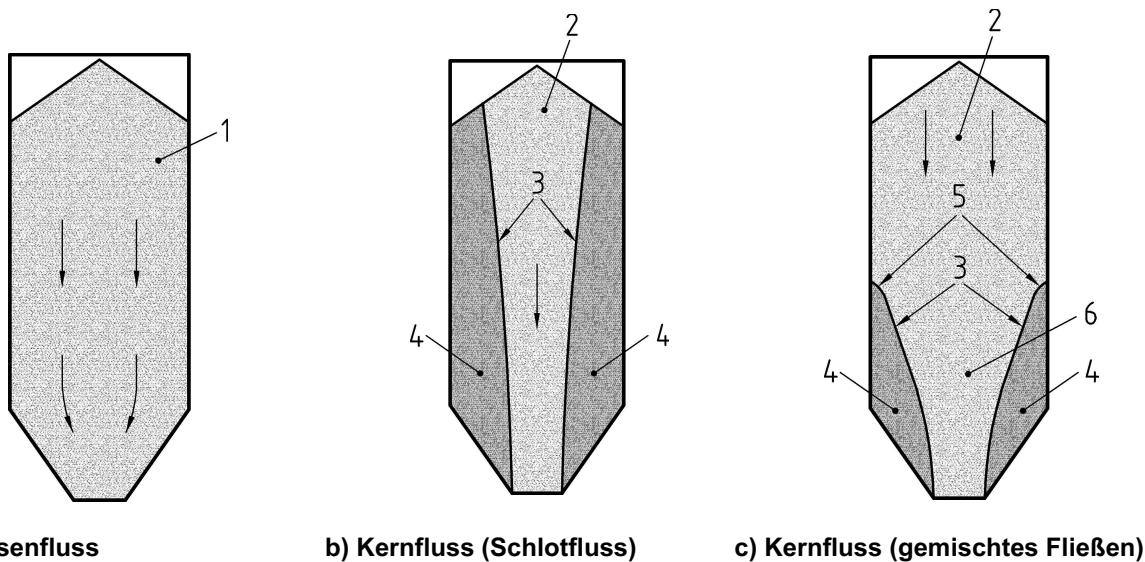
5.3 Bemessungssituationen infolge unterschiedlicher geometrischer Ausbildungen der Silogeometrie

(1) Unterschiedliche Siloschlankheiten (Verhältnis von Höhe zu Durchmesser), Trichtergeometrien und Anordnungen der Auslauföffnungen führen zu unterschiedlich zu betrachtenden Bemessungssituationen.

(2) Wenn bei einigen Füllständen die Flugbahn des Füllstrahles des eingefüllten Schüttgutes zu einem exzentrisch ausgebildeten Anschüttkegel an der Schüttgutoberfläche führt (siehe Bild 1b), können in unterschiedlichen Bereichen des Silos unterschiedliche Lagerungsdichten auftreten, die zu unsymmetrischen Lasten führen. Bei der Ermittlung der Größe dieser Lasten ist die größtmögliche Exzentrizität des Füllstrahles e_f zugrunde zu legen (siehe 7.2.1.2 und 7.3.1.2).

(3) Bei der Bemessung sind die Auswirkungen der sich beim Entleeren einstellenden Fließprofile zu beachten, die in folgende Kategorien eingeteilt werden können (siehe Bild 2):

- Massenfluss;
- Schlotfluss;
- gemischtes Fließen.



Legende

- | | |
|----------------------------------|-----------------------|
| 1 Gesamtes Schüttgut in Bewegung | 4 Schüttgut in Ruhe |
| 2 Fließen | 5 Effektiver Übergang |
| 3 Fließkanalgrenzen | 6 Effektiver Trichter |

Bild 2 — Grundlegende Fließprofile

(4) Wenn bei Schlotfluss zusätzlich sichergestellt werden kann, dass sich der Fließkanal immer innerhalb des Schüttgutes ohne Berührung mit der Silowand befindet (siehe Bilder 3a und 3b), können die Entleerungsdrücke vernachlässigt werden. Niedrige Silos mit konzentrischer Entleerung mit Hilfe der Schwerkraft und Silos mit einem an der Schüttgutoberfläche befindlichen mechanischen Entleerungssystem, das eine Schlotflussausbildung innerhalb des Schüttgutkörpers sicherstellt (siehe Bild 5a und 5b und 6a), erfüllen diese Bedingungen (siehe 7.1 (9) und 7.3.2.1 (2) und (4)).

ANMERKUNG Ein geeignet ausgelegtes Zentralrohr mit seitlichen Entnahmeöffnungen („Anti-Dynamic Tube“) kann diese Bedingung, d. h. die Ausbildung eines inneren Schlotflusses, auch sicherstellen.

(5) Bei symmetrischem Massenfluss oder bei gemischtem Fließen (siehe Bild 2) sind bei der Bemessung in diesen Fällen üblicherweise auftretenden unsymmetrischen Lasten zu berücksichtigen (siehe 7.2.2.2 und 7.3.2.2).

(6) Bei Fließprofilen mit Kernfluss (siehe Bild 2) und teilweisem Kontakt der sich in Bewegung befindlichen Schüttgutbereiche mit der Silowand sind bei der Bemessung weitere unsymmetrische Lastanteile zu berücksichtigen, die speziell in diesem Fall auftreten können (siehe Bild 3c und 3d sowie Bild 4b und 4c) (siehe 7.2.4).

(7) Bei Silos mit mehreren Auslauföffnungen ist unter Annahme des maximal möglichen Füllzustandes zu berücksichtigen, dass im Betrieb entweder eine Auslauföffnung allein oder Kombinationen von gleichzeitig geöffneten Auslauföffnungen wirksam sein können.

(8) Bei Silos mit mehreren Auslauföffnungen sind die im Betrieb vorgesehenen Kombinationen von aktiven Auslauföffnungen als gewöhnliche Bemessungssituationen zu behandeln. Andere nicht auszuschließende Öffnungssituationen, die der planmäßige Betrieb nicht vorsieht, sind als außergewöhnliche Bemessungssituationen zu behandeln.

(9) Wenn bei einem exzentrisch gefüllten, sehr schlanken Silo (d. h. $h_c/d_c > 4$) Entmischungseffekte in unterschiedlichen Bereichen im Silo entweder zu unterschiedlichen Packungsdichten oder Kohäsion des Schüttgutes führen, kann die asymmetrische Anlagerung der Schüttgutpartikel einen unsymmetrischen Kernfluss auslösen (siehe Bild 5d). Dies führt im Silo zu Bereichen, in denen das Schüttgut entlang der Silowand fließt und dabei unsymmetrische Lasten hervorruft. Für diese Fälle sind spezielle Lastansätze (siehe 7.2.4.1 (2)) zu verwenden.

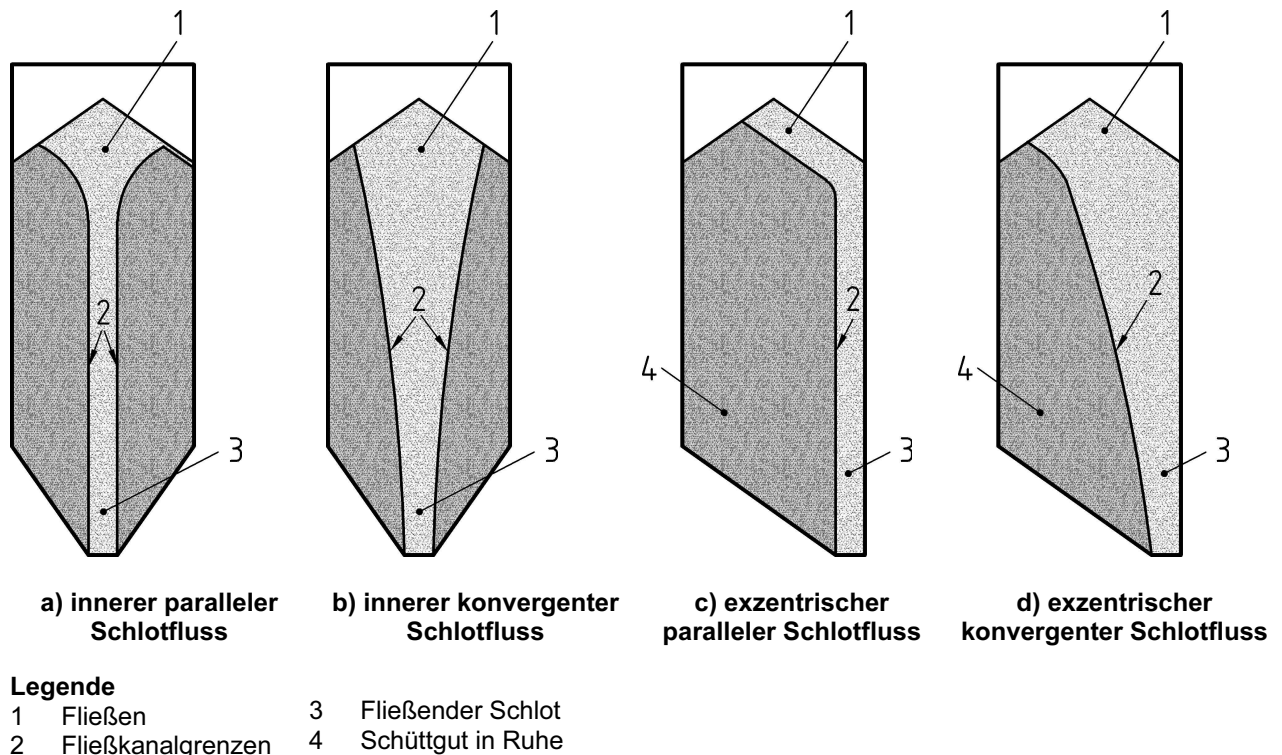
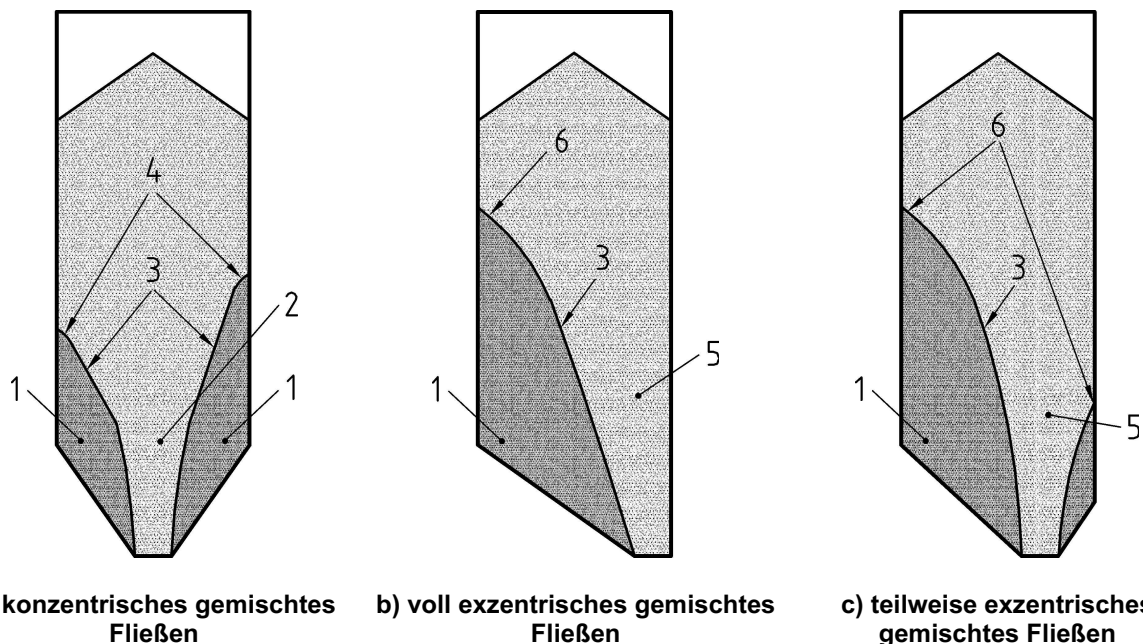


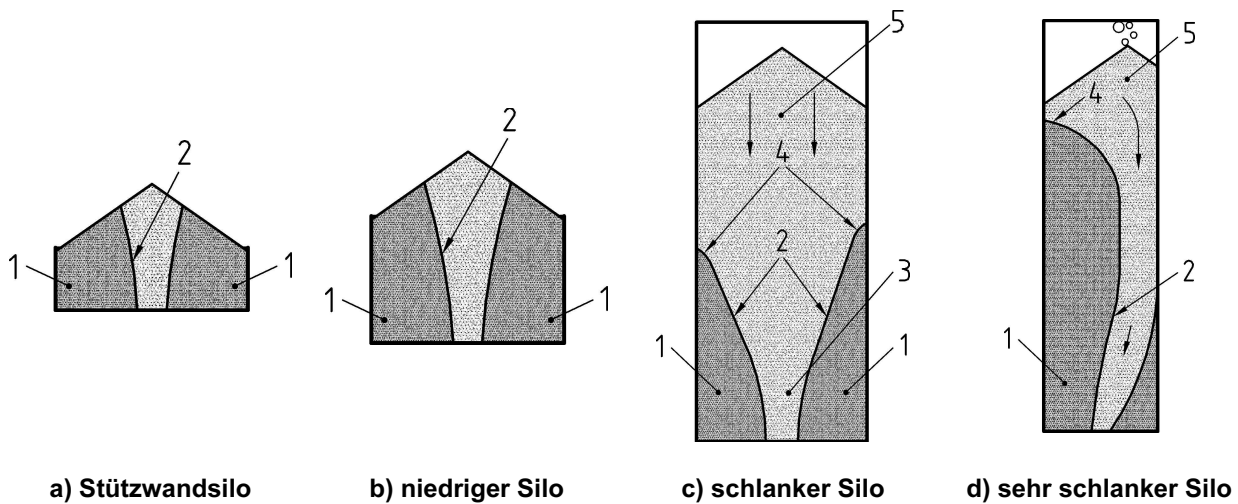
Bild 3 — Fließprofile mit Schlotfluss



Legende

- | | |
|-----------------------|---|
| 1 Ruhend | 4 Effektiver Übergang |
| 2 Effektiver Trichter | 5 Fließzone |
| 3 Fließkanalgrenze | 6 Effektiver Übergang variiert in Siloumfangsrichtung |

Bild 4 — Fließprofile mit gemischtem Schüttgutfließen



Legende

- | | |
|-----------------------|-----------------------|
| 1 Schüttgut in Ruhe | 4 Effektiver Übergang |
| 2 Fließkanalgrenze | 5 Fließen |
| 3 Effektiver Trichter | |

Bild 5 — Auswirkung der Schlankheit (Verhältnis Höhe zu Durchmesser) auf das gemischte Schüttgutfließen und den Schlotfluss

(10) Bei Silos mit pneumatisch beförderten staubförmigen Schüttgütern sind zwei Bemessungssituationen bei jeweils maximaler Befüllung zu betrachten:

- Das eingefüllte Schüttgut kann einen Schüttkegel ausbilden, wie dies bei den anderen Schüttgütern der Fall ist.
- Es ist zu berücksichtigen, dass sich die Schüttgutoberfläche unabhängig vom Böschungswinkel und der Einfüllexzentrizität unter Umständen auch eben ausformt (siehe Bild 6c). In diesem Fall können die Exzentrizitäten e_f und e_t zu null angesetzt werden.

(11) Bei Silos zur Lagerung von staubförmigen Schüttgütern mit kontinuierlicher Lufteinblasung im Bodenbereich als Entleerungshilfe (siehe Bild 6b) kann der gesamte Schüttgutbereich in Bodennähe fluidisiert werden, was sogar in einem niedrigen Silo einen wirksamen Massenfluss hervorrufen kann. Solche Silos sind unabhängig von der tatsächlichen Schlankheit h_c/d_c entsprechend dem Vorgehen bei schlanken Silos zu berechnen.

(12) Bei Silos für staubförmige Schüttgüter mit kontinuierlicher Lufteinblasung im Bodenbereich als Entleerungshilfe (siehe Bild 6b) kann auch nur ein Teilbereich des Schüttgutes in Bodennähe fluidisiert werden. Dies kann einen exzentrischen Schlotfluss hervorrufen (siehe Bild 4b), was bei der Bemessung zu berücksichtigen ist. Die Exzentrizität des resultierenden Fließkanals und der resultierende Wert für die anzusetzende Exzentrizität e_o sind unter Beachtung des fluidisierten Bereiches und nicht nur aus der Lage der Auslauföffnung abzuleiten.

(13) Die vertikalen Silowände mit einem Entleerungstrichter, der zu einem „erweiterten Fließen“ („expanded flow“) (siehe Bild 6d) führt, können den Bedingungen eines gemischten Schüttgutfließens unterliegen. Dies kann zu unsymmetrischen Entleerungslasten führen. Als Schlankheit ist bei diesem Silotyp das Verhältnis h_b/d_c anstatt h_c/d_c (siehe Bild 1a) anzusetzen.

(14) Ein Silo mit einer Schlankheit h_c/d_c kleiner als 0,4 und mit einem Auslauftrichter ist als niedriger Silo einzustufen. Bei einem waagerechten Siloboden ist dieser Silo als Stützwandsilo einzustufen.

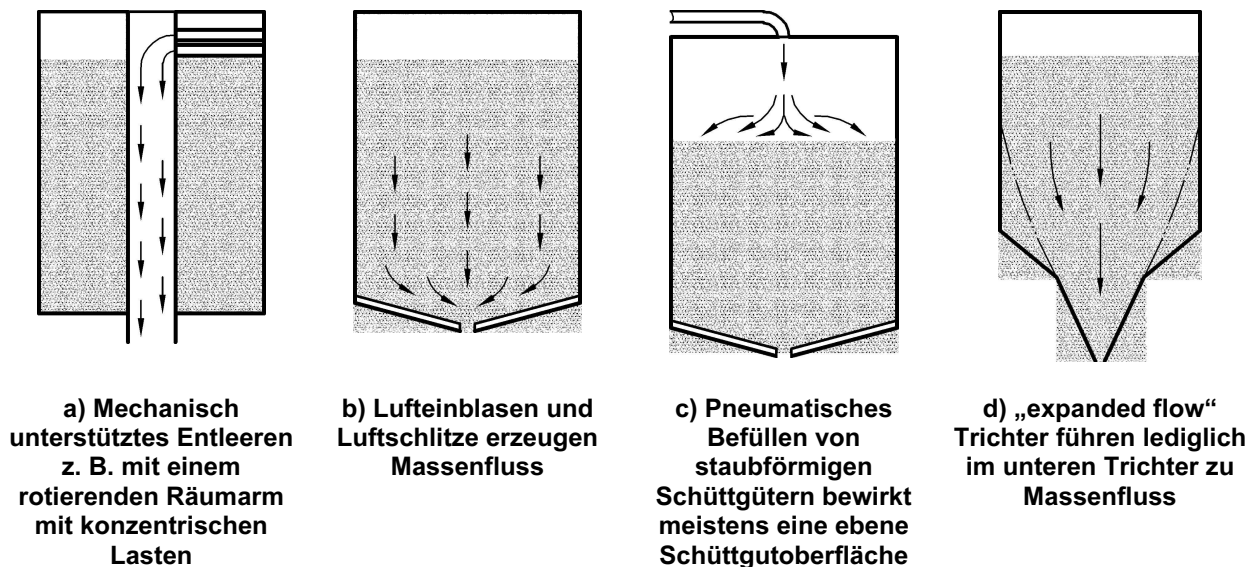


Bild 6 — Spezielle Füll- und Entleerungsanordnungen

5.4 Bemessungssituationen infolge spezieller Konstruktionsformen von Silos

- (1) Bei der Bemessung von Stahlbetonsilos für den Gebrauchszustand sind die Rissbreiten auf ein geeignetes Maß zu beschränken. Die Kontrolle der Rissbreite hat die Nachweise zur Rissbreitenbeschränkung nach DIN 1045-1 unter Berücksichtigung der sich aus den Umgebungsbedingungen des Silos ergebenden Expositionsklassen zu erfüllen.
- (2) Bei Metallsilos, die maßgeblich aus Konstruktionen mit Bolzen- und Schraubenverbindungen bestehen, sind die Festlegungen für die unsymmetrischen Lastansätze (Teilflächenlast) nach 7.2.1.4 (4) zu treffen.
- (3) Bei Metallsilos mit rechteckigem Querschnitt, die innerhalb des Siloschaftes Zugbänder zur Reduzierung der Wandbiegemomente enthalten, sind die Ausführungen von 7.7 zu beachten.
- (4) Die Auswirkungen von Ermüdungseffekten sind bei Silos und Flüssigkeitsbehältern zu berücksichtigen, wenn diese durchschnittlich mehr als einmal am Tag mit einem Lastzyklus beaufschlagt werden. Ein Lastzyklus entspricht einer vollständigen Befüllung und Entleerung eines Silos, oder im Falle eines mit Lufteinblasen beaufschlagten Silos (siehe Bild 6b) eine vollständige Abarbeitung (Rotation) der mit Lufteinblasen beaufschlagten Sektoren. Ermüdungseffekte sind auch bei Silos zu berücksichtigen, die von schwingenden Maschinen/Anlagenkomponenten beeinflusst werden.
- (5) Vorgefertigte Silos sind auch für Einwirkungen bei der Herstellung, beim Transport und bei der Montage zu bemessen.
- (6) Bei Schlupf- und Einstiegsöffnungen in den Silo- oder Trichterwänden sind die Lasten auf die Verschlussdeckel mit dem doppelten Wert der auf die angrenzenden Wandabschnitte anzusetzenden maximalen Lasten zu berücksichtigen. Diese Lasten sind nur für die Bemessung des Verschlussdeckels und seine Auflagerung bzw. Befestigungskonstruktionen anzusetzen.
- (7) Wenn das Silodach Lasten von Staubfilteranlagen, Zyklonen, mechanischen Fördereinrichtungen oder sonstigen Anlagenteilen aufzunehmen hat, sind diese Lasten als Nutzlasten zu behandeln.
- (8) Wenn pneumatische Fördersysteme zur Befüllung oder Entleerung von Silos verwendet werden, sind entsprechende resultierende Luftdruckunterschiede zu berücksichtigen.

ANMERKUNG Diese Drücke betragen zwar im Regelfall <10 kPa, es können aber auch erhebliche Unterdrücke (i. Allg. 40 kPa $\approx 0,4$ bar) zufolge einer fehlerhaften Dimensionierung von speziellen Förderanlagen oder bei Betriebsstörungen auftreten. Silos müssen deshalb mit geeigneten Entlastungsvorrichtungen für unvorhergesehene Ereignisse ausgestattet sein, wenn der Konstrukteur des Silos diese nicht anderweitig sicher ausgeschlossen werden kann.

- (9) Beim Einsatz von schwingenden Einrichtungen, Luftkanonen oder rotierenden Entnahmemärgeln am Siloboden sind die dadurch bedingten Laständerungen in Hinblick auf den Grenzzustand der Ermüdung zu untersuchen. Schwingungen aus pneumatischen Förderanlagen sind ebenfalls zu berücksichtigen.
- (10) Bei einem Umbau eines bestehenden Silos durch Einsetzen einer Auskleidung der Silowände sind die Folgen einer veränderten Wandreibung auf die Silobemessung zu betrachten, einschließlich der möglichen Auswirkungen aus einem sich möglicherweise veränderten Fließprofils.

5.5 Bemessungssituationen infolge in Flüssigkeitsbehältern gelagerten Flüssigkeiten

Lasten auf Flüssigkeitsbehälter infolge der gelagerten Flüssigkeiten sind für den maximalen Füllzustand zu ermitteln.

5.6 Bemessungsprinzipien für Explosionen

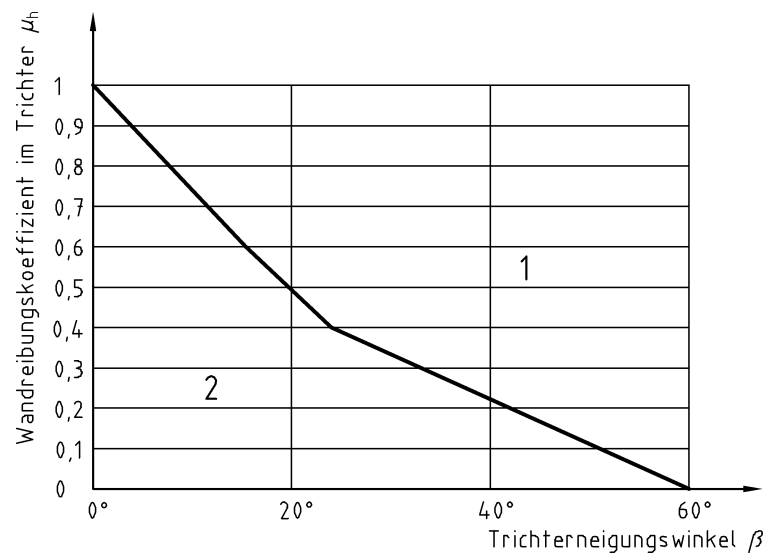
- (1) Da in Flüssigkeitsbehältern und Silos gelagerte Flüssigkeiten bzw. Schüttgüter zu Explosionen neigen können, sind die potenziellen Schädigungen durch folgende Maßnahmen zu begrenzen oder zu vermeiden:

- Anordnung von ausreichenden Druckentlastungsflächen;
 - Anordnung von geeigneten Explosionsunterdrückungssystemen;
 - Auslegung/Bemessung der Struktur für die Aufnahme der Explosionsdrücke.
- (2) Einige Schüttgüter, die zu Staubexplosionen neigen, sind in Anhang I genannt.
- (3) Die Hinweise zum Lastfall Staubexplosion nach Anhang I sind zu beachten. Weitere Hinweise einschließlich Regeln für die Bemessung für Staubexplosionen können dem DIN-Fachbericht 140 entnommen werden.
- (4) Einwirkungen infolge einer Staubexplosion in einer Siloanlage auf benachbarte Gebäude oder Gebäudeteile sind zu berücksichtigen.

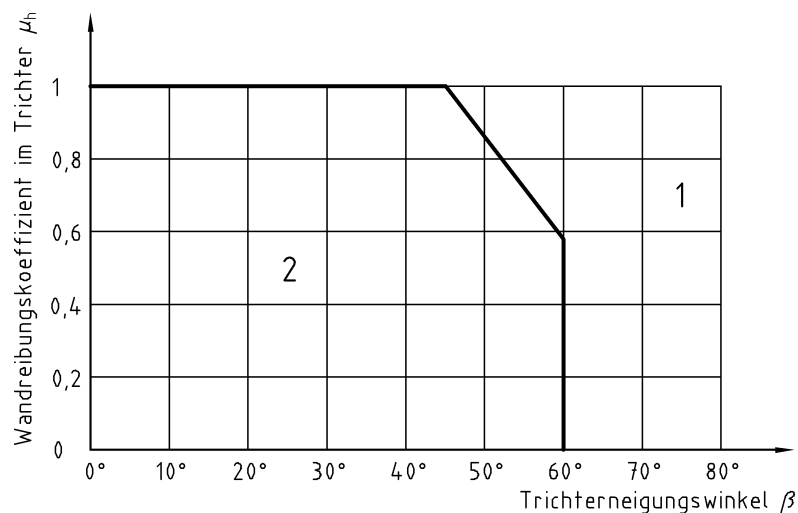
6 Schüttgutkennwerte

6.1 Allgemeines

- (1) Bei der Ermittlung der Silolasten sind folgende Einflüsse zu berücksichtigen:
- die Streuung der Schüttgutkennwerte;
 - die Schwankungen der Wandreibung an der Silowand;
 - die Silogeometrie;
 - die Befüll- und Entleerungsverfahren.
- (2) Günstig wirkende Einflüsse der Schüttgutsteifigkeit dürfen bei der Lastermittlung und den Stabilitätsbetrachtungen der Wand nicht berücksichtigt werden. Eine positive Wirkung einer Wandverformung auf die sich im Schüttgut entwickelnden Drücke darf nicht in Ansatz gebracht werden, außer wenn eine verständig verifizierte Berechnungsmethode nachgewiesen werden kann.
- (3) Falls erforderlich, ist die Art des Fließprofils (Massen- oder Kernfluss) aus Bild 7 zu ermitteln. Bild 7 darf aufgrund der zugrunde gelegten vereinfachenden Annahmen aber nicht für die verfahrenstechnische Auslegung der Silos herangezogen werden, da z. B. der Einfluss der inneren Reibung vernachlässigt ist.
- ANMERKUNG** Die Auslegung der Silogeometrie für einen Massenfluss ist außerhalb des Anwendungsbereiches dieser Norm. Für diese Zwecke sind die speziellen Methoden und Verfahren der schüttgutmechanischen Verfahrenstechnik anzuwenden.



a) Konischer Trichter



b) Keilförmiger Trichter

Legende

- 1 Bereich mit Kernfluss
- 2 Bereich mit der Möglichkeit von Massenfluss

Bild 7 — Bedingungen, unter denen Drücke infolge Massenfluss auftreten

6.2 Schüttgutkennwerte

6.2.1 Allgemeines

(1) Die für die Berechnung der Lasten zu quantifizierenden Materialeigenschaften von in Silozellen gespeicherten Schüttgütern sind entweder aus Versuchsergebnissen oder aus anderem geeigneten Datenmaterial zu beschaffen bzw. abzuleiten.

(2) Bei Verwendung von Werten aus Versuchsergebnissen und anderen Datenquellen sind diese in Hinblick auf den jeweilig betrachteten Lastfall in geeigneter Weise auszuwerten.

(3) Es ist zu berücksichtigen, dass zwischen den in Versuchen gemessenen Materialparametern und den Kennwerten, die das tatsächliche Schüttgutverhalten im Silo bestimmen, signifikante Unterschiede bestehen können.

(4) Bei der Abschätzung der unter (3) erwähnten Unterschiede in den Schüttgutkennwerten sind unter anderem folgende Faktoren zu beachten:

- viele Parameter sind keine Konstanten, sondern können die vom Spannungsniveau und der Belastungsgeschichte abhängig sein;
- Einflüsse infolge Partikelform, Größe und Korngrößenverteilung können sich im Versuch und im Silo unterschiedlich stark auswirken;
- Zeiteinflüsse;
- Schwankungen des Feuchtigkeitsgehalts;
- Einflüsse von dynamischen Einwirkungen;
- die Sprödigkeit oder Duktilität der getesteten Schüttgüter;
- die Art und Weise des Einbringens des Schüttgutes in den Silo und in das Prüfgerät.

(5) Bei der Abschätzung der unter (3) erwähnten Unterschiede in Bezug auf den Wandreibungskoeffizienten sind folgende Faktoren zu beachten:

- Korrosion und chemische Reaktion zwischen den Schüttgutpartikeln, Feuchte und der Wand;
- Abrieb und Verschleiß, die die Silowand aufrauen oder glätten können;
- Polieren der Wandoberfläche;
- Anreicherung von Fettablagerungen an der Wand;
- Partikel, die in die Wandoberfläche hineingedrückt werden (gewöhnlich ein Einfluss, der zur Aufrauung der Wandoberfläche führt).

(6) Bei der Festlegung der Werte der Materialparameter ist Folgendes zu beachten:

- veröffentlichte und allgemein anerkannte Erkenntnisse zu der Anwendung der jeweiligen Versuche;
- Vergleichsbetrachtungen zu den in Versuchen gemessenen Werten der einzelnen Parameter mit entsprechend veröffentlichten Kennwerten und unter Berücksichtigung von allgemeinen Erfahrungswerten;
- die Streuung der für die Bemessung relevanten Parameter;
- die Ergebnisse aus großmaßstäblichen Messungen an Silos ähnlicher Bauweise;
- Korrelationen zwischen den Ergebnissen von unterschiedlichen Arten von Versuchen;
- während der Nutzungsdauer des Silos erkennbare Veränderungen in den Materialkennwerten.

(7) Die Auswahl der charakteristischen Materialkennwerte hat auf der Grundlage von in Laboruntersuchungen bestimmten Werten unter Berücksichtigung von gründlich erworbenem Erfahrungswissen zu erfolgen.

(8) Der charakteristische Wert eines Materialparameters ist als eine sorgfältige Abschätzung des Wertes zu wählen, der das Auftreten der Last beeinflusst.

Tabelle 3 — Kategorien der Wandoberflächen

Kategorie	Wandoberfläche Erläuterung	Beispielhafte Materialien
D1	Poliert	Kaltgewalzter nichtrostender Stahl Narbiger nichtrostender Stahl Polierter nichtrostender Stahl Galvanisierter Kohlenstoffstahl Aluminium Stranggepresstes hochverdichtetes Polyethylen
D2	Glatt	Karbonstahl mit leichtem Oberflächenrost Beschichteter Kohlenstoffstahl Gegossenes hochverdichtetes Polyethylen Glatte keramische Platten Mit Stahlschalung hergestellte Betonoberfläche
D3	Rau	Schalungsrauer Beton Narbiger Kohlenstoffstahl Stahlsilos mit Bolzen auf der innen liegenden Wandoberfläche Grob polierte keramische Platten
D4	Gewellt	Horizontal gewellte Wände Profilierte Bleche mit horizontalen Schlitten Nicht genormte Wände mit großen Abweichungen
Bei diesen Oberflächen ist mit besonderer Sorgfalt der Effekt der Aufrauung durch in die Wandoberfläche eingedrückte Partikel zu betrachten.		

ANMERKUNG Die in Tabelle 3 angeführte Klassifizierung und Erläuterungen beziehen sich auf die Reibung und weniger auf die Rauheit. Der maßgebliche Grund hierfür ist, dass nur eine geringe Korrelation zwischen dem Maß der Rauheit und der gemessenen Wandreibung infolge eines entlang der Wandoberfläche gleitenden Schüttgutes besteht.

6.2.2 Ermittlung der Schüttgutkennwerte

(1) Die für die Bemessung anzunehmenden Schüttgutkennwerte haben mögliche Streuungen infolge der Änderungen in der Zusammensetzung, Produktionsverfahren, Korngrößenverteilung, Feuchtigkeitsgehalt, Temperatur, Alter und elektrischer Aufladung während der Handhabung zu berücksichtigen.

(2) Die Schüttgutkennwerte sind entweder nach der vereinfachten Vorgehensweise nach 6.2.3 oder durch Messungen in Versuchen nach 6.3 zu bestimmen.

(3) Kennwerte von Schüttgütern, die nicht in der Tabelle E.1 enthalten sind, sind über Messungen in Versuchen nach 6.3 zu beschaffen.

(4) Die der Bemessung zugrunde gelegten Wandreibungsbeiwerte μ von Schüttgütern sollten die Rauheit der Wandoberflächen, an welchen sie entlang gleiten, berücksichtigen. In Tabelle 3 sind unterschiedliche Klassen von Wandoberflächen definiert, wie sie in dieser Norm verwendet werden.

(5) Bei Silos mit Wandoberflächen der Klasse (Kategorie) D4 nach Tabelle 3 sollte der effektive Wandreibungskoeffizient nach dem in D.2 beschriebenen Vorgehen bestimmt werden.

(6) Der Schüttgutbeiwert C_{op} für die Teilflächenlasten ist Tabelle E.1 zu entnehmen oder nach Gleichung (8) zu berechnen.