

DIN EN 1993-4-1**DIN**

ICS 65.040.20; 91.010.30; 91.080.10

Ersatzvermerk
siehe unten**Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten –
Teil 4-1: Silos;
Deutsche Fassung EN 1993-4-1:2007 + AC:2009**

Eurocode 3: Design of steel structures –
Part 4-1: Silos;
German version EN 1993-4-1:2007 + AC:2009

Eurocode 3: Calcul des structures en acier –
Partie 4-1: Silos;
Version allemande EN 1993-4-1:2007 + AC:2009

Ersatzvermerk

Ersatz für DIN EN 1993-4-1:2007-07;
mit DIN EN 1993-1-8:2010-12, DIN EN 1993-1-8/NA:2010-12 und DIN EN 1993-4-1/NA:2010-12 Ersatz für
DIN 18914:1985-09;
mit DIN EN 1993-4-1/NA:2010-12 Ersatz für DIN 18914 Beiblatt 1:1985-09;
Ersatz für DIN EN 1993-4-1 Berichtigung 1:2009-09

Gesamtumfang 118 Seiten

Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN

DIN EN 1993-4-1:2010-12

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (EN 1993-4-1:2007 + AC:2009) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 250 „Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom BSI (Vereinigtes Königreich) gehalten wird.

Die Arbeiten auf nationaler Ebene wurden durch die Experten des NABau-Spiegelausschusses NA 005-08-16 AA „Tragwerksbemessung“ begleitet.

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 12. Juni 2006 angenommen.

Die Norm ist Bestandteil einer Reihe von Einwirkungs- und Bemessungsnormen, deren Anwendung nur im Paket sinnvoll ist. Dieser Tatsache wird durch das Leitpapier L der Kommission der Europäischen Gemeinschaft für die Anwendung der Eurocodes Rechnung getragen, indem Übergangsfristen für die verbindliche Umsetzung der Eurocodes in den Mitgliedsstaaten vorgesehen sind. Die Übergangsfristen sind im Vorwort dieser Norm angegeben.

Die Anwendung dieser Norm gilt in Deutschland in Verbindung mit dem Nationalen Anhang.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Texte dieses Dokuments Patentrechte berühren können. Das DIN [und/oder die DKE] sind nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Der Beginn und das Ende des hinzugefügten oder geänderten Textes wird im Text durch die Textmarkierungen AC AC angezeigt.

Änderungen

Gegenüber DIN V ENV 1993-4-1:2002-05 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) die Stellungnahmen der nationalen Normungsinstitute wurden eingearbeitet;
- b) der Vornormcharakter wurde aufgehoben;
- c) der Text wurde vollständig überarbeitet.

Gegenüber DIN EN 1993-4-1:2007-07, DIN EN 1993-4-1 Berichtigung 1:2009-09, DIN 18914:1985-09 und DIN 18914 Beiblatt 1:1985-09 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) auf europäisches Bemessungskonzept umgestellt;
- b) Ersatzvermerke korrigiert;
- c) Vorgänger-Norm mit der Berichtigung 1 konsolidiert;
- d) redaktionelle Änderungen durchgeführt.

Frühere Ausgaben

DIN 18914: 1985-09
DIN 18914 Beiblatt 1: 1985-09
DIN V ENV 1993-4-1: 2002-05
DIN EN 1993-4-1: 2007-07
DIN EN 1993-4-1 Berichtigung 1: 2009-09

EUROPÄISCHE NORM
EUROPEAN STANDARD
NORME EUROPÉENNE

EN 1993-4-1

Februar 2007

+AC

April 2009

ICS 65.040.20; 91.010.30; 91.080.10

Ersatz für ENV 1993-4-1:1999

Deutsche Fassung

Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 4-1: Silos

Eurocode 3: Design of steel structures —
Part 4-1: Silos

Eurocode 3: Calcul des structures en acier —
Partie 4-1: Silos

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 12. Juni 2006 angenommen.

Die Berichtigung tritt am 22. April 2009 in Kraft und wurde in EN 1993-4-1:2007 eingearbeitet.

Die CEN-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist. Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim Management-Zentrum des CEN oder bei jedem CEN-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CEN-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Management-Zentrum mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CEN-Mitglieder sind die nationalen Normungsinstitute von Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, der Schweiz, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.



EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG
EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION
COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION

Management-Zentrum: Avenue Marnix 17, B-1000 Brüssel

© 2009 CEN Alle Rechte der Verwertung, gleich in welcher Form und in welchem Verfahren, sind weltweit den nationalen Mitgliedern von CEN vorbehalten.

Ref. Nr. EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 D

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

Inhalt

	Seite
Vorwort	6
1 Allgemeines	10
1.1 Anwendungsbereich	10
1.2 Normative Verweisungen	10
1.3 Annahmen	12
1.4 Unterscheidung zwischen Grundsätzen und Anwendungsregeln	12
1.5 Begriffe	12
1.6 In Teil 4-1 von Eurocode 3 verwendete Symbole	15
1.6.1 Lateinische Großbuchstaben	15
1.6.2 Lateinische Kleinbuchstaben	15
1.6.3 Griechische Buchstaben	16
1.6.4 Indizes	17
1.7 Vorzeichenvereinbarungen	18
1.7.1 Vereinbarungen für das globale Koordinatensystem für kreisrunde Silos	18
1.7.2 Vereinbarungen für das globale Koordinatensystem für rechteckige Silos	19
1.7.3 Vereinbarungen für die Koordinaten von Bauteilen in kreisrunden und rechteckigen Silos	20
1.7.4 Vereinbarungen für Schnittgrößen in kreisrunden und rechteckigen Silos	22
1.8 Einheiten	24
2 Grundlagen der Bemessung	24
2.1 Anforderungen	24
2.2 Differenzierung der Zuverlässigkeit	25
2.3 Grenzzustände	26
2.4 Einwirkungen und Umwelteinflüsse	26
2.4.1 Allgemeines	26
2.4.2 Windlast	26
2.4.3 Kombination von Schüttgutlasten mit anderen Einwirkungen	26
2.5 Werkstoffeigenschaften	27
2.6 Abmessungen	27
2.7 Modellierung des Silos zur Berechnung der Beanspruchungen	27
2.8 Versuchsgestützte Bemessung	27
2.9 Beanspruchungen für den Nachweis der Grenzzustände	27
2.9.1 Allgemeines	27
2.9.2 Teilsicherheitsbeiwerte für Grenzzustände der Tragfähigkeit	27
2.9.3 Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit	28
2.10 Dauerhaftigkeit	28
2.11 Feuerwiderstand	28
3 Werkstoffeigenschaften	29
3.1 Allgemeines	29
3.2 Baustähle	29
3.3 Nichtrostende Stähle	29
3.4 Spezielle legierte Stähle	29
3.5 Anforderungen an die Zähigkeit	30
4 Grundlagen für die statische Berechnung	30
4.1 Grenzzustände der Tragfähigkeit	30
4.1.1 Basis	30
4.1.2 Zu führende Nachweise	30
4.1.3 Ermüdung und zyklisches Plastizieren — Kurzzeitermüdung	30
4.1.4 Berücksichtigung von Korrosion und Abrasion	30
4.1.5 Berücksichtigung von Temperatureinflüssen	31
4.2 Berechnung des Schalentragwerks eines kreisrunden Silos	31
4.2.1 Modellierung der Tragwerksschale	31

	Seite
4.2.2	Berechnungsmethoden 31
4.2.3	Geometrische Imperfektionen..... 34
4.3	Berechnung des Kastentragwerks eines rechteckigen Silos 34
4.3.1	Modellierung des Tragwerkskastens 34
4.3.2	Geometrische Imperfektionen..... 35
4.3.3	Berechnungsmethoden 35
4.4	Orthotrope Ersatzsteifigkeiten von profilierten Wandlechen 35
5	Bemessung von zylindrischen Wänden..... 37
5.1	Grundlagen 37
5.1.1	Allgemeines 37
5.1.2	Bemessung der Silowand..... 37
5.2	Unterscheidung zwischen verschiedenen Formen zylindrischer Schalen 38
5.3	Tragsicherheitsnachweise für zylindrische Silowände..... 39
5.3.1	Allgemeines 39
5.3.2	Isotrope, geschweißte oder geschraubte Wände 39
5.3.3	Isotrope Wände mit Vertikalsteifen 50
5.3.4	Horizontal profilierte Wände 51
5.3.5	Vertikal profilierte Wände mit Ringsteifen..... 60
5.4	Besondere Lagerungsbedingungen für zylindrische Silowände 61
5.4.1	Zylinderschalen mit voller Auflagerung am unteren Rand oder Lagerung auf einem Trägerrost..... 61
5.4.2	Zylinderschalen mit Zargenlagerung 61
5.4.3	Zylinderschalen mit eingebundenen Stützen 61
5.4.4	Zylinderschalen mit diskreter Auflagerung 62
5.4.5	Silos mit diskreter Auflagerung am Trichter 63
5.4.6	Zylindrische Silowände: Details für örtliche Auflager und Kraffteinleitungsrippen 63
5.4.7	Verankerung an der Basis eines Silos 65
5.5	Detailausbildung von Öffnungen in zylindrischen Wänden 66
5.5.1	Allgemeines 66
5.5.2	Rechteckige Öffnungen 66
5.6	Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit 67
5.6.1	Grundlagen 67
5.6.2	Durchbiegungen 67
6	Bemessung von konischen Trichtern 68
6.1	Grundlagen 68
6.1.1	Allgemeines 68
6.1.2	Bemessung der Trichterwand..... 68
6.2	Unterscheidung zwischen verschiedenen Formen von Trichterschalen 69
6.3	Tragsicherheitsnachweis für konische Trichterwände 69
6.3.1	Allgemeines 69
6.3.2	Isotrope, unversteifte, geschweißte oder geschraubte Trichter 70
6.4	Angaben zu speziellen Trichterkonstruktionen 75
6.4.1	Unterstützungskonstruktion 75
6.4.2	Stützengelagerte Trichter 75
6.4.3	Unsymmetrische Trichter 75
6.4.4	Versteifte Kegelschalen 75
6.4.5	Mehrfach-Kegelschalen 76
6.5	Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit 76
6.5.1	Grundlagen 76
6.5.2	Erschütterungen..... 76
7	Bemessung von kreisrunden konischen Dächern..... 76
7.1	Grundlagen 76
7.2	Unterscheidung zwischen verschiedenen Formen von Dachtragwerken..... 77
7.2.1	Begriffe 77
7.3	Tragsicherheitsnachweise für kreisrunde konische Silodächer 77
7.3.1	Schalendächer bzw. ungestützte Dächer..... 77

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

	Seite
7.3.2	Gespärredächer bzw. gestützte Dächer78
7.3.3	Traufkante (Knotenlinie zwischen Silodach und Siloschaft)78
8	Bemessung von Abzweigungsringen und Auflagerringträgern78
8.1	Grundlagen78
8.1.1	Allgemeines78
8.1.2	Bemessung des Ringes78
8.1.3	Begriffe78
8.1.4	Modellierung des Abzweigungsbereiches79
8.1.5	Grenzen für die Ringanordnung80
8.2	Berechnung des Abzweigungsbereiches80
8.2.1	Allgemeines80
8.2.2	Gleichmäßig unterstützte Abzweigungsbereiche81
8.2.3	Ringträger an der Abzweigung84
8.3	Tragwiderstände87
8.3.1	Allgemeines87
8.3.2	Widerstand gegen plastisches Versagen87
8.3.3	Widerstand gegen Knicken innerhalb der Ringebene88
8.3.4	Widerstand gegen Knicken aus der Ringebene heraus und gegen örtliches Beulen89
8.4	Tragsicherheitsnachweise91
8.4.1	Gleichmäßig unterstützte Abzweigungsbereiche91
8.4.2	Ringträger an der Abzweigung93
8.5	Angaben zur Auflageranordnung am Abzweigungsbereich94
8.5.1	Zargengelagerte Abzweigungsbereiche94
8.5.2	Stützensgelagerte Abzweigungsbereiche und Ringträger94
8.5.3	Basisring94
9	Bemessung von rechteckigen und ebenwandigen Silos95
9.1	Grundlagen95
9.2	Klassifizierung der Tragwerksformen95
9.2.1	Unversteifte Silos95
9.2.2	Versteifte Silos95
9.2.3	Silos mit Zugankern95
9.3	Tragwiderstände von unversteiften vertikalen Wänden96
9.4	Tragwiderstand von Silowänden aus versteiften und profilierten Platten96
9.4.1	Allgemeines96
9.4.2	Gesamtbiegung aus direkter Einwirkung des Schüttgutes97
9.4.3	Membranbeanspruchung aus Querscheibenfunktion99
9.4.4	Örtliche Biegung aus Schüttgut und/oder Ausrüstung99
9.5	Silos mit innen liegenden Zugankern100
9.5.1	Durch Schüttgutdruck verursachte Kräfte in innen liegenden Zugankern100
9.5.2	Modellierung der Zuganker101
9.5.3	Lastfälle für Zugankeranschlüsse102
9.6	Tragsicherheit von pyramidischen Trichtern103
9.7	Vertikale Steifen an Kastenwänden104
9.8	Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit104
9.8.1	Grundlagen104
9.8.2	Durchbiegungen105
Anhang A (informativ) Vereinfachte Regeln für kreisrunde Silos der Schadensfolgeklasse 1106	
A.1	Einwirkungskombinationen für Schadensfolgeklasse 1106
A.2	Ermittlung der Beanspruchungen106
A.3	Tragsicherheitsnachweise106
A.3.1	Allgemeines106
A.3.2	Isotrope, geschweißte oder geschraubte, zylindrische Wände107
A.3.3	Konische geschweißte Trichter110
A.3.4	Abzweigung111

	Seite
Anhang B (informativ) Gleichungen für Membranspannungen in konischen Trichtern	113
B.1 Konstanter Druck p_0 mit Wandreibung μp_0	113
B.2 Linear veränderlicher Druck (von p_1 an der Kegelspitze auf p_2 an der Abzweigung) mit Wandreibung μp	113
B.3 „Radiales Druckfeld“ mit dreieckiger Druckspitze („Switch“) an der Abzweigung	114
B.4 Wobei p_1 der Druck in Höhe h_1 oberhalb der Spitze und p_2 der Druck an der Abzweigung ist. Drücke nach verallgemeinerter Trichtertheorie.....	114
Anhang C (informativ) Winddruckverteilung über den Umfang kreisrunder Silos	115

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

Vorwort

Dieses Dokument (EN 1993-4-1:2007 + AC:2009) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 250 „Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom BSI gehalten wird. CEN/TC 250 ist für alle Eurocodes des konstruktiven Ingenieurbaus zuständig.

Diese Europäische Norm muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis August 2007, und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis März 2010 zurückgezogen werden.

Dieses Dokument ersetzt ENV 1993-4-1:1999.

Entsprechend der CEN/CENELEC-Geschäftsordnung sind die nationalen Normungsinstitute der folgenden Länder gehalten, diese Europäische Norm zu übernehmen: Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, Schweiz, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechische Republik, Ungarn, Vereinigtes Königreich und Zypern.

Hintergrund des Eurocode-Programms

Im Jahre 1975 beschloss die Kommission der Europäischen Gemeinschaften, für das Bauwesen ein Aktionsprogramm auf der Grundlage des Artikels 95 der Römischen Verträge durchzuführen. Die Ziele dieses Programms waren die Beseitigung technischer Handelshemmnisse und die Harmonisierung technischer Spezifikationen.

Im Rahmen dieses Aktionsprogramms leitete die Kommission die Bearbeitung von harmonisierten technischen Regelwerken für die Tragwerksplanung von Bauwerken ein, die im ersten Schritt als Alternative zu den in den Mitgliedsländern geltenden Regeln dienen und diese schließlich ersetzen sollten.

15 Jahre lang leitete die Kommission mit Hilfe eines Lenkungsausschusses mit Vertretern der Mitgliedsländer die Entwicklung des Eurocode-Programms, das in den 80er Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts zu der ersten Eurocode-Generation führte.

Im Jahre 1989 entschieden sich die Kommission und die Mitgliedsländer der Europäischen Union und der EFTA, die Entwicklung und Veröffentlichung der Eurocodes über eine Reihe von Mandaten an CEN zu übertragen, damit diese den Status von Europäischen Normen (EN) erhielten. Grundlage war eine Vereinbarung¹⁾ zwischen der Kommission und CEN. Dieser Schritt verknüpft die Eurocodes de facto mit den Regelungen der Richtlinien des Rates und mit den Kommissionsentscheidungen, die die Europäischen Normen behandeln (z. B. die Richtlinie des Rates 89/106/EWG zu Bauprodukten (Bauproduktenrichtlinie), die Richtlinien des Rates 93/37/EWG, 92/50/EWG und 89/440/EWG zur Vergabe öffentlicher Aufträge und Dienstleistungen und die entsprechenden EFTA-Richtlinien, die zur Einrichtung des Binnenmarktes eingeführt wurden).

Das Programm der Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau umfasst die folgenden Normen, die in der Regel aus mehreren Teilen bestehen:

EN 1990, *Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung*

EN 1991, *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke*

EN 1992, *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken*

1) Vereinbarung zwischen der Kommission der Europäischen Gemeinschaften und dem Europäischen Komitee für Normung (CEN) zur Bearbeitung der EUROCODES für die Tragwerksplanung von Hochbauten und Ingenieurbauwerken (BC/CEN/03/89).

- EN 1993, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten*
 EN 1994, *Eurocode 4: Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton*
 EN 1995, *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten*
 EN 1996, *Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten*
 EN 1997, *Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik*
 EN 1998, *Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben*
 EN 1999, *Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumbauten*

Die EN-Eurocodes berücksichtigen die Verantwortlichkeit der Bauaufsichtsorgane in den Mitgliedsländern und haben deren Recht zur nationalen Festlegung sicherheitsbezogener Werte berücksichtigt, so dass diese Werte von Land zu Land unterschiedlich bleiben können.

Status und Gültigkeitsbereich der Eurocodes

Die Mitgliedsländer der EU und EFTA betrachten die Eurocodes als Bezugsdokumente für folgende Zwecke:

- als Mittel zum Nachweis der Übereinstimmung der Hoch- und Ingenieurbauten mit den wesentlichen Anforderungen der Richtlinie 89/106/EWG, besonders mit der wesentlichen Anforderung Nr 1: Mechanische Festigkeit und Standsicherheit und der wesentlichen Anforderung Nr 2: Brandschutz;
- als Grundlage für die Spezifizierung von Verträgen für die Ausführung von Bauwerken und dazu erforderlichen Ingenieurleistungen;
- als Rahmenbedingung für die Erstellung harmonisierter Technischer Spezifikationen für Bauprodukte (ENs und ETAs).

Die Eurocodes haben, soweit sie sich auf die Bauwerke selbst beziehen, eine direkte Verbindung zu den Grundlagendokumenten²⁾, auf die in Artikel 12 der Bauproduktenrichtlinie hingewiesen wird, wenn sie auch anderer Art sind als die harmonisierten Produktnormen³⁾. Daher sind technische Gesichtspunkte, die sich aus den Eurocodes ergeben, von den Technischen Komitees des CEN und/oder den Arbeitsgruppen von EOTA, die an Produktnormen arbeiten, zu beachten, damit diese Technischen Spezifikationen mit den Eurocodes vollständig kompatibel sind.

Die Eurocodes liefern Regelungen für den Entwurf, die Berechnung und die Bemessung von kompletten Tragwerken und Bauteilen, die sich für die tägliche Anwendung eignen. Sie gehen auf traditionelle Bauweisen und Aspekte innovativer Anwendungen ein, liefern aber keine vollständigen Regelungen für ungewöhnliche Baulösungen und Entwurfsbedingungen. Für diese Fälle können zusätzliche Spezialkenntnisse für den Bauplaner erforderlich sein.

2) Nach Artikel 3.3 der Bauproduktenrichtlinie sind die wesentlichen Anforderungen in Grundlagendokumenten zu konkretisieren, um damit die notwendigen Verbindungen zwischen den wesentlichen Anforderungen und den Mandaten für die Erstellung harmonisierter Europäischer Normen und ETAGs/ETAs zu schaffen.

3) Nach Artikel 12 der Bauproduktenrichtlinie muss das Grundlagendokument:

- a) die wesentlichen Anforderungen konkretisieren, indem die Begriffe und die technischen Grundlagen harmonisiert und, falls erforderlich, für jede Anforderung Klassen oder Stufen angegeben werden;
- b) Verfahren zur Verbindung dieser Klassen oder Stufen mit den Technischen Spezifikationen angeben, z. B. Berechnungs- oder Prüfverfahren, Entwurfsregeln usw.;
- c) als Bezugsdokument für die Erstellung harmonisierter Normen und Richtlinien für Europäische Technische Zulassungen dienen.

Die Eurocodes spielen de facto eine ähnliche Rolle für die wesentliche Anforderung Nr 1 und einen Teil der wesentlichen Anforderung Nr 2.

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

Nationale Fassungen der Eurocodes

Die Nationale Fassung eines Eurocodes enthält den vollständigen Text des Eurocodes (einschließlich aller Anhänge), so wie von CEN veröffentlicht, möglicherweise mit einer nationalen Titelseite und einem nationalen Vorwort sowie einem Nationalen Anhang.

Der Nationale Anhang darf nur Angaben zu den Parametern enthalten, die im Eurocode für nationale Entscheidungen offen gelassen wurden; diese national festzulegenden Parameter (en: Nationally Determined Parameters; NDP) gelten für die Tragwerksplanung von Hoch- und Ingenieurbauten in dem Land, in dem sie erstellt werden. Dazu gehören:

- Zahlenwerte und/oder Klassen, wo die Eurocodes Alternativen eröffnen;
- zu verwendende Zahlenwerte, wo die Eurocodes nur Symbole angeben;
- landesspezifische Daten (geographische, klimatische usw.), z. B. Schneekarten;
- die Vorgehensweise, wenn die Eurocodes mehrere Verfahren zur Wahl anbieten.

Darüber hinaus kann er Folgendes enthalten:

- Vorschriften zur Verwendung der informativen Anhänge,
- Hinweise zur Anwendung der Eurocodes, soweit diese die Eurocodes ergänzen und ihnen nicht widersprechen.

Verbindungen zwischen den Eurocodes und den harmonisierten Technischen Spezifikationen für Bauprodukte (ENs und ETAs)

Es besteht die Notwendigkeit, dass die harmonisierten Technischen Spezifikationen für Bauprodukte und die technischen Regelungen für die Tragwerksplanung⁴⁾ konsistent sind. Insbesondere sollten alle Hinweise, die mit der CE-Kennzeichnung von Bauprodukten verbunden sind und die die Eurocodes in Bezug nehmen, klar erkennen lassen, welche national festzulegenden Parameter (NDP) zu Grunde liegen.

Zusätzliche Informationen zu EN 1993-4-1

EN 1993-4-1 enthält Hinweise für die Tragwerksplanung von Silos.

EN 1993-4-1 enthält Bemessungs- und Konstruktionsregeln, die die allgemeinen Regeln in den verschiedenen Teilen von EN 1993-1 ergänzen.

EN 1993-4-1 ist für die Anwendung durch Bauherren, Tragwerksplaner, Auftragnehmer und zuständige Behörden vorgesehen.

EN 1993-4-1 ist dazu vorgesehen, zusammen mit EN 1990, EN 1991-4 und den anderen Teilen von EN 1991, mit EN 1993-1-6 und EN 1993-4-2 und den anderen Teilen von EN 1993 sowie mit EN 1992 und den anderen Teilen von EN 1994 bis EN 1999 angewendet zu werden, so weit für die Bemessung und Konstruktion von Silos maßgeblich. Die in diesen Dokumenten bereits behandelten Aspekte werden nicht wiederholt.

Zahlenwerte für Teilsicherheitsbeiwerte und andere Zuverlässigkeitsparameter werden als Grundwerte empfohlen, die eine annehmbare Zuverlässigkeit sicherstellen. Sie gelten unter der Annahme angemessener handwerklicher Ausführung der Arbeiten und eines geeigneten Qualitätsmanagements.

4) Siehe Artikel 3.3 und Artikel 12 der Bauproduktenrichtlinie ebenso wie die Abschnitte 4.2, 4.3.1, 4.3.2 und 5.2 des Grundlagendokuments Nr 1.

Sicherheitsbeiwerte für Silos, die ‚Bauprodukte‘ sind (Werksfertigung), dürfen von den zuständigen Behörden festgelegt werden. Bei Anwendung auf Silos, die ‚Bauprodukte‘ sind, sind die in AC 2.9 AC angegebenen Beiwerte nur Richtwerte. Ihre Angabe dient der Darstellung des geeigneten Niveaus, das für eine mit anderen Bemessungen verträgliche Zuverlässigkeit benötigt wird.

Nationaler Anhang zu EN 1993-4-1

Diese Norm enthält alternative Verfahren, Werte und Empfehlungen zusammen mit Hinweisen, an welchen Stellen möglicherweise nationale Festlegungen getroffen werden müssen. Daher sollte die jeweilige nationale Ausgabe von EN 1993-4-1 einen Nationalen Anhang mit allen national festzulegenden Parametern enthalten, die für die Bemessung und Konstruktion von Hoch- und Ingenieurbauten, die in dem Ausgabeland gebaut werden sollen, erforderlich sind.

Nationale Festlegungen sind in den folgenden Abschnitten von EN 1993-4-1 vorgesehen:

- | | |
|---|---------------------------|
| — 2.2 (1); | — 5.5.2 (3); |
| — 2.2 (3); | — 5.6.2 (1) und (2); |
| — 2.9.2.2 (3); | — 6.1.2 (4); |
| — 3.4 (1); | — 6.3.2.3 (2) und (4); |
| — 4.1.4 (2) und (4); | — 6.3.2.7 (3); |
| — 4.2.2.3 (6); | — 7.3.1 (4); |
| — 4.3.1 (6) und (8); | — 8.3.3 (4); |
| — 5.3.2.3 (3); | — 8.4.1 (6); |
| — 5.3.2.4 (10), (12) und (15); | — 8.4.2 (5); |
| — 5.3.2.5 (10) und (14); | — 8.5.3 (3); |
| — 5.3.2.6 (3) und (6); | — 9.5.1 (3) und (4); |
| — 5.3.2.8 (2); | — 9.5.2 (5); |
| — 5.3.3.5 (1) und (2); | — 9.8.2 (1) und (2); |
| — 5.3.4.3.2 (2); | — A.2 (1) und (2); |
| — 5.3.4.3.3 (2) und (5); | — A.3.2.1 (6); |
| — 5.3.4.3.4 (5); | — A.3.2.2 (6); |
| — 5.3.4.5 (3); | — A.3.2.3 (2); |
| — AC 5.4.4(2), (3)b) und (3)c) AC ; | — A.3.3 (1), (2) und (3); |
| — 5.4.7 (3); | — A.3.4 (4). |

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

1 Allgemeines

1.1 Anwendungsbereich

- (1) Der vorliegende Teil 4-1 des Eurocodes 3 enthält Grundsätze und Anwendungsregeln für die Tragwerksplanung von freistehenden oder unterstützten Stahlsilos mit kreisrundem oder rechteckigem Grundriss.
- (2) Die in diesem Teil enthaltenen Bestimmungen ergänzen, ändern oder ersetzen die entsprechenden der in EN 1993-1 enthaltenen Bestimmungen.
- (3) Dieser Teil behandelt nur die Anforderungen an Tragwiderstand und Stabilität von Stahlsilos. Zu sonstigen Anforderungen (z. B. an die Betriebssicherheit, Funktionstüchtigkeit, Herstellung und Montage, Qualitätskontrolle, Details wie Mannlöcher, Stützen, Füllrichtungen, Austragsöffnungen, Feeder usw.) siehe die einschlägigen Normen.
- (4) Bestimmungen für die speziellen Anforderungen der Bemessung gegen Erdbeben sind in EN 1998-4 enthalten, wo die Bestimmungen von Eurocode 3 spezifisch für diesen Zweck ergänzt oder angepasst werden.
- (5) Die Bemessung von Unterstützungskonstruktionen für Silos wird in EN 1993-1-1 behandelt. Zur Unterstützungskonstruktion gehören alle Bauteile unterhalb des Unterflansches des untersten Siloringes, siehe Bild 1.1.
- (6) Stahlbetonfundamente für Stahlsilos werden in EN 1992 und EN 1997 behandelt.
- (7) Zahlenwerte der spezifischen Einwirkungen, die bei der Bemessung von Stahlsilos zu berücksichtigen sind, werden in EN 1991-4, *Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter* angegeben.
- (8) Der vorliegende Teil 4-1 gilt nicht für:
 - Feuerwiderstand (Brandschutz);
 - Silos mit inneren Unterteilungen und Innenkonstruktionen;
 - Silos mit weniger als \boxed{AC} 100 kN (10 Tonnen) \boxed{AC} Speicherkapazität;
 - Fälle, in denen spezielle Maßnahmen zur Begrenzung von Schadensfolgen erforderlich sind.
- (9) In den Abschnitten dieser Norm, die für kreisrunde Silos gelten, ist die geometrische Form zwar auf rotationssymmetrische Tragwerke beschränkt, diese können jedoch unsymmetrischen Einwirkungen ausgesetzt und unsymmetrisch aufgelagert sein.

1.2 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).

EN 1090, *Ausführung von Tragwerken aus Stahl*

EN 1990, *Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung*

EN 1991, *Eurocode 1 — Einwirkungen auf Tragwerke*

EN 1991-1, *Eurocode 1 — Einwirkungen auf Tragwerke — Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke — Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau*

EN 1991-1-2, *Eurocode 1 — Einwirkungen auf Tragwerke — Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen — Brandeinwirkungen auf Tragwerke*

EN 1991-1-3, *Eurocode 1 — Einwirkungen auf Tragwerke — Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen —*

Schneelasten

- EN 1991-1-4, Eurocode 1 — Einwirkungen auf Tragwerke — Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen — Windlasten
- EN 1991-1-5, Eurocode 1 — Einwirkungen auf Tragwerke — Teil 1-5: Allgemeine Einwirkungen — Temperatureinwirkungen
- EN 1991-1-6, Eurocode 1 — Einwirkungen auf Tragwerke — Teil 1-6: Allgemeine Einwirkungen — Einwirkungen während der Bauausführung
- EN 1991-1-7, Eurocode 1 — Einwirkungen auf Tragwerke — Teil 1-7: Allgemeine Einwirkungen — Außergewöhnliche Einwirkungen
- EN 1991-4, Eurocode 1 — Einwirkungen auf Tragwerke — Teil 4: Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter
- EN 1993-1-1, Eurocode 3 — Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau
- EN 1993-1-3, Eurocode 3 — Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-3: Allgemeine Bemessungsregeln — Ergänzende Regeln für kaltgeformte dünnwandige Bauteile und Bleche
- EN 1993-1-4, Eurocode 3 — Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-4: Allgemeine Bemessungsregeln — Ergänzende Regeln zur Anwendung von nicht rostenden Stählen
- EN 1993-1-6, Eurocode 3 — Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-6: Tragfähigkeit und Stabilität von Schalen
- EN 1993-1-7, Eurocode 3 — Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-7: Allgemeine Bemessungsregeln — Ergänzende Regeln zu ebenen Blechfeldern mit Querbelastung
- EN 1993-1-8, Eurocode 3 — Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen
- EN 1993-1-9, Eurocode 3 — Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-9: Ermüdung
- EN 1993-1-10, Eurocode 3 — Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-10: Stahlsortenauswahl im Hinblick auf Bruchzähigkeit und Eigenschaften in Dickenrichtung
- EN 1993-4-2, Eurocode 3 — Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 4-2: Silos, Tankbauwerke und Rohrleitungen
- EN 1997, Eurocode 7 — Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik
- EN 1998, Eurocode 8 — Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben
- EN 1998-4, Eurocode 8 — Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben — Teil 4: Silos, Tankbauwerke und Rohrleitungen
- EN 10025, Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen — Technische Lieferbedingungen
- AC EN 10149 AC, Warmgewalzte Flacherzeugnisse aus Stählen mit hoher Streckgrenze zum Kaltumformen
- ISO 1000, SI units
- ISO 3898, Bases for design of structures — Notation — General symbols
- ISO 4997, Cold reduced steel sheet of structural quality
- ISO 8930, General principles on reliability for structures — List of equivalent terms

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

1.3 Annahmen

- (1) Zusätzlich zu den allgemeinen Annahmen von EN 1990 gilt die folgende Annahme:
- Herstellung und Montage erfolgen nach EN 1090-2.

1.4 Unterscheidung zwischen Grundsätzen und Anwendungsregeln

Siehe EN 1990, 1.4.

1.5 Begriffe

(1) Falls nichts anderes angegeben ist, gelten die in EN 1990, 1.5 für den allgemeinen Gebrauch in den Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau definierten Begriffe und die Begriffe von ISO 8930 auch für diesen Teil 4-1 von EN 1993; ergänzend werden für diesen Teil 4-1 jedoch folgende Begriffe festgelegt:

1.5.1 Schale. Ein Tragwerk, das aus einer gekrümmten dünnen Wandung besteht.

1.5.2 Rotationsschale. Eine Schale, deren Geometrie durch die Rotation eines Meridians um eine zentrale Achse definiert ist.

1.5.3 Kasten. Ein durch den Zusammenbau ebener Bleche zu einer dreidimensionalen geschlossenen Form gebildetes Tragwerk. Ein Kasten im Sinne dieser Norm hat im Allgemeinen in allen Richtungen Abmessungen von gleicher Größenordnung.

1.5.4 Meridianrichtung. Die Tangente an die Silowand in jedem Punkt einer vertikalen Ebene. Sie ändert sich mit dem jeweils betrachteten Tragwerksteil. Alternativ ist es die vertikale oder geneigte Richtung auf der Oberfläche des Tragwerkes, der ein Regentropfen auf dieser Oberfläche folgen würde.

1.5.5 Umfangsrichtung. Die horizontale Tangente an die Silowand in jedem Punkt. Sie ändert sich längs des Siloumfangs, liegt in einer horizontalen Ebene und ist tangential zur Silowand, unabhängig davon, ob der Silo im Grundriss kreisrund oder rechteckig ist.

1.5.6 Mittelfläche. Dieser Ausdruck bezeichnet sowohl die spannungsfreie Mittelfläche einer Schale unter reiner Biegung als auch die Mittelfläche eines ebenen Bleches, das Teil eines Kastens ist.

1.5.7 Steifenabstand. Der Achsabstand zweier benachbarter paralleler Steifen.

Ergänzend zu Teil 1 von EN 1993 (und Teil 4 von EN 1991) gelten für die Anwendung dieses Teils 4-1 die folgenden Begriffe, siehe Bild 1.1:

1.5.8 Silo: Ein Silo ist ein Behälter zur Speicherung körniger Feststoffpartikel. In dieser Norm wird davon ausgegangen, dass er eine vertikale Form hat, in die das Schüttgut mittels Schwerkraft am oberen Ende eingefüllt wird. Die Bezeichnung ‚Silo‘ schließt alle Tragwerksformen zur Speicherung von Schüttgut ein, auch wenn sie zum Teil eigenständige Bezeichnungen haben, z. B. Behälter, Trichter, Getreidetank oder Bunker.

1.5.9 Schaft: Der Siloschaft ist der mit vertikalen Wänden versehene Teil eines Silos.

1.5.10 Trichter: Ein Trichter ist ein zum Siloboden zusammenlaufender Siloabschnitt. Er wird angeordnet, um das Schüttgut zu einem Schwerkraftauslass zu leiten.

1.5.11 Knotenlinie: An einer Knotenlinie treffen zwei oder mehr Schalenabschnitte oder ebene Kastenwände zusammen. Sie kann auch eine Steife einschließen: Die Anschlusslinie einer Ringsteife an eine Schale oder einen Kasten kann als eine Knotenlinie betrachtet werden.

1.5.12 Abzweigung: Die spezielle Knotenlinie zwischen Siloschaft und Trichter wird Abzweigung genannt. Die Abzweigung kann sich im unteren Bereich des Schaftes oder an seinem unteren Rand befinden.

1.5.13 Zarge (Standzarge): Die Zarge ist der Teil des Siloschaftes, der unterhalb der Abzweigung liegt: Er unterscheidet sich vom oberen Teil dadurch, dass er keinen Kontakt zum Schüttgut hat.

1.5.14 Schuss: Ein Schuss ist eine horizontale Reihe von Stahlblechsegmenten, aus denen ein Höhenabschnitt des Siloschaftes gebildet wird.

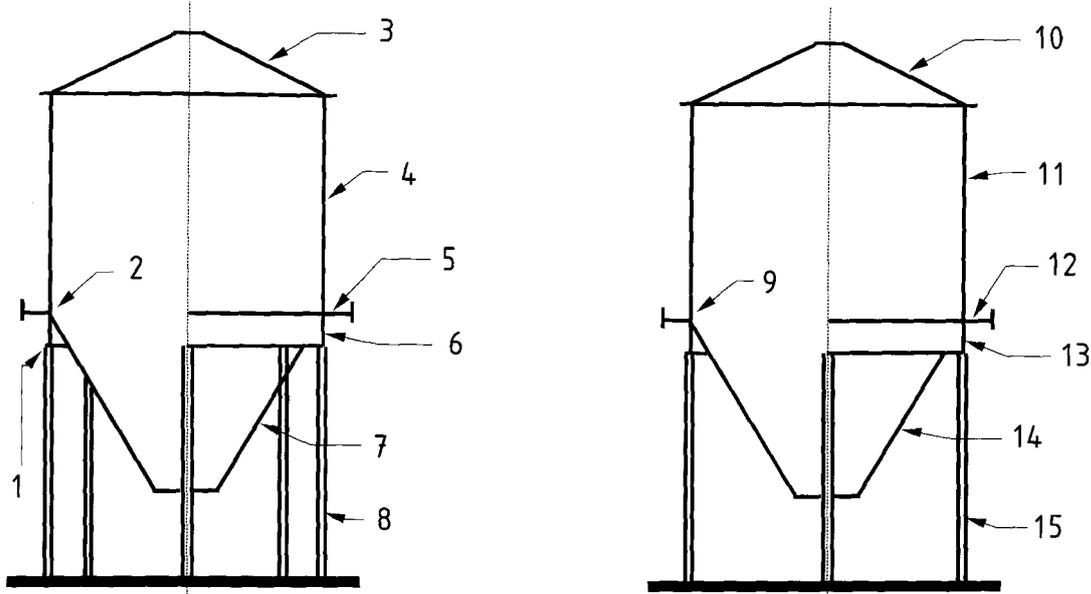
1.5.15 Längssteife: Eine Längssteife ist ein örtliches Versteifungsbauteil, das einem Schalenmeridian folgt, welcher eine Erzeugende der Rotationsschale darstellt. Eine Längssteife soll entweder die Stabilität verbessern oder bei der Einleitung örtlicher Lasten mitwirken oder Axiallasten tragen. Sie dient nicht primär dazu, die Biegetragfähigkeit für Querlasten zu erhöhen.

1.5.16 Rippe: Eine Rippe ist ein örtliches Bauteil, das eine primäre Biegelastabtragung längs eines Schalen- oder Plattenmeridians ermöglicht, welcher eine Erzeugende der Rotationsschale oder eine vertikale Steife an einem Kasten darstellt. Eine Rippe wird vorgesehen, um Querlasten mittels Biegung auf das Tragwerk zu verteilen.

1.5.17 Ringsteife: Eine Ringsteife ist ein örtliches Versteifungsbauteil, das an einem Punkt des Meridians längs des Tragwerkumfangs verläuft. Ihre Steifigkeit in der Meridianebene wird als vernachlässigbar angenommen. Eine Ringsteife soll entweder die Stabilität verbessern oder örtliche Lasten einleiten, sie ist kein Haupttragglied. Bei einer Rotationsschale ist sie kreisförmig, bei einem Kastentragwerk hat sie die rechteckige Form des Grundrisses.

1.5.18 Verschmierte Steifen: Steifen werden als verschmiert bezeichnet, wenn ihre Eigenschaften zusammen mit denen der Schalenwand als ein zusammenhängender Querschnitt behandelt werden, dessen Breite einem ganzen Vielfachen des Steifenabstandes entspricht. Die Schaleneigenschaften einer Wandung mit verschmierten Steifen sind orthotrop. Sie enthalten Exzentrizitätsterme, die eine Kopplung des Biege- und Membranverhaltens zur Folge haben.

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

**Legende**

- 1 Silo endet hier
- 2 Abzweigung
- 3 konisches Dach
- 4 Zylinderschale oder Siloschaft
- 5 Ringsteife
- 6 Zarge
- 7 konischer Trichter
- 8 Stütze: Unterstüzungskonstruktion

- 9 Abzweigung
- 10 pyramidisches Dach
- 11 rechteckiger Kasten
- 12 Ringsteife
- 13 Zarge
- 14 pyramidischer Trichter
- 15 Stütze: Unterstüzungskonstruktion

a) Silo mit kreisrundem Grundriss

b) Silo mit rechteckigem Grundriss

Bild 1.1 — Bezeichnungen für Silotragwerke

1.5.19 Basisring: Ein Basisring ist ein Bauteil, das der Umfangsline an der Basis des Tragwerkes folgt und die Möglichkeit bietet, das Tragwerk an das Fundament oder ein anderes Tragwerkselement anzuschließen. Er wird auch benötigt, um die angenommenen Randbedingungen praktisch sicherzustellen.

1.5.20 Ringträger oder Ringbalken: Ein Ringträger oder ein Ringbalken ist ein Versteifungsbauteil in Umfangsrichtung, das sowohl in der Ebene des kreisrunden oder rechteckigen Tragwerksquerschnittes als auch rechtwinklig dazu biegesteif und biegefest ist. Er ist ein Haupttragglied zur Verteilung örtlicher Lasten in die Schale oder den Kasten.

1.5.21 kontinuierlich aufgelagert: Bei einem kontinuierlich aufgelagerten Silo sind alle Stellen längs des Umfangs in gleicher Weise unterstützt. Kleine Abweichungen von dieser Bedingung (z. B. eine kleine Öffnung) beeinflussen die Anwendbarkeit dieser Definition nicht.

1.5.22 Diskretes Auflager: An einem diskreten Auflager ist der Silo durch eine örtliche Konsole oder Stütze unterstützt, mit einer begrenzten Anzahl schmaler Lagerungen längs des Siloumfangs. Üblicherweise werden vier oder sechs diskrete Auflager verwendet, jedoch kommen auch drei oder mehr als sechs vor.

1.5.23 Pyramidischer Trichter: Ein pyramidischer Trichter wird für einen kastenförmigen Silo mit rechteckigem Grundriss benötigt; er hat die Form einer umgedrehten Pyramide. Seine Geometrie wird in dieser Norm als einfach aus vier ebenen trapezförmigen Wänden gebildet angenommen.

1.6 In Teil 4-1 von Eurocode 3 verwendete Symbole

Grundlage der verwendeten Symbole ist ISO 3898:1987.

1.6.1 Lateinische Großbuchstaben

- A* Querschnittsfläche;
- C* Membrandehnsteifigkeit;
- C* Beulkoeffizient;
- D* Biegesteifigkeit;
- E* Elastizitätsmodul;
- F* Kraft;
- G* Schubmodul;
- H* Höhe des Tragwerks;
- I* Flächenmoment 2. Grades (Trägheitsmoment);
- I_t* Torsionsträgheitsmoment (Saint Venant'sche Torsion);
- K* Federsteifigkeit eines Wandbleches für Knicken von Längssteifen;
- L* Höhe eines Schalensegmentes oder einer Steife;
- M* Biegemoment;
- N* Axialkraft;
- Q* Parameter für die Herstelltoleranz-Qualitätsklasse einer beulgefährdeten Schale;
- R_φ* örtlicher Radius an den Kuppen (Wellenberg bzw. -tal) eines Profilbleches (Wellbleches).

1.6.2 Lateinische Kleinbuchstaben

- a* Koeffizient;
- b* Breite einer Platte oder einer Steife;
- d* Bruttoprofilhöhe eines Profilbleches (Wellbleches);
- e* Exzentrizität einer Kraft oder einer Steife;
- f_y* Streckgrenze des Stahls;
- f_u* Zugfestigkeit des Stahls;
- h* Flanschabstand eines Ringträgers;
- j* Faktor für die Verbindungswirksamkeit von geschweißten Überlappstößen, die mit Hilfe der Membranspannung beurteilt werden;
- j* Ersatz-Harmonische eines veränderlichen Spannungsverlaufs;
- ℓ* mittragende Länge einer Schale bei der linearen Spannungsberechnung;
- ℓ* Wellenlänge der Profilierung in Profilblechen;
- ℓ* Halbwellenlänge einer potenziellen Beule (bei der Berechnung zu berücksichtigende Höhe);
- m* Biegemoment je Längeneinheit;
- m_x* Meridianbiegemoment je Umfangslängeneinheit;
- m_y* Umfangsbiegemoment je Meridianlängeneinheit eines Kastens;

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

- m_θ Umfangsbiegemoment je Meridianlängeneinheit einer Schale;
- m_{xy} Drillmoment je Längeneinheit eines Kastens;
- $m_{x\theta}$ Drillmoment je Längeneinheit einer Schale;
- n Membrankraft;
- n Anzahl von diskreten Auflagerungen am Siloumfang;
- n_x Membrannormalkraft in Meridianrichtung je Umfangslängeneinheit;
- n_y Membrannormalkraft in Umfangsrichtung je Meridianlängeneinheit eines Kastens;
- n_θ Membrannormalkraft in Umfangsrichtung je Meridianlängeneinheit einer Schale;
- n_{xy} Membranschubkraft je Längeneinheit eines Kastens;
- $n_{x\theta}$ Membranschubkraft je Längeneinheit einer Schale;
- p flächenhaft verteilte Belastung (Druck);
- p_n Druck rechtwinklig zur Schalenmittelfläche (nach außen gerichtet);
- p_x Flächenlast tangential zur Schalenmittelfläche in Meridianrichtung (abwärts gerichtet);
- p_θ Flächenlast tangential zur Schalenmittelfläche in Umfangsrichtung (im Gegenuhrzeigersinn);
- q Querbeltung auf einem Zuganker in einem Kastensilo (Linienlast je Längeneinheit);
- r Radialkoordinate in einem Silo mit kreisrundem Grundriss;
- r Radius der Schalenmittelfläche;
- s Steifenabstand in Umfangsrichtung;
- t Wanddicke;
- t_x, t_y Ersatzwanddicke eines Profilbleches für die Dehnung in x - bzw. y -Richtung;
- w Imperfektionsamplitude;
- w radiale Durchbiegung;
- x örtliche Meridiankoordinate;
- y örtliche Umfangskoordinate;
- z globale Axialkoordinate;
- z Koordinate längs der vertikalen Achse einer Rotationsschale.

1.6.3 Griechische Buchstaben

- α Faktor für elastische Imperfektionsabminderung beim Beulsicherheitsnachweis (elastischer Imperfektions-Abminderungsfaktor);
- α Wärmedehnungskoeffizient;
- β halber Kegelöffnungswinkel eines konischen Trichters;
- γ_F Teilsicherheitsbeiwert für die Einwirkungen;
- γ_M Teilsicherheitsbeiwert für den Widerstand;
- δ Grenzwert für die Durchbiegung;
- Δ Inkrement;
- χ Abminderungsfaktor für Biegeknicken;

χ	Abminderungsfaktor für Schalenbeulen;
λ	Halbwellenlänge für Schalenbiegung;
$\bar{\lambda}$	bezogener Schlankheitsgrad einer Schale;
μ	Wandreibungskoeffizient;
ν	Querkontraktionszahl (Poissonzahl);
θ	Umfangskoordinate einer Schale;
σ	Normalspannung;
σ_{bx}	Meridianbiegespannung;
σ_{by}	Umfangsbiegespannung in einem Kasten;
$\sigma_{b\theta}$	Umfangsbiegespannung in einer Schale;
τ_{bxy}	Drillschubspannung in einem Kasten;
$\tau_{bx\theta}$	Drillschubspannung in einer Schale;
σ_{mx}	Meridianmembranspannung;
σ_{my}	Umfangsmembranspannung in einem Kasten;
$\sigma_{m\theta}$	Umfangsmembranspannung in einer Schale;
τ_{mxy}	Schubmembranspannung in einem Kasten;
$\tau_{mx\theta}$	Schubmembranspannung in einer Schale;
σ_{sox}	Oberflächenspannung in Meridianrichtung (außen);
σ_{soy}	Oberflächenspannung in Umfangsrichtung (außen) in einem Kasten;
$\sigma_{so\theta}$	Oberflächenspannung in Umfangsrichtung (außen) in einer Schale;
τ_{soxy}	Oberflächenschubspannung in einem Kasten;
$\tau_{sox\theta}$	Oberflächenschubspannung in einer Schale;
τ	Schubspannung;
ω	dimensionsloser Parameter beim Beulsicherheitsnachweis;
ω	Neigung eines konischen Trichters mit nichtvertikaler Achse;
ψ	Parameter für die Ungleichmäßigkeit eines Spannungsverlaufes.

1.6.4 Indizes

E	Spannung oder Verschiebung (als Folge von Bemessungseinwirkungen);
F	Einwirkungen;
M	Werkstoff/Material;
R	Widerstand;
S	Schnittgröße (als Folge von Bemessungseinwirkungen);
b	Biegung;
c	Zylinder;
cr	idealer Beulwert;

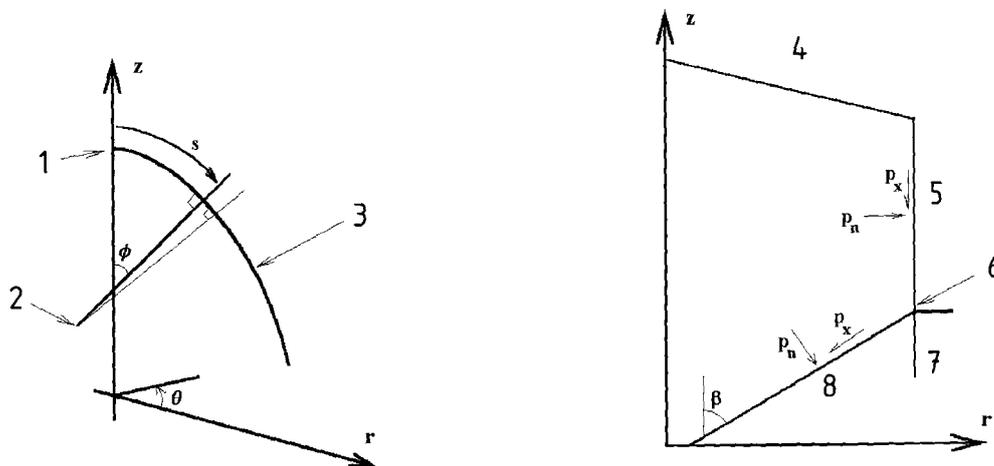
DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

- d Bemessungswert;
 eff effektiv;
 h Trichter;
 m Membran, Feldmitte;
 min kleinster zulässiger Wert;
 n rechtwinklig zur Wandung;
 p Druck;
 r radial;
 s Zarge, Auflagerung;
 s Oberflächenspannung (o – Außenseite, i – Innenseite);
 u Traglastwert;
 w parallel zur Wandung in Meridianrichtung (Wandreibung);
 x in Meridianrichtung;
 y in Umfangsrichtung (Kastentragwerk), Fließwert;
 z in Axialrichtung;
 θ in Umfangsrichtung (Rotationsschale).

1.7 Vorzeichenvereinbarungen

1.7.1 Vereinbarungen für das globale Koordinatensystem für kreisrunde Silos

(1) Die folgende Vorzeichenvereinbarung gilt für das gesamte Silotragwerk; sie berücksichtigt, dass der Silo kein ‚Bauteil‘ ist.



Legende

- | | |
|------------------------------------|--------------|
| 1 Pol | 5 Schaft |
| 2 Mittelpunkt der Meridiankrümmung | 6 Abzweigung |
| 3 Schalenmeridian | 7 Zarge |
| 4 Dach | 8 Trichter |

a) **AC** Globales Koordinatensystem **AC**

b) Silo-Schalenkoordinaten und Belastung: Schnitt

Bild 1.2 — Koordinatensysteme für ein kreisrundes Silo

(2) In der Regel werden für das globale Koordinatensystem des Silotragwerkes Zylinderkoordinaten wie folgt vereinbart (siehe Bild 1.2):

Koordinatensystem	
Koordinate längs der Achse einer Rotationsschale	z
Radialkoordinate	r
Umfangskoordinate	θ

(3) Die Vereinbarung für positive Vorzeichen lautet wie folgt:

Nach außen gerichtet positiv (Innendruck positiv, Verschiebungen nach außen positiv)
Zugspannungen positiv (ausgenommen Beulformeln, in denen Druck positiv ist)

(4) Die Vereinbarung für flächenhaft verteilte Einwirkungen auf die Silowand lautet wie folgt:

Druck rechtwinklig zur Schalenwand (nach außen gerichtet positiv)	p_n
Oberflächenlast in Meridianrichtung parallel zur Schalenwand (nach unten gerichtet positiv)	p_x
Oberflächenlast in Umfangsrichtung parallel zur Schalenwand (im Gegenuhrzeigersinn positiv)	p_θ

1.7.2 Vereinbarungen für das globale Koordinatensystem für rechteckige Silos

(1) Die folgende Vorzeichenvereinbarung gilt für das gesamte Silotragwerk; sie berücksichtigt, dass der Silo kein Bauteil ist.

(2) In der Regel werden für das globale Koordinatensystem des Silotragwerkes kartesische Koordinaten x, y, z vereinbart, wobei z die vertikale Richtung beschreibt, siehe Bild 1.3.

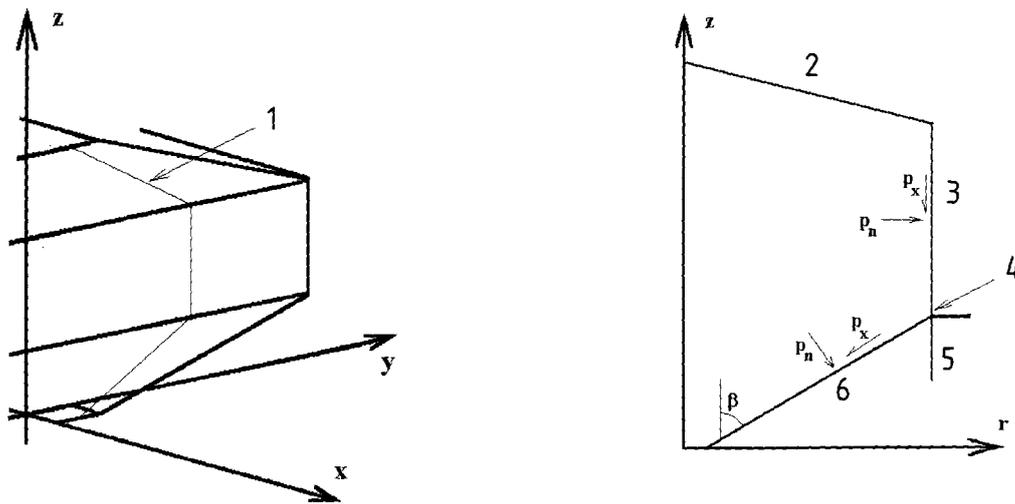
(3) Die Vereinbarung für positive Vorzeichen lautet wie folgt:

Nach außen gerichtet positiv (Innendruck positiv, Verschiebungen nach außen positiv)
Zugspannungen positiv (ausgenommen Beulformeln, in denen Druck positiv ist)

(4) Die Vereinbarung für flächenhaft verteilte Einwirkungen auf die Silowand lautet wie folgt:

Druck rechtwinklig zur Schalenwand (nach außen gerichtet positiv)	p_n
Oberflächenlast in Meridianrichtung parallel zur Kastenwand (nach unten gerichtet positiv)	p_x
Oberflächenlast in Umfangsrichtung in der Ebene des Kastenquerschnittes (im Gegenuhrzeigersinn positiv)	p_y

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

**Legende**

- | | |
|------------------|--------------|
| 1 Kastenmeridian | 4 Abzweigung |
| 2 Dach | 5 Zarge |
| 3 Schaft | 6 Trichter |

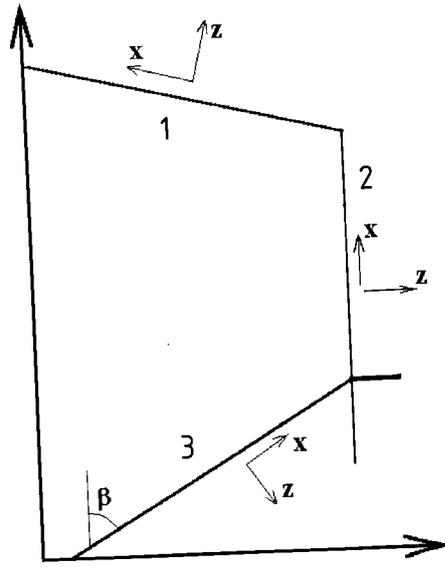
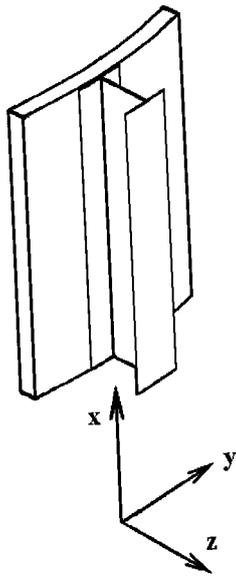
a) **AC** Globales Koordinatensystem **AC**b) Silo-Kastenkoordinaten und Belastung:
Schnitt**Bild 1.3 — Koordinatensysteme für ein rechteckiges Silo****1.7.3 Vereinbarungen für die Koordinaten von Bauteilen in kreisrunden und rechteckigen Silos**

(1) Die Vereinbarung für Bauteile, die an die Silowand angeschlossen sind (siehe Bilder 1.4 und 1.5), ist unterschiedlich, je nachdem, ob das Bauteil in Meridianrichtung oder in Umfangsrichtung verläuft.

(2) Für gerade Bauteile in Meridianrichtung an Schalen- oder Kastensilowänden (siehe Bild 1.4a) lautet die Vereinbarung:

Meridiankoordinate für Bauteile am Siloschaft, am Trichter und am Dach	x
Starke Querschnittsachse (parallel zu den Flanschen: Achse für Meridianbiegung)	y
Schwache Querschnittsachse (rechtwinklig zu den Flanschen)	z

ANMERKUNG Eine Längssteife, die in Übereinstimmung mit der Meridianbiegung des Zylinders biegebeansprucht wird (m_x), verbiegt sich um die y -Querschnittsachse der Steife.



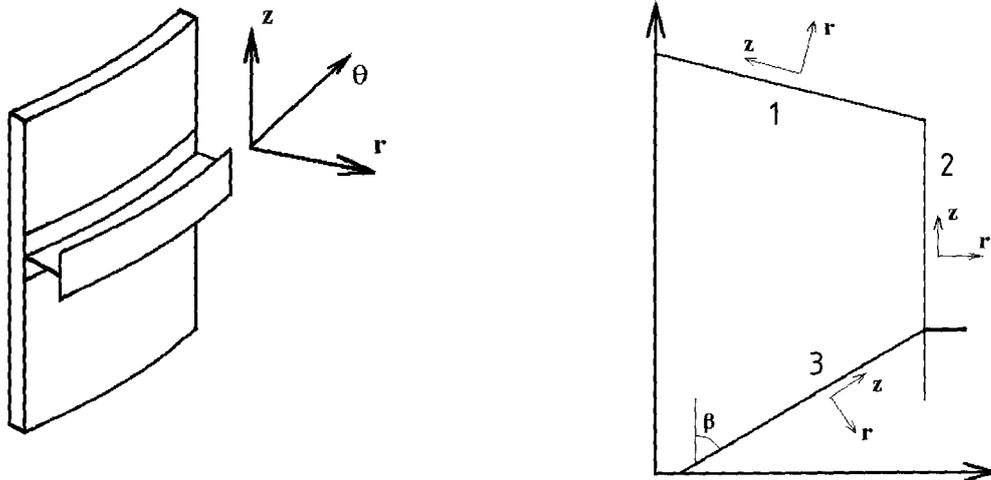
- Legende**
- 1 Dach
 - 2 Schaft
 - 3 Trichter

a) Steife und Biegeachsen

b) örtliche Achsen in verschiedenen Teilen

Bild 1.4 — Lokale Koordinatensysteme für Längssteifen an einer Schale oder an einem Kasten

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)



Legende

- 1 Dach
2 Schaft
3 Trichter

a) Steife und Biegeachsen

b) örtliche Achsen in verschiedenen Teilen

Bild 1.5 — Lokale Koordinatensysteme für Ringsteifen an einer Schale oder an einem Kasten

(3) Für gekrümmte Bauteile in Umfangsrichtung an einer Schalenwand (siehe Bild 1.5a) lautet die Vereinbarung:

Achse in Umfangsrichtung (gekrümmt)	θ
Radiale Querschnittsachse (für Biegung in der Vertikalebene)	r
Vertikale Querschnittsachse (für Umfangsbiegung)	z

ANMERKUNG Eine gekrümmte Ringsteife, die in Übereinstimmung mit der Umfangsbiegung des Zylinders biegebeansprucht wird (m_θ), verbiegt sich um ihre vertikale z -Querschnittsachse. Fungiert sie als Ringträger oder Ringbalken, oder ist sie radialen Kräften ausgesetzt, die exzentrisch zur Ringachse angreifen, so verbiegt sie sich um ihre radiale r -Querschnittsachse.

(4) Für gerade Bauteile in Umfangsrichtung an einer Kastenwand lautet die Vereinbarung:

Achse in Umfangsrichtung	x
Horizontale Querschnittsachse	y
Vertikale Querschnittsachse	z

ANMERKUNG Eine gerade Ringsteife, die aus der Ebene der Kastenwand heraus biegebeansprucht wird (was der Normalfall ist), verbiegt sich um ihre vertikale z -Querschnittsachse.

1.7.4 Vereinbarungen für Schnittgrößen in kreisrunden und rechteckigen Silos

(1) Die Vereinbarung für die Indizierung von Membrankräften lautet wie folgt:

Der Index beschreibt die Richtung, in der die Kraft Normalspannungen erzeugt.

Membrankräfte:

n_x	Membrankraft in Meridianrichtung
n_θ	Membrankraft in Umfangsrichtung bei Schalen
n_y	Membrankraft in Umfangsrichtung bei Kästen
n_{xy} oder $n_{x\theta}$	Membranschubkräfte

Membranspannungen:

σ_{mx}	Membranspannung in Meridianrichtung
$\sigma_{m\theta}$	Membranspannung in Umfangsrichtung bei Schalen
σ_{my}	Membranspannung in Umfangsrichtung bei Kästen
τ_{mxy} oder $\tau_{mx\theta}$	Membranschubspannungen

(2) Die Vereinbarung für die Indizierung von Momenten lautet wie folgt:

Der Index beschreibt die Richtung, in der das Moment Normalspannungen erzeugt.

ANMERKUNG Diese Vereinbarung für Platten und Schalen unterscheidet sich von derjenigen für Träger und Stäbe, wie sie in den Eurocode 3-Teilen 1-1 und 1-3 verwendet wird. Darauf ist bei Verwendung der Teile 1-1 und 1-3 in Verbindung mit diesen Regeln sorgfältig zu achten.

Biegemomente:

m_x	Biegemoment in Meridianrichtung je Längeneinheit
m_θ	Biegemoment in Umfangsrichtung je Längeneinheit bei Schalen
m_y	Biegemoment in Umfangsrichtung bei Kästen
m_{xy} oder $m_{x\theta}$	Drillmoment je Längeneinheit

Biegespannungen:

σ_{bx}	Biegespannung in Meridianrichtung
$\sigma_{b\theta}$	Biegespannung in Umfangsrichtung bei Schalen
σ_{by}	Biegespannung in Umfangsrichtung bei Kästen
τ_{bxy} oder $\tau_{bx\theta}$	Drillschubspannung

Innere und äußere Oberflächenspannungen:

$\sigma_{six}, \sigma_{sox}$	innere bzw. äußere Oberflächenspannung in Meridianrichtung bei Kästen und Schalen
$\sigma_{si\theta}, \sigma_{so\theta}$	innere bzw. äußere Oberflächenspannung in Umfangsrichtung bei Schalen
$\tau_{six\theta}, \tau_{sox\theta}$	innere bzw. äußere Oberflächenschubspannung bei Schalen
$\sigma_{siy}, \sigma_{soy}$	innere bzw. äußere Oberflächenspannung in Umfangsrichtung bei Kästen
τ_{sixy}, τ_{soxy}	innere bzw. äußere Oberflächenschubspannung bei Kästen

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

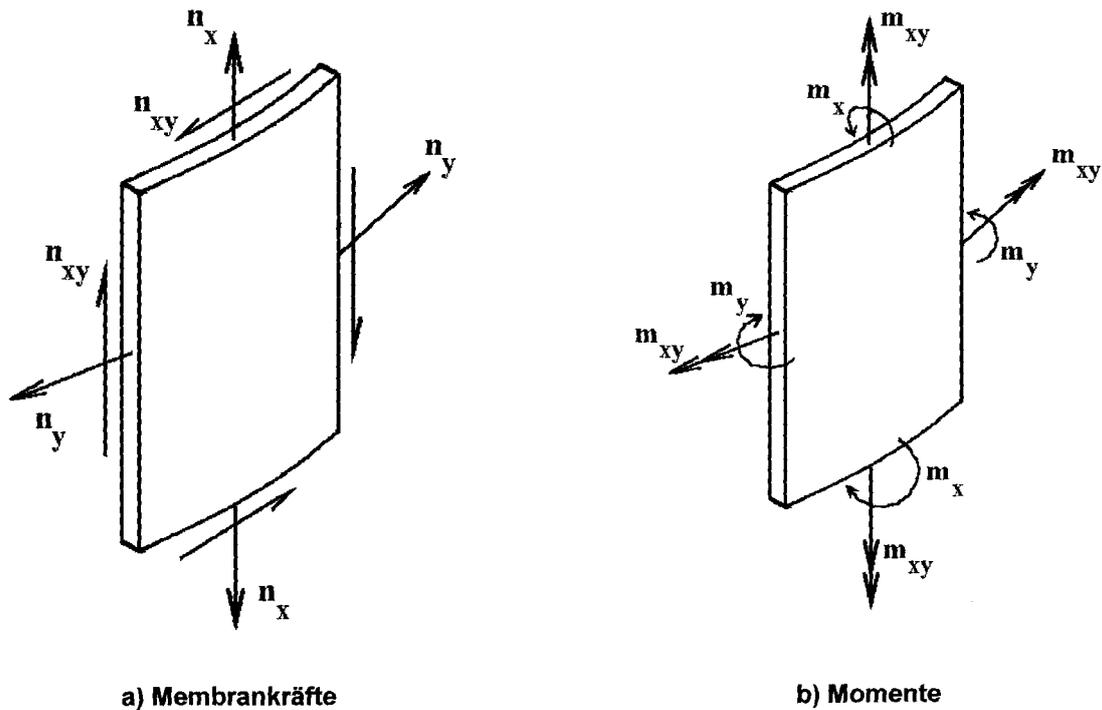


Bild 1.6 — Schnittgrößen in Schalen- und Kastensilowänden

1.8 Einheiten

(1)P SI-Einheiten sind in Übereinstimmung mit ISO 1000 zu verwenden.

(2) Für die Berechnungen werden folgende konsistente Einheiten empfohlen:

— Abmessungen und Dicken	:	m	mm
— spezifisches Gewicht (Wichte)	:	kN/m ³	N/mm ³
— Kräfte und Lasten	:	kN	N
— Linienkräfte und Linienlasten	:	kN/m	N/mm
— Drücke und Flächenlasten	:	kPa	MPa
— spezifische Masse (Dichte)	:	kg/m ³	kg/mm ³
— Beschleunigung	:	km/s ²	m/s ²
— Membrankräfte	:	kN/m	N/mm
— Biegemomente	:	kNm/m	Nmm/mm
— Spannungen und Elastizitätsmoduli	:	kPa	MPa (= N/mm ²)

2 Grundlagen der Bemessung

2.1 Anforderungen

(1)P Ein Silo ist so zu entwerfen, zu bemessen, zu konstruieren und zu unterhalten, dass die Anforderungen von EN 1990, Abschnitt 2 und die nachfolgend aufgeführten ergänzenden Anforderungen erfüllt werden.

(2) Das Silotragwerk sollte alle schalen- und plattenförmigen Tragwerksteile sowie Steifen, Rippen, Ringe und Anschlussteile einschließen.

(3) Die Unterstützungsstruktur sollte nicht als Teil des Silotragwerks angesehen werden. Die Grenze zwischen dem Silo und seiner Unterstüzung ist in Anlehnung an Bild 1.1 festzulegen. Analog dazu gelten andere Komponenten, die ihrerseits vom Silo unterstüzt werden, als dort beginnend, wo die Silowand oder das Anschlussteil endet.

(4) Silos sollten so entworfen und bemessen werden, dass sie erforderlichenfalls im Hinblick auf ihre vorge-sehene Verwendung schadenstolerant sind.

(5) Besondere Anforderungen für spezielle Anwendungen dürfen zwischen dem Tragwerksplaner, dem Bau-herrn und der zuständigen Behörde vereinbart werden.

2.2 Differenzierung der Zuverlässigkeit

(1) Zur Differenzierung der Zuverlässigkeit siehe EN 1990.

ANMERKUNG In den Nationalen Anhängen dürfen Schadensfolgeklassen für Silos in Abhängigkeit vom Standort, von der Art der Füllung und Belastung, der Art und Größe des Tragwerks und der Art des Betriebs festgelegt werden.

(2) In Abhängigkeit von der gewählten Schadensfolgeklasse, des Tragwerkssystems und der Anfälligkeit für verschiedene Versagensarten sollte bei der Bemessung von Silotragwerken nach unterschiedlichen Schärfe-niveaus differenziert werden.

(3) In dieser Norm kommen drei Schadensfolgeklassen zur Anwendung. Mit den Anforderungen dieser Klassen wird ein prinzipiell gleiches Risikoniveau der Tragwerke angestrebt, und es werden Kosten und Aufwand berücksichtigt, die bei den verschiedenen Tragwerken für eine Reduzierung der Versagenswahrscheinlichkeit erforderlich sind: Schadensfolgeklassen 1, 2 und 3.

ANMERKUNG 1 Der nationale Anhang kann Angaben über die Schadensfolgeklassen enthalten. Tabelle 2.1 enthält ein Beispiel für die Einteilung von zwei Parametern – Größenordnung und Art des Betriebs – in Schadensfolgeklassen, wenn alle anderen Parameter mittlere Folgen haben, siehe EN 1990, B.3.1.

Tabelle 2.1 — Schadensfolgeklassen in Abhängigkeit von Größenordnung und Betrieb

Schadensfolgeklasse	Bemessungssituationen
Schadensfolgeklasse 3	Bodengelagerte Silos oder Silos mit bis zum Boden reichender Standzarge, mit einer Speicherkapazität von mehr als W_{3a} Tonnen Diskret gelagerte Silos mit einer Speicherkapazität von mehr als W_{3b} Tonnen Silos mit einer Speicherkapazität von mehr als W_{3c} Tonnen, bei denen eine der folgenden Bemessungssituationen vorliegt: a) exzentrisches Entleeren b) örtliche Teilflächenbelastung c) unsymmetrisches Befüllen
Schadensfolgeklasse 2	Alle Silos, für die diese Norm gilt und die nicht in eine andere Klasse eingeordnet sind
Schadensfolgeklasse 1	Silos mit einer Speicherkapazität zwischen W_{1a} Tonnen ^a und W_{1b} Tonnen
^a Silos mit weniger als W_{1a} Tonnen Speicherkapazität sind nicht Gegenstand dieser Norm.	

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

Es werden folgende Grenzwerte für die Klassen empfohlen:

Grenzwert der Klasse	Empfohlener Wert (Tonnen)
W_{3a}	5 000
W_{3b}	1 000
W_{3c}	200
W_{1b}	100
W_{1a}	10

ANMERKUNG 2 Zur Einteilung in die Anforderungsklassen für Einwirkungen, siehe EN 1991-4.

(4) Es darf stets eine höhere Schadensfolgeklasse gewählt werden, als gefordert ist.

(5)P Die Wahl der niedrigsten Schadensfolgeklasse muss einvernehmlich zwischen Tragwerksplaner, Bauherrn und zuständiger Behörde erfolgen.

(6) Die Einordnung in Schadensfolgeklasse 3 aufgrund des Kriteriums ‚örtliche Teilflächenbelastung‘ bezieht sich auf Silolastfälle, die nach EN 1991-4 eine Teilflächenbelastung über weniger als den halben Siloumfang verursachen.

(7) Für Schadensfolgeklasse 1 dürfen vereinfachte Regeln angewendet werden.

ANMERKUNG Geeignete Regeln für Schadensfolgeklasse 1 sind in Anhang A angegeben.

2.3 Grenzzustände

(1) Für diesen Teil 4-1 gelten die in EN 1993-1-6 definierten Grenzzustände.

2.4 Einwirkungen und Umwelteinflüsse

2.4.1 Allgemeines

(1)PEs gelten die allgemeinen Anforderungen nach EN 1990, Abschnitt 4.

2.4.2 Windlast

(1) Windlasten, die für Silos in Einzel- und Gruppenaufstellung in EN 1991-1-4 nicht festgelegt sind, sollten in Form zusätzlicher Informationen vereinbart werden.

(2) Da diese großen leichten Konstruktionen empfindlich gegenüber der genauen Verteilung des Winddrucks auf der Wand sind, müssen die Basis-Winddaten in EN 1991-1-4 für die speziellen Bedürfnisse einzelner Konstruktionen durch zusätzliche Informationen vervollständigt werden. Das bezieht sich sowohl auf den Beulsicherheitsnachweis für den leeren Silo als auch auf den Nachweis der Verankerung auf dem Fundament.

ANMERKUNG Geeignete zusätzliche Informationen über Winddruckverteilungen werden in Anhang C gegeben.

2.4.3 Kombination von Schüttgutlasten mit anderen Einwirkungen

(1)P Es gelten die Teilsicherheitsbeiwerte für die Einwirkungen auf Silos nach 2.9.2.

2.5 Werkstoffeigenschaften

- (1) Es gelten die allgemeinen Anforderungen an Werkstoffeigenschaften nach EN 1993-1-1.
- (2) Darüber hinaus gelten die speziellen Eigenschaften der Werkstoffe für Silos, die in Abschnitt 3 dieses Teils 4-1 angegeben werden.

2.6 Abmessungen

- (1)P Es gelten die in EN 1990, Abschnitt 6 enthaltenen Angaben zu den Abmessungen.
- (2) Es gelten außerdem die zusätzlichen speziellen Angaben für Schalenträgerwerke in EN 1993-1-6.
- (3) Als Schalendicke ist in der Regel die Nennblechdicke einzusetzen. Bei feuerverzinktem Stahlblech nach EN 10149 (AC) ist das der Nennwert der Kerndicke, der sich als Differenz aus Nenn-Gesamtdicke und Zinkschichtdicke auf beiden Oberflächen ergibt.
- (4) Der Einfluss von Korrosion und Abrasion auf die Silowanddicke ist in der Regel nach 4.1.4 bei der Bemessung zu berücksichtigen.

2.7 Modellierung des Silos zur Berechnung der Beanspruchungen

- (1)P Es gelten die allgemeinen Anforderungen nach EN 1990, Abschnitt 7.
- (2) Außerdem gelten die speziellen Angaben für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis, die in den Abschnitten 4 bis 9 dieses Teils 4-1 für jeden Tragwerksteil gemacht werden.
- (3) Darüber hinaus gelten für den Tragsicherheitsnachweis die in den Abschnitten 4 bis 9 dieses Teils 4-1 und ausführlicher in EN 1993-1-6 und EN 1993-1-7 angegebenen speziellen Anforderungen.

2.8 Versuchsgestützte Bemessung

- (1) Es gelten die allgemeinen Anforderungen nach EN 1990, Anhang D.
- (2) Für Silos, die ‚Bauprodukte‘ sind (Werksfertigung) und die großmaßstäblichen Versuchen unterworfen werden, dürfen vereinfachte Kriterien für Bemessungszwecke verwendet werden.

2.9 Beanspruchungen für den Nachweis der Grenzzustände

2.9.1 Allgemeines

- (1)P Es gelten die allgemeinen Anforderungen nach EN 1990, Abschnitt 9.

2.9.2 Teilsicherheitsbeiwerte für Grenzzustände der Tragfähigkeit

2.9.2.1 Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungen auf Silos

- (1)P Für quasi-ständige, häufige und außergewöhnliche Bemessungssituationen gelten die Teilsicherheitsbeiwerte γ_F nach EN 1990 und EN 1991-4.

- (2) Teilsicherheitsbeiwerte für Silos, die ‚Bauprodukte‘ sind (Werksfertigung), dürfen von den zuständigen Behörden festgelegt werden.

ANMERKUNG Bei Anwendung auf Silos, die ‚Bauprodukte‘ sind, sind die Beiwerte in Absatz (1) nur Richtwerte. Ihre Angabe dient der Darstellung des geeigneten Niveaus, das für eine mit anderen Bemessungen verträgliche Zuverlässigkeit benötigt wird.

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

2.9.2.2 Teilsicherheitsbeiwerte für den Widerstand

- (1) Für die versuchsmäßige Ermittlung von Trageigenschaften gelten die Anforderungen und Verfahrensweisen nach EN 1990.
- (2) Der Ermüdungssicherheitsnachweis ist nach EN 1993-1-6, Abschnitt 9 zu führen.
- (3) Die Teilsicherheitsbeiwerte γ_{Mi} für verschiedene Grenzzustände sind Tabelle 2.2 zu entnehmen.

Tabelle 2.2 — Teilsicherheitsbeiwerte für den Widerstand

Widerstand gegen Versagensart	Relevantes γ
Widerstand einer geschweißten oder geschraubten Silowand gegen plastisches Versagen	γ_{M0}
Widerstand einer Silowand gegen Beulen	γ_{M1}
Widerstand einer geschweißten oder geschraubten Silowand gegen Zugbruch	γ_{M2}
Widerstand einer Silowand gegen zyklisches Plastizieren	γ_{M4}
Widerstand von Verbindungen	γ_{M5}
Widerstand einer Silowand gegen Ermüdung	γ_{M6}

ANMERKUNG Die Teilsicherheitsbeiwerte γ_{Mi} für Silos dürfen im Nationalen Anhang festgelegt werden. Zu den Werten für γ_{M5} enthält EN 1993-1-8 weitere Angaben. Zu den Werten für γ_{M6} enthält EN 1993-1-9 weitere Angaben. Für Silos werden die folgenden Zahlenwerte empfohlen:

$\gamma_{M0} = 1,00$	$\gamma_{M1} = 1,10$	$\gamma_{M2} = 1,25$
$\gamma_{M4} = 1,00$	$\gamma_{M5} = 1,25$	$\gamma_{M6} = 1,10$

Für die weitere Differenzierung siehe 2.2 (1) und 2.2 (3).

2.9.3 Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit

- (1) Wenn in den entsprechenden Abschnitten vereinfachte Regeln zum Erreichen ausreichender Gebrauchstauglichkeit gegeben werden, brauchen keine detaillierten Berechnungen mit Einwirkungskombinationen durchgeführt werden.

2.10 Dauerhaftigkeit

- (1) Es gelten die allgemeinen Anforderungen nach EN 1990, Abschnitt 2.6.

2.11 Feuerwiderstand

- (1) Es gelten die Bestimmungen für Feuerwiderstand in EN 1993-1-2.

3 Werkstoffeigenschaften

3.1 Allgemeines

- (1) Für Silos sollten nur schweißgeeignete Stähle eingesetzt werden, um bei Bedarf nachträgliche Änderungen zu ermöglichen.
- (2) Für kreisrunde Silos sollten nur Stähle eingesetzt werden, die für das Kaltumformen zu gekrümmten Wandsegmenten oder zu gekrümmten Bauteilen geeignet sind.
- (3) Die in diesem Abschnitt angegebenen Werkstoffeigenschaften (siehe EN 1993-1-1, Tabelle 3.1 und EN 1993-1-3, Tabelle 3.1b) sollten als Nennwerte betrachtet werden, die bei der Bemessung als charakteristische Werte in die Berechnung einzuführen sind.
- (4) Weitere Werkstoffeigenschaften sind in den in EN 1993-1-1 angegebenen einschlägigen Bezugsnormen zu finden.
- (5) Falls der Silo mit heißen Schüttgütern gefüllt werden kann, sollten die Werte der Werkstoffeigenschaften entsprechend den zu erwartenden Höchsttemperaturen reduziert werden.
- (6) Falls höhere Temperaturen als 100 °C zu erwarten sind, sollten die Werkstoffeigenschaften EN 13084-7 entnommen werden.

3.2 Baustähle

- (1) Die in diesem Teil 4-1 von EN 1993 angegebenen rechnerischen Bemessungsmethoden gelten für Baustähle nach EN 1993-1-1, die mit den in Tabelle 3.1 aufgelisteten Europäischen und Internationalen Normen übereinstimmen.
- (2) Die mechanischen Eigenschaften von Baustählen nach EN 10025 oder EN 10149 sollten EN 1993-1-1, EN 1993-1-3 und EN 1993-1-4 entnommen werden.
- (3) Korrosions- und Abrasionszuschläge sind in Abschnitt 4 dieses Teils 4-1 angegeben.
- (4) In der Regel darf angenommen werden, dass die Stahleigenschaften für Zugbeanspruchung dieselben sind wie für Druckbeanspruchung.
- (5) Für die durch diesen Teil 4-1 von EN 1993 abgedeckten Stähle sollten die Bemessungswerte des Elastizitätsmoduls mit $E = 210\,000$ MPa und der Querkontraktionszahl (Poissonzahl) mit $\nu = 0,30$ angesetzt werden.

3.3 Nichtrostende Stähle

- (1) Die mechanischen Eigenschaften von nichtrostenden Stählen sollten EN 1993-1-4 entnommen werden.
- (2) Hinweise zur Auswahl von im Hinblick auf die Korrosions- und Abrasionseinflüsse des Schüttgutes geeigneten nichtrostenden Stählen dürfen den einschlägigen Quellen entnommen werden.
- (3) Falls die Bemessung Beulberechnungen umfasst, sollten entsprechend reduzierte Werte der mechanischen Eigenschaften angesetzt werden (siehe EN 1993-1-6).

3.4 Spezielle legierte Stähle

- (1) Für nicht genormte legierte Stähle sollten geeignete Werte für die maßgebenden mechanischen Eigenschaften festgelegt werden.

ANMERKUNG Der Nationale Anhang kann Angaben zu den geeigneten Werten enthalten.

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

(2) Hinweise zur Auswahl von im Hinblick auf die Korrosions- und Abrasionseinflüsse des Schüttgutes geeigneten speziellen legierten Stählen sollten einschlägigen Quellen entnommen werden.

(3) Falls die Bemessung Beulberechnungen umfasst, sollten entsprechend reduzierte Werte der mechanischen Eigenschaften angesetzt werden (siehe EN 1993-1-6).

3.5 Anforderungen an die Zähigkeit

(1) Die Anforderungen an die Zähigkeit der Stähle sollten nach EN 1993-1-10 ermittelt werden.

4 Grundlagen für die statische Berechnung

4.1 Grenzzustände der Tragfähigkeit

4.1.1 Basis

(1) Stählerne Tragwerke und Tragwerksteile sollten so dimensioniert werden, dass die grundlegenden Anforderungen an die Bemessung nach Abschnitt 2 erfüllt sind.

4.1.2 Zu führende Nachweise

(1)P Die Bemessung muss für jeden in Frage kommenden Grenzzustand die folgende Bedingung erfüllen:

$$S_d < R_d \quad (4.1)$$

Dabei sind S und R die jeweils relevanten Parameter.

4.1.3 Ermüdung und zyklisches Plastizieren — Kurzzeitermüdung

(1) Teile des Tragwerks, die größeren örtlichen Biegebeanspruchungen unterworfen sind, sollten bei Bedarf gegen auf die Grenzzustände ‚Ermüdung‘ und ‚Zyklisches Plastizieren‘ nach EN 1993-1-6 bzw. EN 1993-1-7 nachgewiesen werden.

(2) Für Silos der Schadensfolgeklasse 1 entfallen die Nachweise nach (1).

4.1.4 Berücksichtigung von Korrosion und Abrasion

(1) Bei der Festlegung der effektiven Wanddicke für die Berechnung sollten die Abrasionseffekte des Schüttgutes an der Silowandung über die Lebensdauer des Tragwerks berücksichtigt werden.

(2) Sind keine spezifischen Informationen vorhanden, sollte für alle Bereiche, die Kontakt mit rutschendem Schüttgut haben, ein Wanddickenverlust von Δt_a infolge Abrasion angenommen werden.

ANMERKUNG Der Wert von Δt_a darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es wird ein Wert von $\Delta t_a = 2$ mm empfohlen.

(3) Bei der Festlegung der effektiven Wanddicke für die Berechnungen sollten die Korrosionseffekte des Schüttgutes im Kontakt mit der Silowandung berücksichtigt werden.

(4) Dem vorgesehenen Verwendungszweck entsprechende spezielle Werte für die Korrosions- und Abrasionsverluste sollten zwischen dem Tragwerksplaner, dem Bauherrn und der zuständigen Behörde vereinbart werden; dabei sind der Verwendungszweck und die Beschaffenheit des zu speichernden Schüttgutes zu beachten.

ANMERKUNG 1 Im Nationalen Anhang dürfen angemessene Werte für die Korrosions- und Abrasionsverluste für bestimmte Schüttgüter im Reibungskontakt mit bestimmten Silowandungswerkstoffen, angegeben werden, die die in EN 1991-4 definierte Schüttgutfließart berücksichtigen.

ANMERKUNG 2 Um sicherzustellen, dass die Bemessungsannahmen beim Betrieb eingehalten werden, sind geeignete Inspektionsmaßnahmen festzulegen.

4.1.5 Berücksichtigung von Temperatureinflüssen

(1) Bei heißem Schüttgut sollten die Einflüsse von Temperaturdifferenzen zwischen Tragwerksteilen, die Kontakt mit dem heißen Material haben, und solchen, die bereits abgekühlt sind, bei der Berechnung der Spannungsverteilung in der Silowandung berücksichtigt werden.

4.2 Berechnung des Schalentragswerks eines kreisrunden Silos

4.2.1 Modellierung der Tragwerksschale

(1) Die Tragwerksschale sollte nach den Anforderungen von EN 1993-1-6 modelliert werden. Diese gelten bei Befolgung nachstehender Regeln als erfüllt.

(2) Das Tragwerksmodell sollte alle Steifen, großen Öffnungen und Anschlussteile enthalten.

(3) Die Bemessung sollte sicherstellen, dass die angenommenen Randbedingungen eingehalten werden.

4.2.2 Berechnungsmethoden

4.2.2.1 Allgemeines

(1) Die Schalenberechnung sollte nach den Anforderungen von EN 1993-1-6 durchgeführt werden.

(2) Es darf stets ein höherwertiges Berechnungskonzept als das für die jeweilige Schadensfolgeklasse geforderte angewendet werden.

4.2.2.2 Schadensfolgeklasse 3

(1) Für Silos der Schadensfolgeklasse 3 (siehe 2.3) sollten die Beanspruchungen mit Hilfe einer validierten numerischen Berechnung (z. B. einer Finite-Elemente(FE)-Schalenberechnung) (wie in EN 1993-1-6 festgelegt) ermittelt werden. Der Nachweis gegen den Grenzzustand ‚Plastische Grenze‘ nach EN 1993-1-6 darf mit Hilfe plastischer Kollapsmechanismen unter Primärspannungszuständen geführt werden.

4.2.2.3 Schadensfolgeklasse 2

(1) Für Silos der Schadensfolgeklasse 2 unter axialsymmetrischen Belastungs- und Lagerungsbedingungen darf alternativ eines der beiden folgenden Berechnungskonzepte eingesetzt werden:

a) Die Primärspannungen können mit Hilfe der Membrantheorie ermittelt werden. Örtliche Biegeeffekte können mit Hilfe von Formeln auf der Grundlage der elastischen Biegetheorie erfasst werden.

b) Es kann eine validierte numerische Berechnung (z. B. eine FE-Schalenberechnung) (wie in EN 1993-1-6 festgelegt) durchgeführt werden.

(2) Lässt sich die Belastung aus dem Schüttgut nicht als axialsymmetrisch betrachten, so sollte eine validierte numerische Berechnung durchgeführt werden.

(3) Ungeachtet Absatz (2) dürfen die Primärspannungen mit Hilfe der Membrantheorie ermittelt werden, wenn die Belastung über den Umfang stetig veränderlich ist (z. B. in Form der 1. Harmonischen) und nur globale Biegung erzeugt.

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

(4) Für Berechnungen unter Windlast und/oder Fundamentsetzungen und/oder stetig veränderlichen Teilflächenlasten (siehe EN 1991-4 bezüglich dünnwandiger Silos) darf die Semi-Membrantheorie oder die Membrantheorie angewendet werden.

(5) Bei membrantheoretischer Berechnung der primären Schalenspannungen gilt:

a) Für diskrete Ringe, die mit einer isotropen kreiszylindrischen Schale unter Innendruck verbunden sind, darf in den effektiven Querschnitt eine mittragende Schalenlänge oberhalb und unterhalb des Ringes von $0,78 \sqrt{rt}$ eingerechnet werden, es sei denn, der Ring befindet sich an der Abzweigung.

b) Örtliche Biegeeinflüsse an Diskontinuitäten der Schalenfläche und an Auflagerungen sollten getrennt erfasst werden.

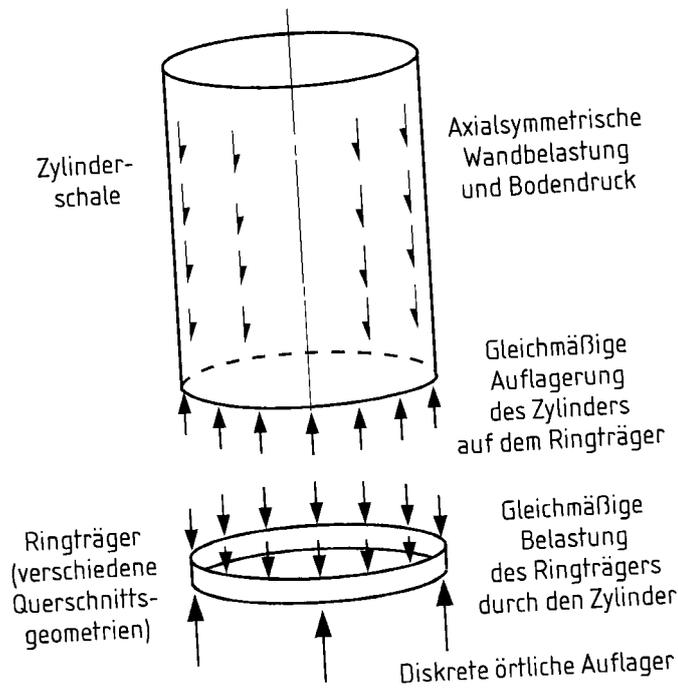
(6) Isotrope Schalenwände mit diskreten Längssteifen, deren Abstand nicht größer als $n_{vs} \sqrt{rt}$ ist, dürfen als verschmiert-längsversteift berechnet werden.

ANMERKUNG Der Wert von n_{vs} darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es wird ein Wert von $n_{vs} = 5$ empfohlen.

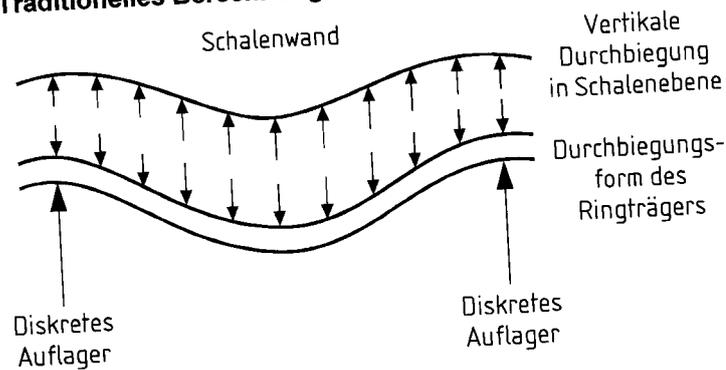
(7) Bei der Ermittlung der Steifenspannungen in einer verschmiert-längsversteift modellierten Schalenwand sollte auf eine zutreffende Erfassung der Kompatibilität zwischen Steife und Wand, einschließlich des Einflusses der Wandmembranspannungen rechtwinklig zur Steifenrichtung, geachtet werden.

(8) Bei Anordnung eines Ringträgers über diskreten Auflagern dürfen zwar die Primärspannungen mit Hilfe der Membrantheorie ermittelt werden, jedoch sollten dabei die Anforderungen in 5.4 und 8.1.4 bezüglich zusätzlicher nicht-axialsymmetrischer Primärspannungen sorgfältig beachtet werden.

(9) Bei Anordnung eines Ringträgers über diskreten Auflagern sollte die Verformungskompatibilität zwischen Ring und anschließenden Schalensegmenten beachtet werden, siehe Bild 4.1. Das betrifft besonders die Kompatibilität der axialen Verformungen, da die eingetragenen Spannungen weit hinauf in die Schale wirken. Bei Verwendung eines solchen Ringträgers sollte darüber hinaus die Exzentrizität des Ringträgerschwer- und -schubmittelpunktes zur Schalenwand beachtet werden, siehe 8.1.4 und 8.2.3.



a) Traditionelles Berechnungsmodell für stützengelagerte Silos



b) Verformungsbedingung für den Zylinder aus Kompatibilität mit der Trägerverformung

Bild 4.1 — Axiale Verformungskompatibilität zwischen Ringträger und Schale

(10) Bei Silos mit unsymmetrischer Belastung aus dem Schüttgut (Teilflächenlast, exzentrisches Entleeren, unsymmetrisches Befüllen usw.) sollte das Tragwerk so modelliert werden, dass die Übertragung von Schubmembrankräften innerhalb der Silowand sowie zwischen Silowand und Ringen erfasst wird.

ANMERKUNG Die Schubübertragung zwischen Teilen der Wand und den Ringen ist besonders wichtig in Konstruktionen mit Schrauben oder anderen diskreten Verbindungsmitteln (z. B. zwischen Siloschaft und Trichter oder zwischen verschiedenen Schüssen des Schaftes).

(11) In einer geschraubten oder mit anderen diskreten Verbindungsmitteln ausgeführten Silokonstruktion sollten bei Anordnung eines Ringträgers über diskreten Auflagern die Schubkräfte zwischen den Ringträger-Einzelteilen infolge Schalen- und Ringträgerbiegung ermittelt werden.

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

(12) Die Steifigkeit des Schüttgutes darf nicht rechnerisch zur Verringerung der Wandverformungen oder zur Erhöhung des Beulwiderstandes des Tragwerks in Anspruch genommen werden, es sei denn, es wird eine rationale Analyse durchgeführt und es liegen eindeutige Beweise dafür vor, dass das Schüttgut an der Wand während der Entleerung nicht rutscht.

4.2.2.4 Schadensfolgeklasse 1

(1) Für Silos der Schadensfolgeklasse 1 dürfen die Primärspannungen mit Hilfe der Membrantheorie ermittelt werden; Einflüsse aus örtlicher Biegung und aus unsymmetrischen Einwirkungen dürfen mit Hilfe von Faktoren und Näherungsformeln berücksichtigt werden.

4.2.3 Geometrische Imperfektionen

(1) Die geometrischen Imperfektionen der Schalenwand sollten die in EN 1993-1-6 festgelegten Grenzwerte für geometrische Toleranzen einhalten.

(2) Bei Silos der Schadensfolgeklassen 2 und 3 sind nach Fertigstellung die geometrischen Imperfektionen zu messen, um sicherzustellen, dass die bei der Bemessung angenommene Herstellqualität erreicht wurde.

(3) Bei der Berechnung brauchen die geometrischen Imperfektionen der Schalenwand nicht explizit berücksichtigt zu werden, außer wenn eine GNIA- oder GMNIA-Berechnung nach EN 1993-1-6 durchgeführt wird.

4.3 Berechnung des Kastentragwerks eines rechteckigen Silos

4.3.1 Modellierung des Tragwerkskastens

(1) Der Tragwerkskasten sollte nach den Anforderungen von EN 1993-1-7 modelliert werden, wobei diese bei Befolgung der nachstehenden Regeln als erfüllt gelten.

(2) Das Tragwerksmodell sollte alle Steifen, großen Öffnungen und Anschlussteile enthalten.

(3) Die Bemessung sollte sicherstellen, dass die angenommenen Randbedingungen eingehalten werden.

(4) Die Verbindungen zwischen den Kastensegmenten sollten hinsichtlich Festigkeit und Steifigkeit den Modellierungsannahmen entsprechen.

(5) Jedes Wandfeld des Kastens darf als einzelnes Plattenelement behandelt werden, sofern die beiden folgenden Bedingungen eingehalten sind:

a) Die von den benachbarten Elementen eingeleiteten Kräfte und Momente werden erfasst.

b) Die Biegesteifigkeit der benachbarten Elemente wird erfasst.

(6) Isotrope Kastenwände mit diskreten Horizontalsteifen dürfen zur Berechnung der Spannungen in den Steifen und der Wand als orthotrope Platte mit verschmierten Steifen behandelt werden, wenn der Steifenabstand nicht größer als $n_s t$ ist.

ANMERKUNG Der Wert von n_s darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es wird ein Wert von $n_s = 40$ empfohlen.

(7) Bei der Ermittlung der Steifenspannungen in einer verschmiert-längsversteift modellierten Schalenwand sollte auf eine zutreffende Erfassung der Exzentrizität zwischen Steife und Wand und des Einflusses der Wandmembranspannungen rechtwinklig zur Steifenrichtung geachtet werden.

(8) Die mittragende Breite der Wand zu beiden Seiten der Steife sollte nicht größer als $n_{ew} t$ angesetzt werden, wobei t die örtliche Plattendicke ist.

ANMERKUNG Der Wert von n_{ew} darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es wird ein Wert von $\langle AC \rangle n_{ew} = 15 \langle AC \rangle$ empfohlen.

4.3.2 Geometrische Imperfektionen

- (1) Die geometrischen Imperfektionen der Kastenwände sollten die in EN 1993-1-7 festgelegten Grenzwerte einhalten.
- (2) Bei der Berechnung der inneren Kräfte und Momente brauchen die geometrischen Imperfektionen der Kastenwände nicht explizit berücksichtigt zu werden.

4.3.3 Berechnungsmethoden

- (1) Die Beanspruchungsgrößen in den Plattensegmenten der Kastenwände dürfen nach einer der folgenden Methoden berechnet werden:
 - a) Gleichgewichtsbetrachtung für Membrankräfte, Balkentheorie für Biegeschnittgrößen;
 - b) Berechnung auf der Grundlage der linearen Scheiben- und Plattentheorie;
 - c) Berechnung auf der Grundlage der nichtlinearen Scheiben- und Plattentheorie.
- (2) Silos der Schadensfolgeklasse 1 dürfen nach Methode (a) in Absatz (1) berechnet werden.
- (3) Silos der Schadensfolgeklasse 2 mit symmetrischer Belastung jedes Plattensegmentes dürfen ebenfalls nach Methode (a) in Absatz (1) berechnet werden.
- (4) Silos der Schadensfolgeklasse 2 mit unsymmetrischer Belastung sollten entweder nach Methode (b) oder nach Methode (c) in Absatz (1) berechnet werden.
- (5) Bei Silos der Schadensfolgeklasse 3 $\langle AC \rangle$ (siehe 2.2) $\langle AC \rangle$ sollten die Beanspruchungsgrößen entweder nach Methode (b) oder Methode (c) in Absatz (1) (wie in EN 1993-1-7 festgelegt) berechnet werden.

4.4 Orthotrope Ersatzsteifigkeiten von profilierten Wandblechen

- (1) Profilbleche als Teile eines Silotragwerkes dürfen bei der Berechnung durch gleichmäßig orthotrope Platten bzw. Schalen ersetzt werden.
- (2) Für Profilbleche mit Bogen-Tangenten-Profil oder mit Sinusprofil (Wellbleche) dürfen bei Spannungs- und Beulberechnungen des Tragwerkes die nachfolgenden Ersatzsteifigkeiten verwendet werden. Für andere Profilierungen sollten die entsprechenden Ersatzsteifigkeiten nach den mechanischen Grundsätzen berechnet werden.

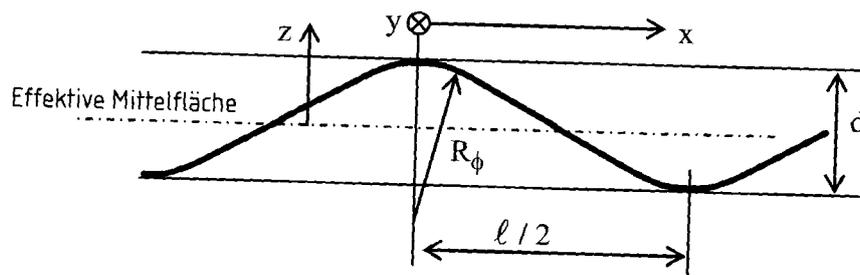


Bild 4.2 — Wellblechprofil und geometrische Parameter

- (3) Die Ersatzsteifigkeiten eines Wellbleches sollten in einem x,y -Koordinatensystem definiert werden, wobei die y -Achse parallel zur Profilierung verläuft (Geraden auf der Oberfläche) und die x -Achse rechtwinklig dazu

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

(Wellentäler und -berge). Die Profilgeometrie sollte, unabhängig von der genauen Wellenprofilierung, durch folgende Parameter beschrieben werden, siehe Bild 4.2.

Dabei ist

- d die Bruttoprofilhöhe von Kuppe zu Kuppe (Wellental zu Wellenberg);
- ℓ die Wellenlänge der Profilierung;
- R_ϕ der örtliche Radius an den Kuppen (Wellenberg bzw. -tal).

(4) Alle Ersatzsteifigkeiten dürfen als eindimensional behandelt werden; es gibt also keine Poisson-Effekte zwischen den beiden Richtungen.

(5) Die Ersatz-Dehnsteifigkeiten betragen:

$$C_x = E t_x = E \frac{2t^3}{3d^2} \quad (4.2)$$

$$C_y = E t_y = E t \left(1 + \frac{\pi^2 d^2}{4\ell^2} \right) \quad (4.3)$$

$$C_{xy} = G t_{xy} = \frac{G t}{\left(1 + \frac{\pi^2 d^2}{4\ell^2} \right)} \quad (4.4)$$

Dabei ist

- t_x die Ersatzdicke für verschmierte Membrankräfte rechtwinklig zur Profilierung;
- t_y die Ersatzdicke für verschmierte Membrankräfte parallel zur Profilierung;
- t_{xy} die Ersatzdicke für verschmierte Membranschubkräfte.

(6) Die Ersatz-Biegesteifigkeiten werden nach der Richtung indiziert, in der das Moment Biegung erzeugt, und können wie folgt angesetzt werden:

$$D_x = E I_x \text{ je Längeneinheit} = \frac{E t^3}{12(1-\nu^2)} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{\pi^2 d^2}{4\ell^2} \right)} \quad (4.5)$$

$$D_y = E I_y \text{ je Längeneinheit} = 0,13 E t d^2 \quad (4.6)$$

$$D_{xy} = G I_{xy} \text{ je Längeneinheit} = \frac{G t^3}{12} \left(1 + \frac{\pi^2 d^2}{4\ell^2} \right) \quad (4.7)$$

Dabei ist

- I_x das Ersatzflächenmoment 2. Grades (Ersatzträgheitsmoment) je Längeneinheit für verschmierte Biegung rechtwinklig zur Profilierung;
- I_y das Ersatzflächenmoment 2. Grades (Ersatzträgheitsmoment) je Längeneinheit für verschmierte Biegung parallel zur Profilierung;
- I_{xy} das Ersatzflächenmoment 2. Grades (Ersatzträgheitsmoment) je Längeneinheit für Drillung.

ANMERKUNG **AC** gestrichener Text **AC** Die Vereinbarung für Biegemomente in Flächentragwerken bezieht sich auf die Richtung, in der das Flächentragwerk gekrümmt wird, und ist damit der für Träger geltenden Vereinbarung entgegengesetzt. Biegung parallel zur Profilierung aktiviert die Biegesteifigkeit des Profils und ist der Hauptgrund für die Verwendung von Profilblechen.

AC gestrichener Text **AC**

(7) In kreisrunden Silos mit in Umfangsrichtung verlaufender Profilierung entsprechen die Richtungen x und y in den oben stehenden Formelaustrücken der Meridiankoordinate ϕ bzw. der Umfangskoordinate θ , siehe Bild 1.2 (a). Verläuft die Profilierung in Meridianrichtung, so entsprechen die Richtungen x und y in den oben stehenden Formelaustrücken der Umfangskoordinate θ bzw. der Meridiankoordinate ϕ .

(8) Die Schubsteifigkeiten sollten als unabhängig von der Profilierungsrichtung angenommen werden. Der Wert von G kann mit $E\{2(1 + \nu)\} = 80\ 800$ MPa angesetzt werden.

(9) In rechteckigen Silos mit horizontal (in Umfangsrichtung) verlaufender Profilierung entsprechen die Richtungen x und y in den oben stehenden Formelaustrücken der örtlichen Axialkoordinate x und der örtlichen Horizontalkoordinate y , siehe Bild 1.3 (a). Verläuft die Profilierung in Vertikal- oder in Meridianrichtung, so sollten die Richtungen x und y im realen Tragwerk vertauscht werden und entsprechen nun der horizontalen y -Koordinate bzw. der axialen x -Koordinate.

5 Bemessung von zylindrischen Wänden

5.1 Grundlagen

5.1.1 Allgemeines

(1) Zylindrische Stahlsilowände sollten so dimensioniert werden, dass die grundlegenden Bemessungsanforderungen für die Grenzzustände der Tragfähigkeit nach Abschnitt 2 erfüllt sind.

(2) Die Tragsicherheitsnachweise der Zylinderschale sollten nach den Regeln von EN 1993-1-6 geführt werden.

5.1.2 Bemessung der Silowand

(1) Die zylindrische Silowand sollte im Rahmen der in EN 1993-1-6 festgelegten Grenzzustände der Tragfähigkeit für folgende Phänomene nachgewiesen werden:

- globale Stabilität und statisches Gleichgewicht.

LS1: Grenzzustand ‚Plastische Grenze‘ (einschließlich ‚Zugbruch‘)

- Widerstand gegen Bersten oder Zugbruch oder plastisches Versagen (Kollaps durch Bildung eines plastischen Mechanismus, exzessives Fließen) unter Innendruck oder sonstigen Einwirkungen;
- Widerstand von Stößen, Anschlüssen und Verbindungen.

LS2: Grenzzustand ‚Zyklisches Plastizieren‘

- Widerstand gegen örtliches Biegefließen;
- Lokale Effekte.

LS3: Grenzzustand ‚Beulen‘

- Widerstand gegen Beulen unter Axialdruckbeanspruchung;
- Widerstand gegen Beulen unter Außendruck (Wind und/oder Teilvakuum);
- Widerstand gegen Beulen unter Schubbeanspruchung infolge unsymmetrischer Einwirkungen;

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

- Widerstand gegen Beulen unter Schubbeanspruchung im Bereich eingebundener Stützen;
- Widerstand gegen örtliches Versagen über Auflagern;
- Widerstand gegen örtliches Krüppeln im Bereich von Öffnungen;
- Widerstand gegen örtliches Beulen unter unsymmetrischer Belastung.

LS4: Grenzzustand ‚Ermüdung‘

- Widerstand gegen Ermüdungsbruch.

(2) Die Schalenwand sollte den Anforderungen von EN 1993-1-6 entsprechen; bei Anwendung der in den nachstehenden Abschnitten 5.3 bis 5.6 angegebenen Regeln gelten jene Anforderungen als erfüllt.

(3) Für Silos der Schadensfolgeklasse 1 dürfen die Grenzzustände ‚Zyklisches Plastizieren‘ und ‚Ermüdung‘ außer Acht gelassen werden.

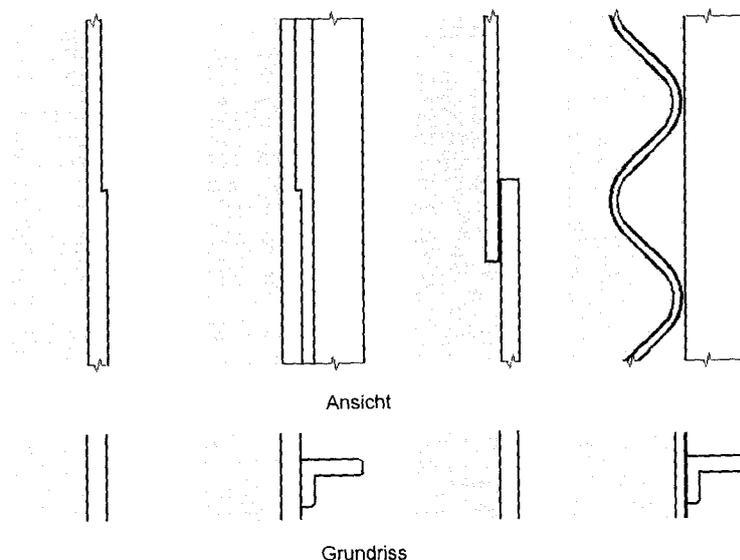
5.2 Unterscheidung zwischen verschiedenen Formen zylindrischer Schalen

(1) Für eine aus ebenen gewalzten Stahlblechen gefertigte Schalenwand – als ‚isotrop‘ bezeichnet (siehe Bild 5.1) – sollten die Nachweise nach 5.3.2 geführt werden.

(2) Für eine aus profiliertem Stahlblech (Wellblech) gefertigte Schalenwand, bei der die Profilierung in Umfangsrichtung verläuft – als ‚horizontal profiliert‘ bezeichnet (siehe Bild 5.1) –, sollten die Nachweise nach 5.3.4 geführt werden. Verläuft die Profilierung in Meridianrichtung – als ‚vertikal profiliert‘ bezeichnet –, so sollten die Nachweise nach 5.3.5 geführt werden.

(3) Für eine mit Außensteifen versehene Schalenwand – als ‚außenversteift‘ bezeichnet (siehe Bild 5.1) – sollten die Nachweise unabhängig vom Steifenabstand nach 5.3.3 geführt werden.

(4) Für eine Schalenwand, in der zusammentreffende Blechsegmente überlappend miteinander verbunden werden – als ‚überlappt gestoßen‘ (auch ‚Überlappstoß‘) bezeichnet (siehe Bild 5.1) –, sollten die Nachweise nach 5.3.2 geführt werden.



Isotrope, außenversteifte, überlappt gestoßene und horizontal profilierte Wände

Bild 5.1 — Darstellung der Formen zylindrischer Schalen

5.3 Tragsicherheitsnachweise für zylindrische Silowände

5.3.1 Allgemeines

(1) Die Zylinderschale sollte den Bestimmungen von EN 1993-1-6 entsprechen. Diese gelten als erfüllt, wenn die Nachweise nach den folgenden Regeln geführt werden.

5.3.2 Isotrope, geschweißte oder geschraubte Wände

5.3.2.1 Allgemeines

- (1) Der Wandquerschnitt sollte so dimensioniert werden, dass er einem Versagen durch Zugbruch oder plastischen Kollaps widersteht.
- (2) Die Stöße sollten so ausgebildet werden, dass sie einem Zugbruch im Nettoquerschnitt widerstehen.
- (3) Gegebenenfalls sollte die Exzentrizität an Überlappstößen beim Nachweis gegen Zugbruch berücksichtigt werden.
- (4) Die Schalenwand sollte so dimensioniert werden, dass sie einem Stabilitätsversagen (Beulen) widersteht.

5.3.2.2 Vorhandene Schnittgrößen (Bemessungsschnittgrößen)

(1) Unter Innendruck, Wandreibungslast und allen weiteren relevanten Bemessungslasten sollten die Bemessungsschnittgrößen an jeder Stelle der Schale, gegebenenfalls unter Berücksichtigung der Veränderlichkeit des Innendrucks und der Wandreibungslast, berechnet werden.

ANMERKUNG 1 Jede Gruppe von Bemessungsschnittgrößen für die Belastung eines Silos durch ein gespeichertes Schüttgut sollte auf jeweils einem einheitlichen Satz von Schüttguteigenschaften beruhen.

ANMERKUNG 2 Werden die Bemessungsschnittgrößen berechnet, um damit den Nachweis gegen den Grenzzustand ‚Plastische Grenze‘ zu führen, so sollten die Schüttguteigenschaften in der Regel so gewählt werden, dass der Innendruck maximal ist, und es sollte die in EN 1991-4 festgelegte Entleerung mit Teilflächenbelastung gewählt werden.

ANMERKUNG 3 Werden die Bemessungsschnittgrößen berechnet, um damit den Nachweis gegen den Grenzzustand ‚Beulen‘ unter Schüttgutbelastung zu führen, so sollten die Schüttguteigenschaften in der Regel so gewählt werden, dass der Axialdruck maximal ist, und es sollte die in EN 1991-4 festgelegte Entleerung mit Teilflächenbelastung gewählt werden. Trägt jedoch der Innendruck zur Erhöhung des Beulwiderstandes bei, so sollten nur die Fülldrücke (für einen konsistenten Satz von Füllguteigenschaften) in Verbindung mit den Entleerungsaxialkräften angesetzt werden, da die günstig wirkenden Drücke örtlich auf die Füllwerte abfallen können, obgleich sich der Axialdruck aus dem Entleerungszustand ergibt.

(2) Wird bei der Berechnung der Bemessungsspannungen in der Schale die Membrantheorie angewendet, so sollte die Schale an jeder Stelle dem höchsten Druck widerstehen können.

(3) Da bei hochgradig lokalen Drücken die tatsächlichen Membrankräfte kleiner sein können als membrantheoretisch berechnet, dürfen die in EN 1993-1-6 angegebenen Bestimmungen für spannungsbasierte, direkte oder numerisch gestützte Tragsicherheitsnachweise angewendet werden, um zu einer wirtschaftlicheren Bemessung zu gelangen.

(4) Bei membrantheoretischer Berechnung darf das resultierende zweidimensionale Feld der Membrankräfte $n_{x,Ed}$, $n_{\theta,Ed}$ und $n_{x\theta,Ed}$ wie folgt in eine Bemessungs-Vergleichsspannung umgerechnet werden:

$$\sigma_{e,Ed} = \frac{1}{t} \sqrt{n_{x,Ed}^2 + n_{\theta,Ed}^2 - n_{x,Ed} n_{\theta,Ed} + 3 n_{x\theta,Ed}^2} \quad (5.1)$$

(5) Bei biegetheoretischer Berechnung (LA-Berechnung) darf das resultierende zweidimensionale Feld der Primärschnittgrößen $n_{x,Ed}$, $n_{\theta,Ed}$, $n_{x\theta,Ed}$, $m_{x,Ed}$, $m_{\theta,Ed}$, $m_{x\theta,Ed}$ wie folgt in fiktive Spannungskomponenten

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

$$\sigma_{x,Ed} = \frac{n_{x,Ed}}{t} \pm \frac{m_{x,Ed}}{t^2/4}, \quad \sigma_{\theta,Ed} = \frac{n_{\theta,Ed}}{t} \pm \frac{m_{\theta,Ed}}{t^2/4} \quad (5.2)$$

$$\tau_{x\theta,Ed} = \frac{n_{x\theta,Ed}}{t} \pm \frac{m_{x\theta,Ed}}{t^2/4} \quad (5.3)$$

und anschließend in eine Bemessungs-Vergleichsspannung umgerechnet werden:

$$\sigma_{e,Ed} = \sqrt{\sigma_{x,Ed}^2 + \sigma_{\theta,Ed}^2 - \sigma_{x,Ed} \sigma_{\theta,Ed} + 3 \tau_{x\theta,Ed}^2} \quad (5.4)$$

ANMERKUNG Die vorstehenden Ausdrücke (Fließbedingung nach Ilyushin) liefern eine für Bemessungszwecke vereinfachte konservative Vergleichsspannung.

5.3.2.3 LS1: Plastische Grenze oder Zugbruch

(1) Der Bemessungswiderstand gegen Membrankräfte sollte sowohl für geschweißte als auch geschraubte Schalenwände in Form des Vergleichsspannungswiderstandes $f_{e,Rd}$ angegeben werden; diese beträgt:

$$f_{e,Rd} = f_y / \gamma_{M0} \quad (5.5)$$

(2) Der Bemessungswiderstand an Überlappstößen in geschweißten Schalenwänden $f_{e,Rd}$ sollte durch ein fiktives Festigkeitskriterium wie folgt beurteilt werden:

$$f_{e,Rd} = j f_y / \gamma_{M0} \quad (5.6)$$

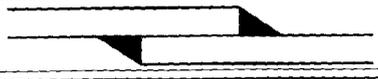
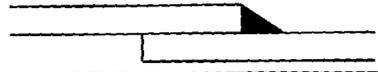
Dabei ist

j der Verbindungswirksamkeitsfaktor.

(3) Die Verbindungswirksamkeit von überlappt geschweißten Stößen mit durchgehenden Kehlnähten sollte mit $j = j_i$ angesetzt werden. AC Einfach geschweißte Überlappstöße sollten nicht verwendet werden, wenn mehr als 20 % des Wertes von $\sigma_{e,Ed}$ in Gleichung (5.4) aus Biegemomenten resultieren. AC

ANMERKUNG Der Wert von j_i darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Die für j_i empfohlenen Werte AC sind in der nachstehenden Tabelle AC für verschiedene Ausführungen von Stößen angegeben. AC gestrichelter Text AC

Verbindungswirksamkeit j_i von geschweißten Überlappstößen

Verbindungsart	Skizze	Wert von j_i
Doppelt geschweißter Überlappstoß		$j_1 = 1,0$
Einfach geschweißter Überlappstoß		$j_2 = 0,35$

(4) Der Bemessungswiderstand gegen Membrankräfte im Nettoquerschnitt einer geschraubten Schalenwand sollte in Form von Membrankraftwiderständen angesetzt werden; diese betragen:

$$\text{— in Meridianrichtung} \quad n_{x,Rd} = f_u / \gamma_{M2} \quad (5.7)$$

$$\text{— in Umfangsrichtung} \quad n_{\theta,Rd} = f_u / \gamma_{M2} \quad (5.8)$$

$$\text{— für den Schubwiderstand} \quad n_{x\theta,Rd} = 0,57 f_y / \gamma_{M0} \quad (5.9)$$

(5) Geschraubte Verbindungen sollten nach EN 1993-1-8 oder EN 1993-1-3 bemessen werden. Der Einfluss der Schraub- bzw. Nietlöcher sollte ebenfalls nach EN 1993-1-1 unter Anwendung der entsprechenden Anforderungen für Zug-, Druck- oder Schubbeanspruchung berücksichtigt werden.

(6) Der Widerstand gegen lokale Belastungen aus Anschlussbauteilen sollte nach 5.4.6 behandelt werden.

(7) An jeder Stelle des Tragwerks sollte folgender Spannungsnachweis geführt werden:

(5.10)

$$\sigma_{e,Ed} \leq f_{e,Rd}$$

(8) An jedem Stoß innerhalb des Tragwerks sollte der zutreffende unter den folgenden Schnittgrößennachweisen geführt werden:

(5.11)

$$n_{x,Ed} \leq n_{x,Rd}$$

(5.12)

$$n_{\theta,Ed} \leq n_{\theta,Rd}$$

(5.13)

$$n_{x\theta,Ed} \leq n_{x\theta,Rd}$$

5.3.2.4 LS3: Beulen unter Axialdruckbeanspruchung

(1) Der Bemessungswiderstand gegen Axialdruckbeulen sollte an jeder Stelle des Tragwerks ermittelt werden, und zwar unter Berücksichtigung der spezifischen Herstelltoleranz-Qualitätsklasse, der Größe des garantiert gleichzeitig wirkenden Innendruckes p und der Ungleichmäßigkeit der Axialdruckbeanspruchung in Umfangsrichtung. Bei der Bemessung sollten alle Bereiche der Schale berücksichtigt werden. Druckmembrankräfte sollten in Beulberechnungen positiv eingeführt werden, um ständige negative Zahlenwerte zu vermeiden.

(2) Die Herstelltoleranz-Qualitätsklasse sollte nach Tabelle 5.1 spezifiziert werden.

Tabelle 5.1 — Herstelltoleranz-Qualitätsklassen

Herstelltoleranz-Qualitätsklasse der Konstruktion	Qualitätsparameter Q	Beschränkungen bezüglich der Schadensfolgeklasse
Normal	16	Obligatorisch für Schadensfolgeklasse 1
Hoch	25	
Exzellent	40	Nur für Schadensfolgeklasse 3 zulässig

ANMERKUNG Die Toleranzanforderungen für die Herstelltoleranz-Qualitätsklassen sind in EN 1993-1-6 und EN 1090 angegeben.

(3) Die charakteristische Imperfektionsamplitude w_{ok} sollte wie folgt angesetzt werden:

(5.14)

$$w_{ok} = \frac{t}{Q} \sqrt{\frac{r}{t}}$$

(4) Der elastische Imperfektions-Abminderungsfaktor α_0 für Axialdruckbeulen ohne Innendruck sollte wie folgt berechnet werden:

(5.15)

$$\alpha_0 = \frac{0,62}{1 + 1,91 \psi \left(\frac{w_{ok}}{t} \right)^{1,44}}$$

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

Dabei ist ψ der Parameter für die Ungleichmäßigkeit der Axialdruckbeanspruchung in Umfangsrichtung; er ist im Falle konstanten Axialdruckes gleich 1 und wird für ungleichmäßigen Axialdruck in Absatz (8) angegeben.

(5) Bei gleichzeitig wirkendem Innendruck ist der elastische Imperfektions-Abminderungsfaktor α durch den kleineren der beiden folgenden innendruckbeeinflussten Imperfektions-Abminderungsfaktoren α_{pe} und α_{pp} zu ersetzen. Diese sind für den jeweils lokalen Wert des Innendruckes p zu ermitteln. Für Silos, die nach den Regeln für die Schadensfolgeklasse 1 bemessen werden, sollte der elastische Imperfektions-Abminderungsfaktor nicht größer als α angesetzt werden.

(6) Der Imperfektions-Abminderungsfaktor α_{pe} , der die innendruckinduzierte elastische Stabilisierung erfasst, ist mit dem kleinstmöglichen lokalen Innendruck, der an der betrachteten Stelle gleichzeitig mit dem Axialdruck auftritt (d. h. garantiert gleichzeitig vorhanden ist), wie folgt zu ermitteln:

$$\alpha_{pe} = \alpha_0 + (1 - \alpha_0) \left(\frac{\overline{p_s}}{\overline{p_s} + \frac{0,3}{\sqrt{\alpha_0}}} \right) \quad (5.16)$$

mit:

$$\overline{p_s} = \frac{p_s r}{t \sigma_{x,Rcr}} \quad (5.17)$$

Dabei ist

- p_s der kleinste zuverlässige Bemessungswert des lokalen Innendruckes (siehe EN 1991-4);
 $\sigma_{x,Rcr}$ die ideale Axialbeulspannung (siehe Gleichung(5.28)).

(7) Der Imperfektions-Abminderungsfaktor α_{pp} , der die innendruckinduzierte plastische Destabilisierung erfasst, sollte mit dem größtmöglichen lokalen Innendruck, der an der betrachteten Stelle gleichzeitig mit dem Axialdruck auftreten kann, wie folgt ermittelt werden:

$$\alpha_{pp} = \left\{ 1 - \left(\frac{\overline{p_s}}{\lambda_x^2} \right)^2 \right\} \left[1 - \frac{1}{112 + s^{3/2}} \right] \left[\frac{s^2 + 1,21 \overline{\lambda_x}^2}{s(s+1)} \right] \quad (5.18)$$

mit:

$$\overline{p_s} = \frac{p_g r}{\sigma_{x,Rcr} t} \quad (5.19)$$

$$s = \left(\frac{1}{400} \right) \left(\frac{r}{t} \right) \quad (5.20)$$

$$\overline{\lambda_x}^2 = \frac{f_y}{\sigma_{x,Rcr}} \quad (5.21)$$

Dabei ist

- p_g der größte Bemessungswert des lokalen Innendruckes (siehe EN 1991-4).

(8) Bei ungleichmäßiger Verteilung der Axialdruckbeanspruchung in Umfangsrichtung sollte der positive Einfluss auf den elastischen Imperfektions-Abminderungsfaktor durch den Parameter ψ für die Spannungsungleichförmigkeit erfasst werden. Er sollte aus der linear elastisch berechneten axialen Membrandruckspannungsverteilung in Umfangsrichtung für die betrachtete Höhenkote nach Bild 5.2 ermittelt werden. Der Bemessungswert der axialen Membrandruckspannung $\sigma_{x,Ed}$ an dem am stärksten beanspruchten Punkt auf dieser Höhenkote wird mit $\sigma_{x0,Ed}$ bezeichnet.

Der Bemessungswert der axialen Membrandruckspannung an einem zweiten Punkt auf derselben Höhenkote, der vom ersten Punkt entlang des Umfangs

$$y = r \Delta\theta = 4 \sqrt{rt} \quad (5.22)$$

entfernt ist, wird mit $\sigma_{x1,Ed}$ bezeichnet.

(9) Liegt der Wert des Spannungsverhältnisses

$$s = \left(\frac{\sigma_{x1,Ed}}{\sigma_{x0,Ed}} \right) \quad (5.23)$$

im Bereich von $0,3 < s < 1,0$, so ist die obige Anordnung des zweiten Punktes zufrieden stellend. Falls der Wert von s außerhalb dieses Bereichs liegt, sollte ein anderer Wert für $r \Delta\theta$ gewählt werden, und zwar so, dass der Wert von $s = 0,5$ ist. Die folgende Berechnung sollte dann mit einem entsprechend angepassten Wertepaar für s und $\Delta\theta$ durchgeführt werden.

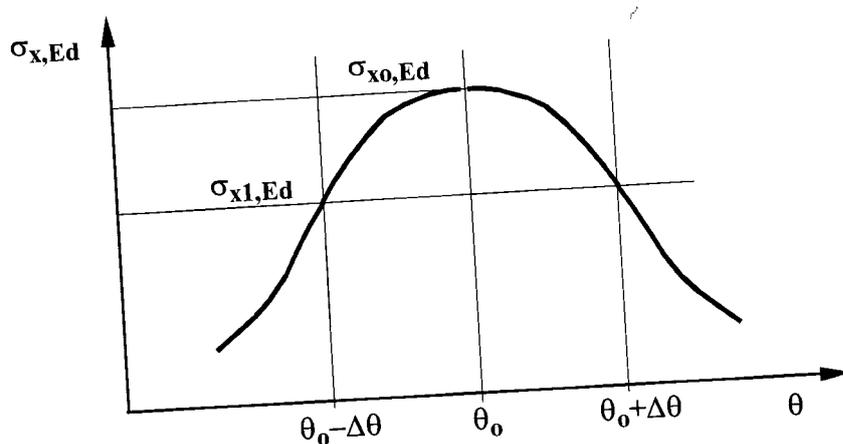


Bild 5.2 — Darstellung der örtlichen Verteilung der axialen Membrandruckspannungen in Umfangsrichtung

(10) Die Ersatzharmonische j der Spannungsverteilung sollte wie folgt berechnet werden:

$$j = 0,25 \sqrt{\frac{r}{t}} \cdot \arccos \left(\frac{\sigma_{x1,Ed}}{\sigma_{x0,Ed}} \right) \quad (5.24)$$

Damit erhält man den Parameter ψ für die Spannungsungleichförmigkeit wie folgt:

$$\psi = \frac{1 - b_1 j}{1 + b_2 j} \quad (5.25)$$

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

mit:

$$b_1 = 0,5 \sqrt{\frac{t}{r}} \quad (5.26)$$

$$b_2 = \frac{(1-b_1)}{\psi_b} - 1 \quad (5.27)$$

Dabei ist

ψ_b der Wert des Parameters für die Spannungsungleichförmigkeit bei globaler Biegung.

ANMERKUNG Der Wert von ψ_b darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es wird ein Wert von $\psi_b = 0,40$ empfohlen.

(11) Die Grenzharmonische j , ab der keine imperfektionsbedingte Reduktion unter den idealen Beulwiderstand bei gleichförmiger Druckverteilung mehr auftritt, darf mit $j_\infty = 1/b_1$ angenommen werden. Falls sich zeigt, dass $j > j_\infty$ ist, sollte der Wert von j mit $j = j_\infty$ angesetzt werden.

(12) An horizontalen Überlappstößen, die für die rechtwinklig durchlaufende axiale Membrandruckkraft eine Exzentrizität darstellen, sollte der in den Absätzen (4) bis (7) angegebene Imperfektions-Abminderungsfaktor α auf α_L reduziert werden, sofern die Exzentrizität zwischen den Mittelflächen der beiden Bleche größer ist als $k_1 t$ und der Dickensprung nicht größer ist als $k_2 t$; dabei ist t die Dicke des dünneren Bleches am Stoß. Ist die Exzentrizität kleiner als der genannte Wert, oder ist der Dickensprung größer als der genannte Wert, so braucht der Imperfektions-Abminderungsfaktor α nicht reduziert zu werden.

ANMERKUNG 1 Die Werte von α_L , k_1 und k_2 dürfen im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es werden folgende Werte empfohlen: $\alpha_L = 0,7$, $k_1 = 0,5$ und $k_2 = 0,25$, wobei α der jeweiligen Situation entsprechend durch α_o , α_{pe} oder α_{pp} gegeben ist.

ANMERKUNG 2 Die Beultragfähigkeit fällt nur dann unter den sonst geltenden Wert, wenn der untere Schuss nicht dick genug ist, um bei Auftreten einer Imperfektion unmittelbar über dem Überlappstoß die Ausbildung einer weicheren Beule zu verhindern.

(13) Die ideale Axialbeulspannung der isotropen Schalenwand sollte wie folgt berechnet werden:

$$\sigma_{x,Rcr} = \frac{E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \cdot \frac{t}{r} = 0,605 E \frac{t}{r} \quad (5.28)$$

(14) Die charakteristische Axialbeulspannung erhält man bei Verwendung des entsprechenden Imperfektions-Abminderungsfaktors α aus den Absätzen (4), (5), (6), (7) und (8) zu:

$$\sigma_{x,Rk} = \chi_x f_y \quad (5.29)$$

ANMERKUNG Die spezielle Vorgehensweise mit σ_{Rk} und σ_{Rd} als charakteristischem und Bemessungsbeulwiderstand folgt der Vereinbarung in EN 1993-1-6 für Schalentragwerke und unterscheidet sich von derjenigen in EN 1993-1-1.

(15) Der Abminderungsbeiwert für Schalenbeulen χ_x sollte als Funktion des bezogenen Schalenschlankheitsgrades $\bar{\lambda}_x$ wie folgt ermittelt werden:

$$\chi_x = 1 \quad \text{wenn } \bar{\lambda}_x \leq \bar{\lambda}_0 \quad (5.30)$$

$$\chi_x = 1 - \beta \left(\frac{\bar{\lambda}_x - \bar{\lambda}_0}{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_0} \right)^\eta \quad \text{wenn } \bar{\lambda}_0 < \bar{\lambda}_x < \bar{\lambda}_p \quad (5.31)$$

$$\chi_x = \frac{\alpha}{\bar{\lambda}_x^2} \quad \text{wenn } \bar{\lambda}_p \leq \bar{\lambda}_x \quad (5.32)$$

mit: (5.33)

$$\bar{\lambda}_x = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{x,Rcr}}} \quad (5.34)$$

$$\bar{\lambda}_0 = 0,2 \quad (5.35)$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha}{1 - \beta}}$$

Dabei ist α als der entsprechende Wert von α_0 , α_{pe} , α_{pp} oder α_L zu wählen.

ANMERKUNG Die Werte von β und η dürfen im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es werden folgende Werte empfohlen: $\beta = 0,60$ und $\eta = 1,0$.

(16) Die Bemessungs-Axialbeulspannung sollte wie folgt ermittelt werden: (5.36)

$$\sigma_{x,Rd} = \sigma_{x,Rk} / \gamma_{M1}$$

mit γ_{M1} nach 2.9.2.

(17) Die Bemessungsmembrankräfte sollten an jeder Stelle des Tragwerks folgende Bedingung erfüllen: (5.37)

$$n_{x,Ed} \leq t \sigma_{x,Rd}$$

(18) An Überlappstößen, die die in (12) festgelegten Bedingungen erfüllen, braucht die Messung der größten zulässigen messbaren Vorbeul-Imperfektion nicht über den Stoß hinweg durchgeführt zu werden.

(19) Der Nachweis der Schalenwand gegen Axialbeulen über einem diskreten Auflager oder im Bereich einer Konsole (z. B. zur Lagerung einer Förderbrücke) oder im Bereich einer Öffnung sollte nach den Regeln in 5.6 erfolgen.

5.3.2.5 LS3: Beulen unter Außendruck — Teilvakuum und/oder Windlast

(1) Der Beulsicherheitsnachweis sollte nach EN 1993-1-6 geführt werden; die dortigen Anforderungen gelten jedoch als erfüllt, wenn die Nachweise nach den folgenden Regeln geführt werden.

(2) Der untere Rand der Zylinderschale sollte wirksam verankert werden, um vertikalen Verschiebungen zu widerstehen; siehe 5.4.7.

(3) Unter Windlast oder Teilvakuum sollte die Silowand in Abschnitte zwischen Versteifungsringen, Blechdickensprüngen oder gehaltenen Rändern unterteilt werden.

(4) Für jeden Wandabschnitt bzw. für jede Gruppe von Wandabschnitten, in denen sich eine Beule ausbilden könnte, sollte eine Beulberechnung durchgeführt werden, wobei mit dem dünnsten Abschnitt zu beginnen ist und dann sukzessive weitere hinzugefügt werden. Aus diesen alternativen Berechnungen sollte der niedrigste Bemessungsbeuldruck abgeleitet werden.

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

(5) Der ideale Außenbeuldruck für eine isotrope Zylinderwand sollte wie folgt berechnet werden:

$$P_{n,Rcru} = 0,92 C_b C_w E \left(\frac{r}{l}\right) \left(\frac{t}{r}\right)^{2,5} \quad (5.38)$$

Dabei ist

- t die Dicke des dünnsten Abschnittes der Wand;
- l die Höhe zwischen Versteifungsringen oder gehaltenen Rändern;
- C_b der Beiwert für Außendruckbeulen;
- C_w der Beiwert für die Winddruckverteilung.

(6) Der Parameter C_b ergibt sich in Abhängigkeit von der konstruktiven Ausbildung am oberen Rand aus Tabelle 5.2.

Tabelle 5.2 — Werte für den Parameter C_b für Außendruckbeulen

Konstruktive Ausbildung des oberen Randes	Dach ist verformungsschlüssig (kontinuierlich) mit der Wand verbunden	Oberer Versteifungsring erfüllt 5.3.2.5 (12)–(14)	Oberer Versteifungsring erfüllt nicht 5.3.2.5 (12)–(14)
C_b	1,0	1,0	0,6

(7) Gehört der Silo zu einer eng stehenden Silogruppe, so sollte der auf den windzugewandten Meridian (Staumeridian) bezogene Beiwert für die Winddruckverteilung mit $C_w = 1,0$ angesetzt werden.

(8) Für einen einzeln stehenden Silo unter Windlast allein sollte der auf den windzugewandten Meridian (Staumeridian) bezogene Beiwert für die Winddruckverteilung C_w als der größere der folgenden beiden Werte angesetzt werden:

$$C_w = \frac{2,2}{\left(1 + 0,1 \sqrt{C_b \frac{r}{l} \sqrt{\frac{r}{t}}}\right)} \quad (5.39)$$

$$C_w = 1,0 \quad (5.40)$$

(9) Für einen einzeln stehenden Silo unter einer Kombination aus Windlast und Teilvakuum sollte der Wert von C_w als linear gewichtetes Mittel zwischen 1,0 und dem in Absatz (8) ermittelten Wert berechnet werden.

(10) Der auf den windzugewandten Meridian (Staumeridian) bezogene Bemessungsbeuldruck unter Windlast und/oder Teilvakuum sollte wie folgt ermittelt werden:

$$P_{n,Rd} = \alpha_n P_{n,Rcru} / \gamma_{M1} \quad (5.41)$$

Dabei ist α_n der elastische Imperfektions-Abminderungsfaktor, und γ_{M1} ist 2.9.2 zu entnehmen.

ANMERKUNG Der Wert von α_n darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es wird ein Wert von $\alpha_n = 0,5$ empfohlen.

(11) Der Beulsicherheitsnachweis ist wie folgt zu führen:

$$P_{n,Ed} \leq P_{n,Rd} \quad (5.42)$$

Dabei ist

$p_{n,Ed}$ der Bemessungswert des größten vorhandenen Außendruckes aus Windlast und/oder Teilvakuum.

(12) Um den oberen Zylinderrand als durch eine Ringsteife ausreichend gehalten behandeln zu dürfen, sollte diese Steife sowohl eine Festigkeitsbedingung als auch eine Steifigkeitsbedingung erfüllen. Falls keine gründlichere Untersuchung mit Hilfe einer numerischen Analyse durchgeführt wird, sollten die Bemessungswerte der Normalkraft und des Biegemoments in Umfangsrichtung, letzteres um die vertikale Achse des Ringquerschnittes wie folgt angesetzt werden:

$$N_{\theta,Ed} = 0,5 r L p_{n,Ed} \quad (5.43)$$

$$M_{\theta,Ed} = M_{\theta,Edo} + M_{\theta,Edw} \quad (5.44)$$

mit: (5.45)

$$M_{\theta,Edo} = 0,0033 p_{nS1} r^2 L \left(\frac{p_{nS1}}{p_{nS1} - p_{n,Edu}} \right) \quad (5.46)$$

$$M_{\theta,Edw} = 0,17 p_{n,Edw} r^2 L \left(\frac{p_{n,Edu}}{p_{nS1} - p_{n,Edu}} \right) \quad (5.47)$$

$$p_{nS1} = \frac{6 EI_z}{r^3 L}$$

Dabei ist

- $p_{n,Edu}$ der Bemessungswert des konstanten Anteils des Außendruckes unter Windlast und/oder Teilvakuum;
- $p_{n,Edw}$ der Bemessungswert des Drucks am Staumeridian unter Windlast;
- p_{nS1} der Bezugsdruck für die Berechnung des Umfangsbiegemoments;
- $M_{\theta,Edo}$ der Bemessungswert des aus Unrundheiten resultierenden Biegemoments;
- $M_{\theta,Edw}$ der Bemessungswert des durch Wind verursachten Biegemoments;
- I_z das Flächenmoment 2. Grades (Trägheitsmoment) der Ringsteife für Umfangsbiegung;
- L die Gesamthöhe der Schalenwand;
- t die Dicke des dünnsten Schusses.

(13) Wird die Ringsteife am oberen Zylinderrand durch Kaltformen ausgeführt, so sollte der nach Gleichung (5.45) berechnete Wert von $M_{\theta,Edo}$ um 15 % erhöht werden.

(14) Die Biegesteifigkeit EI_z einer Ringsteife am oberen Zylinderrand um ihre vertikale Querschnittsachse (Umfangsbiegung) sollte größer als der größere der folgenden beiden Werte sein: (5.48)

$$EI_{z,\min} = k_1 E L t^3$$

und

$$EI_{z,\min} = 0,08 C_w E r t^3 \sqrt{\frac{r}{t}} \quad (5.49)$$

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

Dabei ist

C_w der in den Absätzen (7) oder (8) angegebene Beiwert für die Winddruckverteilung.

ANMERKUNG Der Wert von k_1 darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es wird ein Wert von $k_1 = 0,1$ empfohlen.

5.3.2.6 LS3: Beulen unter Membranschubbeanspruchung

(1) Wenn größere Teile einer Silowand unter Membranschubbeanspruchung stehen (z. B. aus exzentrischem Befüllen, aus Erdbebenbelastung usw.), sollte als zugehöriger Beulwiderstand derjenige einer torsionsbeanspruchten Zylinderschale verwendet werden. Die axiale Veränderlichkeit des Schubs darf berücksichtigt werden.

(2) Die ideale Schubbeulspannung einer isotropen Silowand sollte wie folgt berechnet werden:

$$\tau_{x\theta, Rcr} = 0,75 E \left(\frac{r}{l} \right)^{0,5} \left(\frac{t}{r} \right)^{1,25} \quad (5.50)$$

Dabei ist

t die Dicke des dünnsten Schusses der Schale;

l die Höhe zwischen Versteifungsringen oder gehaltenen Rändern.

(3) Ein Versteifungsring, der für einen schubbeulgefährdeten Abschnitt einen gehaltenen Rand darstellen soll, sollte um seine Achse für Umfangsbiegung eine Biegesteifigkeit EI_z von mindestens

$$EI_{z, \min} = k_s E t^3 \sqrt{r l} \quad (5.51)$$

haben, wobei die Größen l und t zur kritischsten Beulform nach Absatz (2) gehören.

ANMERKUNG Der Wert von k_s darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es wird ein Wert von $k_s = 0,10$ empfohlen.

(4) Wenn die Schubbeanspruchung τ innerhalb des Tragwerkes linear mit der Höhe variiert, darf die ideale Schubbeulspannung am Punkt des größten Schubs wie folgt erhöht werden:

$$\tau_{x\theta, Rcr} = 1,4 E \left(\frac{r}{l_0} \right)^{0,5} \left(\frac{t}{r} \right)^{1,25} \quad (5.52)$$

wobei l_0 wie folgt zu bestimmen ist:

$$l_0 = \frac{\tau_{x\theta, Ed, \max}}{\left(\frac{d\tau_{x\theta, Ed}}{dx} \right)} \quad (5.53)$$

Dabei ist $\left(\frac{d\tau_{x\theta, Ed}}{dx} \right)$ der axiale Gradient der Schubveränderlichkeit mit der Höhe, gemittelt über den entsprechenden Abschnitt, und $\tau_{x\theta, Ed, \max}$ ist der Spitzenwert der Schubspannung. Für Tragwerke, bei denen die Länge l_0 größer als ihre Höhe ist, sollte diese Regel nicht angewendet werden; stattdessen sollte die Schale, wie in (2) beschrieben, als durch konstanten Membranschub beansprucht behandelt werden.

(5) Für lokale Schubspannungen, die aus der Schubkrafteinleitung von lokalen Auflagern und Last tragenden axialen Steifen in die Schale entstehen, darf die zum Größtwert der Schubspannung korrespondierende ideale Schubbeulspannung wie folgt angesetzt werden:

$$\tau_{x\theta, Rcr} = 1,4 E \left(\frac{r}{l_0} \right)^{0,5} \left(\frac{t}{r} \right)^{1,25} \quad (5.54)$$

Hierfür ist l_0 wie folgt zu bestimmen:

$$\boxed{\text{AC}} \quad l_0 = \frac{\tau_{x\theta, Ed, \max}}{d\tau_{x\theta, Ed} / dy} \quad \boxed{\text{AC}} \quad (5.55)$$

Dabei ist $\left(\frac{d\tau_{x\theta, Ed}}{dy} \right)$ der Umfangsgradient der Schubveränderlichkeit mit der Entfernung von der Steife, gemittelt über den entsprechenden Abschnitt, und $t_{x\theta, Ed, \max}$ ist der Spitzenwert der Schubspannung.

(6) Die Bemessungs-Schubbeulspannung sollte als der kleinere der beiden folgenden Werte bestimmt werden:

$$\tau_{x\theta, Rd} = \alpha_\tau \tau_{x\theta, Rcr} / \gamma_{M1} \quad (5.56)$$

und

$$\tau_{x\theta, Rd} = 0,57 f_y / \gamma_{M1} \quad (5.57)$$

Dabei ist

α_τ der elastische Imperfektions-Abminderungsfaktor für Schubbeulen;

γ_{M1} der in 2.9.2 angegebene Teilsicherheitsbeiwert.

ANMERKUNG Der Wert von α_τ darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es wird ein Wert von $\alpha_\tau = 0,80$ empfohlen.

(7) Die Bemessungsmembrankräfte sollten an jeder Stelle des Tragwerks folgende Bedingung erfüllen:

$$n_{x\theta, Ed} \leq t \tau_{x\theta, Rd} \quad (5.58)$$

5.3.2.7 Interaktionen zwischen Meridiandruck-, Umfangsdruck- und Membranschubbeanspruchung

(1) Wenn der Spannungszustand in der Silowand signifikante Anteile von mehr als einer Membrandruck- oder -schubspannung enthält, sollte ein Interaktionsnachweis nach EN 1993-1-6 geführt werden.

(2) Auf den Interaktionsnachweis darf verzichtet werden, wenn alle bis auf eine der drei beulrelevanten Membranspannungskomponenten kleiner als 20 % der zugehörigen Bemessungsbeulspannung ist.

5.3.2.8 LS4: Ermüdung

(1) Bei Silos der Schadensfolgeklasse 3 sollte die Ermüdungssicherheit nach EN 1993-1-6 nachgewiesen werden.

(2) Bei Silos der Schadensfolgeklasse 2 braucht die Ermüdungssicherheit nur dann nachgewiesen zu werden, wenn innerhalb der Bemessungslbensdauer mehr als N_f Befüllungs- und Entleerungszyklen zu erwarten sind.

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

ANMERKUNG Der Wert von N_f darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es wird ein Wert von $N_f = 10\,000$ empfohlen.

5.3.2.9 LS2: Zyklisches Plastizieren

(1) Bei Silos der Schadensfolgeklasse 3 sollte der Nachweis gegen zyklisches Plastizieren nach EN 1993-1-6 geführt werden. In Frage kommende Nachweisstellen sind Diskontinuitäten, örtliche Ringsteifen und Anschlusssteile.

(2) Bei Silos der anderen Schadensfolgeklassen darf auf diesen Nachweis verzichtet werden.

5.3.3 Isotrope Wände mit Vertikalsteifen

5.3.3.1 Allgemeines

(1) Bei isotropen Wänden, die mit Vertikalsteifen (Längssteifen) versehen sind, sollte der Zwängungseinfluss der Wandverkürzung infolge von Innendruck bei der Ermittlung der vertikalen Druckbeanspruchung der Wand und der Steifen berücksichtigt werden.

(2) Für die Bemessungswerte der vorhandenen Spannungen und der Widerstände und für die Nachweise gilt 5.3.2, aber mit den nachfolgend wiedergegebenen zusätzlichen Regeln.

5.3.3.2 LS1: Plastische Grenze oder Zugbruch

(1) Der Nachweis gegen Zugbruch in einer vertikalen Schweißnaht sollte wie für eine unversteifte isotrope Schale geführt werden (5.3.2).

(2) Wenn ein vertikaler Stoß so ausgebildet ist, dass die Steife zur Übertragung von Umfangszugkräften mit herangezogen wird, sollte dies bei der Ermittlung der in dieser Steife wirkenden Beanspruchung und bei der Beurteilung ihrer Anfälligkeit für Zugbruch in Umfangsrichtung berücksichtigt werden.

5.3.3.3 LS3: Beulen unter Axialdruckbeanspruchung

(1) Der Beulsicherheitsnachweis sollte wie für eine unversteifte Wand geführt werden, wenn der Steifenabstand nicht kleiner ist als $2\sqrt{rt}$, wobei t die örtliche Wanddicke ist.

(2) Bei Vertikalsteifen in kleinerem Abstand als $2\sqrt{rt}$ sollte der Beulsicherheitsnachweis für die gesamte Wand entweder konservativ nach Absatz (1) oder numerisch gestützt durch globale Berechnung nach EN 1993-1-6 geführt werden.

(3) Die axiale Drucktragfähigkeit der Steifen selbst sollte nach den Regeln von EN 1993-1-1 oder EN 1993-1-3 (kaltprofilierter stählerne Bauteile) oder EN 1993-1-5 nachgewiesen werden.

(4) Die Exzentrizität zwischen Steife und Schalenwand sollte gegebenenfalls berücksichtigt werden.

5.3.3.4 LS3: Beulen unter Außendruck – Teilvakuum und/oder Windlast

(1) Sofern keine genauere Berechnung erforderlich ist, sollte der Beulsicherheitsnachweis wie für eine unversteifte Wand geführt werden.

(2) Bei einer genaueren Berechnung dürfen die vertikalen Steifen verschmiert werden, so dass der Beulsicherheitsnachweis für eine orthotrope Schale nach 5.3.4.5 mit $C_\phi = C_\theta = Et$ und $C_{\phi\theta} = 0,38 Et$ geführt werden kann.

5.3.3.5 LS3: Beulen unter Membranschubbeanspruchung

(1) Wenn größere Teile einer Silowand unter Membranschubbeanspruchung stehen (z. B. aus exzentrischem Befüllen, aus Erdbebenbelastung usw.), sollte der Beulsicherheitsnachweis wie für eine isotrope unverteifte Schale geführt werden (siehe 5.3.2.6), jedoch mit gegebenenfalls durch die Steifen erhöhtem rechnerischem Beulwiderstand. Zu diesem Zweck darf als effektive Schalenlänge ℓ der kleinere Wert aus der Höhe zwischen Versteifungsringen oder gehaltenen Rändern und dem Zweifachen des horizontalen Abstandes der Vertikalsteifen angesetzt werden, vorausgesetzt, die Steifen haben um ihre Querschnittsachse für Meridianbiegung (d. h. um ihre Querschnittsachse in Umfangsrichtung) eine Biegesteifigkeit EI_y von mindestens

$$EI_{y,\min} = k_s E t^3 \sqrt{r\ell} \quad (5.59)$$

wobei die Größen ℓ und t dieselben sind wie bei der kritischsten Beulform.

ANMERKUNG Der Wert von k_s darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es wird ein Wert von $k_s = 0,10$ empfohlen.

(2) Endet eine diskrete Vertikalsteife abrupt innerhalb der Schalenwand, so sollte die Steifenkraft rechnerisch gleichmäßig über eine Höhe von nicht mehr als $k_t \sqrt{rt}$ in die Schale eingeleitet werden.

ANMERKUNG Der Wert von k_t darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es wird ein Wert von $k_t = 4,0$ empfohlen.

(3) Der Schubbeulwiderstand für die lokale Schubübertragung aus einer Steife in die Schale nach Absatz (2) sollte nicht größer angesetzt werden, als in 5.3.2.6 für linear veränderlichen Schub angegeben.

5.3.4 Horizontal profilierte Wände

5.3.4.1 Allgemeines

(1) Bei allen Berechnungen sollte die Blechdicke ohne Überzüge und Beschichtungen (Stahlkerndicke) und ohne Toleranzen angesetzt werden.

(2) Die Mindest-Stahlkerndicke von Profilblechen in Silowänden sollte die Anforderungen von EN 1993-1-3 erfüllen. Im Falle geschraubter Verbindungen sollten die Schrauben mindestens Größe M 8 haben.

(3) In horizontal profilierten zylindrischen Silowänden mit Vertikalsteifen sollten der profilierten Wand rechnerisch keine vertikalen Lasten zugewiesen werden, es sei denn, sie wird als orthotrope Schale nach 5.3.4.3.3 behandelt.

(4) Es sollte besonders darauf geachtet werden, dass die Vertikalsteifen bezüglich Meridianbiegung rechtwinklig zur Wand kontinuierlich ausgebildet werden; das ist wichtig für den Beulwiderstand sowohl unter Wind und/oder Teilvakuum als auch bei fließendem Schüttgut.

(5) Die Verbindungsmittel zwischen Steifen und Blech in vertikal versteiften, horizontal profilierten Wänden sollten für die Schubübertragung der Wandreibungslasten aus dem Schüttgut in die Steifen bemessen werden. Die Blechdicke sollte so gewählt werden, dass örtliches Zugbruchversagen an diesen Verbindungsmitteln verhindert wird, wobei auch die reduzierte Lochleibungstragfähigkeit an Verbindungen in Profilblechen zu beachten ist.

(6) Für die Bemessungswerte der vorhandenen Spannungen und der Widerstände und für die Nachweise gilt 5.3.2, aber mit den in den vorstehenden Absätzen (1) bis (5) wiedergegebenen zusätzlichen Regeln.

AC gestrichener Text AC

ANMERKUNG AC gestrichener Text AC Gebräuchliche Steifenformen sind in Bild 5.3 dargestellt.

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

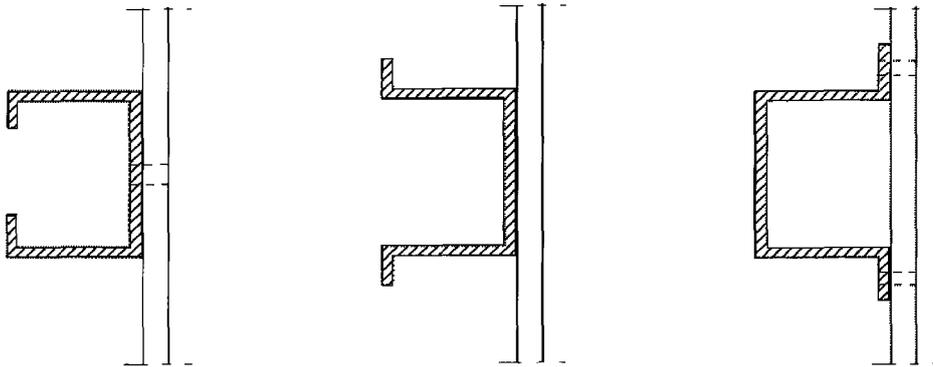
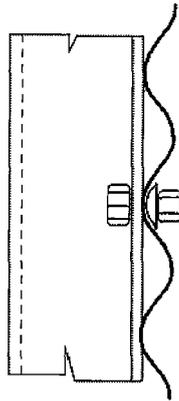


Bild 5.3 — Gebräuchliche Querschnitte von Vertikalsteifen in horizontal profilierten Siloschalen

5.3.4.2 LS1: Plastische Grenze oder Zugbruch

- (1) Die Schrauben an den Stößen zwischen den Blechsegmenten sollten die Anforderungen von EN 1993-1-8 erfüllen.
- (2) Die Stoßausbildung sollte auch den Anforderungen von EN 1993-1-3 für zug- oder druckbeanspruchte Verbindungen entsprechen.
- (3) Die Abstände zwischen den Verbindungsmitteln in Umfangsrichtung sollten nicht größer als 3° sein.

ANMERKUNG Eine typische Schraubenanordnung für eine Wellblechtafel ist in Bild 5.4 dargestellt.

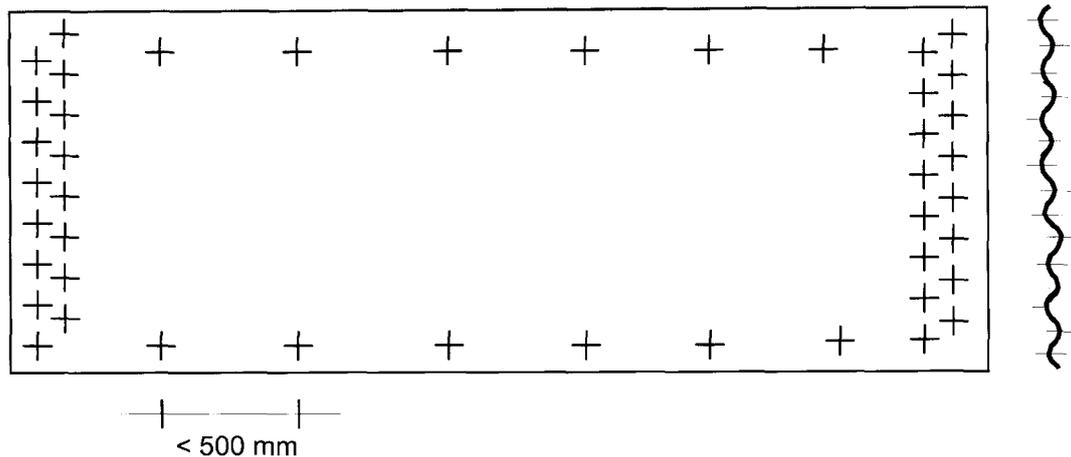


Bild 5.4 — Typische Schraubenanordnung in einer Tafel für ein Wellblechsiloband

(4) An Wanddurchbrüchen für Luken, Türen, Bohrer oder andere Vorrichtungen sollte örtlich ein dickeres Wellblech vorgesehen werden, damit die durch Steifigkeitsabweichungen verursachten Spannungserhöhungen nicht zu lokalen Rissen führen.

5.3.4.3 LS3: Beulen unter Axialdruckbeanspruchung

5.3.4.3.1 Allgemeines

(1) Der Bemessungswiderstand gegen Axialdruckbeulen sollte für alle Punkte des Tragwerks ermittelt werden, und zwar unter Berücksichtigung der vorgeschriebenen Herstelltoleranz-Qualitätsklasse, der Größe des garantiert gleichzeitig wirkenden Innendrucks p und der Ungleichmäßigkeit der Axialdruckbeanspruchung in Umfangsrichtung.

(2) Für den Beulsicherheitsnachweis einer horizontal profilierten Wand mit Vertikalsteifen stehen zwei alternative Berechnungsmodelle zur Verfügung:

- a) Beulen einer orthotropen Ersatzschale (nach 5.3.4.3.3), falls der horizontale Abstand zwischen den Steifen die Bedingung 5.3.4.3.3 (2) erfüllt;
- b) Knicken der einzelnen Steifen (die profilierte Wand nimmt zwar voraussetzungsgemäß keine Axialkräfte auf, stützt aber die Steifen) nach 5.3.4.3.4, falls der horizontale Abstand zwischen den Steifen die Bedingung 5.3.4.3.3 (2) nicht erfüllt.

5.3.4.3.2 Unversteifte Wand

(1) Für eine horizontal profilierte Wand ohne Vertikalsteifen sollte der charakteristische Wert des lokalen plastischen Beulwiderstandes als der größere der beiden folgenden Werte bestimmt werden:

$$n_{x,Rk} = \frac{t^2 f_y}{2d} \quad (5.60)$$

und

$$n_{x,Rk} = R_{\phi} \frac{t}{r} f_y \quad (5.61)$$

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

Dabei ist

- t die Blechdicke;
- d die Bruttoprofilhöhe von Kuppe zu Kuppe (Wellental zu Wellenberg);
- R_ϕ der örtliche Radius der Profilierung (siehe Bild 4.2);
- r der Zylinderradius.

Der lokale plastische Beulwiderstand $n_{x,Rk}$ sollte unabhängig vom Wert des Innendruckes p_n angesetzt werden.

ANMERKUNG Der lokale plastische Beulwiderstand beschreibt den Widerstand der Profilierung gegen Kollaps oder Zusammenfallen.

(2) Der Membrankraftwiderstand als Bemessungswert des lokalen plastischen Beulwiderstandes sollte wie folgt bestimmt werden:

$$n_{x,Rd} = \alpha_x n_{x,Rk} / \gamma_{M0} \quad (5.62)$$

Dabei ist

- α_x der elastische Imperfektions-Abminderungsfaktor für Axialbeulen;
- γ_{M0} der in 2.9.2 angegebene Teilsicherheitsbeiwert.

ANMERKUNG Der Wert von α_x darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es wird ein Wert von $\alpha_x = 0,80$ empfohlen.

(3) Die Bemessungsmembrankräfte sollten an allen Punkten des Tragwerks die folgende Bedingung erfüllen:

$$n_{x,Ed} \leq n_{x,Rd} \quad (5.63)$$

5.3.4.3.3 Versteifte Wand – als orthotrope Schale behandelt

(1) In die Berechnung einer versteiften Wellblechwand als orthotrope Schale (Berechnungsmodell (a) in 5.3.4.3.1) sind für das Profilblech (Wellblech) die orthotropen Ersatzsteifigkeiten der verschiedenen Richtungen nach 4.4 einzuführen. Die verschmierten Steifigkeiten sollten als gleichmäßig verteilt angesetzt werden. Als Ersatz-Schalenmittelfläche sollte die Achse des Wellblechquerschnitts angesetzt werden, von der aus die Well-Amplitude gemessen wird (siehe Bild 4.2).

(2) Der horizontale Abstand d_s zwischen den Steifen sollte nicht größer sein als

$$d_{s,max} = k_{dx} \left(\frac{r^2 D_y}{C_y} \right)^{0,25} \quad (5.64)$$

Dabei ist

- D_y die Ersatz-Biegesteifigkeit des dünnsten Bleches je Längeneinheit parallel zur Profilierung;
- C_y die Ersatz-Dehnsteifigkeit des dünnsten Bleches je Längeneinheit parallel zur Profilierung;
- r der Zylinderradius.

ANMERKUNG Der Wert von k_{dx} darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es wird ein Wert von $k_{dx} = 7,4$ empfohlen.

(3) Die ideale Beulmembrankraft $n_{x,Rcr}$ je Umfangslängeneinheit der orthotropen Schale (Verfahren (a) nach 5.3.4.3) sollte auf jeder Höhenkote des Silos durch Minimierung des nachstehenden Formelausdrucks nach Umfangswellenzahl j und Beulhöhe ℓ_i ermittelt werden.

$$n_{x,Rcr} = \frac{1}{j^2 \omega^2} \left(A_1 + \frac{A_2}{A_3} \right) \quad (5.65)$$

mit:

$$A_1 = j^4 [\omega^4 C_{44} + 2\omega^2 (C_{45} + C_{66}) + C_{55}] + C_{22} + 2j^2 C_{25} \quad (5.66)$$

$$A_2 = 2\omega^2 (C_{12} + C_{33}) (C_{22} + j^2 C_{25}) (C_{12} + j^2 \omega^2 C_{14}) - (\omega^2 C_{11} + C_{33}) (C_{22} + j^2 C_{25})^2 - \omega^2 (C_{22} + \omega^2 C_{33}) (C_{12} + j^2 \omega^2 C_{14})^2 \quad (5.67)$$

$$A_3 = (\omega^2 C_{11} + C_{33}) (C_{22} + C_{25} + \omega^2 C_{33}) - \omega^2 (C_{12} + C_{33})^2 \quad (5.68)$$

mit:

$$C_{11} = C_{\phi} + EA_s I_{d_s}$$

$$C_{22} = C_{\theta} + EA_r I_{d_r}$$

$$C_{12} = \nu \sqrt{C_{\phi} C_{\theta}}$$

$$C_{33} = C_{\phi\theta}$$

$$C_{14} = e_s EA_s I / (r d_s)$$

$$C_{25} = e_r EA_r / (r d_r)$$

$$C_{44} = [D_{\phi} + EI_s I_{d_s} + EA_s e_s^2 I_{d_s}] / r^2$$

$$C_{55} = [D_{\theta} + EI_r I_{d_r} + EA_r e_r^2 I_{d_r}] / r^2$$

$$C_{45} = \nu \sqrt{D_{\phi} D_{\theta}} / r^2$$

$$C_{66} = [D_{\phi\theta} + 0,5(GI_{ts} I_{d_s} + GI_{tr} I_{d_r})] / r^2$$

$$\omega = \frac{\pi r}{j \ell_i}$$

Dabei ist

- ℓ_i die Halbwellenlänge der potenziellen Beule in vertikaler Richtung;
- A_s die Querschnittsfläche einer Längssteife (Vertikalsteife);
- I_s das Flächenmoment 2. Grades (Trägheitsmoment) einer Längssteife um ihre Querschnittsachse in Umfangsrichtung (Meridianbiegung);
- d_s der Abstand zwischen Längssteifen;
- I_{ts} das St.Venant'sche Torsionsträgheitsmoment einer Längssteife;
- e_s die Exzentrizität (nach außen) einer Längssteife, bezogen auf die Schalenmittelfläche;
- A_r die Querschnittsfläche einer Ringsteife (Horizontalsteife);
- I_r das Flächenmoment 2. Grades (Trägheitsmoment) einer Ringsteife um ihre vertikale Querschnittsachse (Umfangsbiegung);
- d_r der Abstand zwischen Ringsteifen;
- I_{tr} das St.Venant'sche Torsionsträgheitsmoment einer Ringsteife;
- e_r die Exzentrizität (nach außen) einer Ringsteife, bezogen auf die Schalenmittelfläche;

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

- C_ϕ die Ersatz-Dehnsteifigkeit des Wellbleches in Axialrichtung (siehe 4.4 (5) und (7));
 C_θ die Ersatz-Dehnsteifigkeit des Wellbleches in Umfangsrichtung (siehe 4.4 (5) und (7));
 $C_{\phi\theta}$ die Ersatz-Schubsteifigkeit des Wellbleches (siehe 4.4 (5) und (7));
 D_ϕ die Ersatz-Biegesteifigkeit des Wellbleches in Axialrichtung (siehe 4.4 (6) und (7));
 D_θ die Ersatz-Biegesteifigkeit des Wellbleches in Umfangsrichtung (siehe 4.4 (6) und (7));
 $D_{\phi\theta}$ die Ersatz-Drillsteifigkeit des Wellbleches (siehe 4.4 (6) und (7));
 r der Radius des Silozylinders.

ANMERKUNG 1 Die vorstehenden Querschnittsgrößen für die Steifen (A , I , I_t usw.) beziehen sich allein auf den Steifenquerschnitt. Eine Berücksichtigung von mitragenden Anteilen der Schalenwand ist nicht möglich.

ANMERKUNG 2 Der untere Rand der Beule kann dort angenommen werden, wo entweder die Blechdicke oder der Steifenquerschnitt wechselt. Der Beulwiderstand jedes Abschnittes zwischen solchen Wechselstellen ist unabhängig zu überprüfen.

(5) Der Membrankraftwiderstand $n_{x,Rd}$ als Bemessungswert des Axialbeulwiderstandes der orthotropen Schale (Berechnungsmodell (a) in 5.3.4.3.1) sollte als der kleinere der beiden folgenden Werte bestimmt werden:

$$n_{x,Rd} = \alpha_x n_{x,Rcr} / \gamma_{M1} \quad (5.69)$$

und

$$\boxed{AC} \quad n_{x,Rd} = A_{eff} f_y / (d_s \gamma_{m0}) \quad \boxed{AC} \quad (5.70)$$

Dabei ist

α_x der elastische Imperfektions-Abminderungsfaktor für Axialbeulen;

γ_{M1} der in 2.9.2 angegebene Teilsicherheitsbeiwert;

$\boxed{AC} \quad d_s$ der Abstand zwischen den Längssteifen;

A_{eff} die effektive Querschnittsfläche der Längssteifen. \boxed{AC}

ANMERKUNG Der Wert von α_x darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es wird ein Wert von $\alpha_x = 0,80$ empfohlen.

(6) Die Bemessungsmembrankräfte sollten an allen Punkten des Tragwerks die folgende Bedingung erfüllen:

$$n_{x,Ed} \leq n_{x,Rd} \quad (5.71)$$

5.3.4.3.4 Versteifte Wand – als Reihe Axialkraft tragender Längssteifen behandelt

(1) Wird eine versteifte Wellblechwand unter der Annahme berechnet, dass das Blech keine Axialkräfte trägt (Berechnungsmodell (b) in 5.3.4.3.1), so darf aber angenommen werden, dass es alle Knickverformungen der Steifen in Wandebene verhindert. Der Knickwiderstand der Steifen kann dann alternativ auf zweierlei Weise ermittelt werden:

a) Die Stützwirkung des Bleches für Knickverformungen der Steifen rechtwinklig zur Wand wird vernachlässigt.

b) Die elastische Stützwirkung durch die Steifigkeit des Bleches für Knickverformungen rechtwinklig zur Wand wird berücksichtigt.

(2) Bei Vorgehensweise (a) in Absatz (1) erhält man als Bemessungswert des Widerstandes einer einzelnen Steife unter planmäßig zentrischem Druck ihre Bemessungs-Knicknormalkraft:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}} \quad (5.72)$$

Dabei ist

A_{eff} die effektive Querschnittsfläche der Steife.

Der Abminderungsfaktor χ sollte aus EN 1993-1-1 für Biegeknicken rechtwinklig zur Wand (um die Querschnittsachse in Umfangsrichtung) ermittelt werden; dabei ist, unabhängig vom verwendeten Steifenquerschnitt, die Knickkurve c zu Grunde zu legen (Imperfektionsfaktor $\alpha = 0,49$). Als Knicklänge zur Ermittlung des Abminderungsfaktors χ sollte der Abstand zwischen benachbarten Ringsteifen angesetzt werden.

(3) Soll nach Vorgehensweise (b) in Absatz (1) die elastische Stützwirkung durch die Wand für das Knicken der Steife in Anspruch genommen werden, so sollten die beiden folgenden Bedingungen eingehalten werden:

- a) Als unterstützender Wandabschnitt gilt die Breite zwischen den beiden benachbarten Steifen, an diesen gelenkig gelagert angenommen (siehe Bild 5.5).
- b) Eine mögliche Unterstützung durch die Steifigkeit des Schüttgutes sollte nicht in Anspruch genommen werden.

(4) Wenn keine genauere Berechnung durchgeführt wird, sollte die Bemessungs-Knicknormalkraft $N_{b,Rd}$ unter Annahme konstanten zentrischen Drucks als der kleinere der folgenden beiden Werte berechnet werden:

$$N_{b,Rd} = 2 \frac{\sqrt{EI_y K}}{\gamma_{M1}} \quad (5.73)$$

$$N_{b,Rd} = \frac{A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}} \quad (5.74)$$

Dabei ist

EI_y die Biegesteifigkeit der Steife für Biegung rechtwinklig zur Wand (Nmm^2);

K die Federsteifigkeit des Wandbleches (N/mm je mm Wandhöhe), zwischen Vertikalsteifen gespannt, wie in Bild 5.5 dargestellt;

A_{eff} die effektive Querschnittsfläche der Steife.

(5) Die Federsteifigkeit K des Wandbleches sollte unter der Annahme ermittelt werden, dass es als Einfeldplatte zwischen den auf jeder Seite benachbarten Vertikalsteifen gespannt und dort gelenkig gelagert ist, siehe Bild 5.5. Der Wert von K darf wie folgt geschätzt werden:

$$K = k_s \frac{D_y}{d_s^3} \quad (5.75)$$

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

Dabei ist

- D_y die Ersatz-Biegesteifigkeit des Wandbleches in Umfangsrichtung;
- d_s der Abstand der Vertikalsteifen.

Für profilierte Bleche mit Bogen-Tangenten-Profil oder mit Sinusprofil (Wellbleche) kann der Wert von D_y aus 4.4 (6) entnommen werden. Für andere Profilierungen sollte die Ersatz-Biegesteifigkeit für Umfangsbiegung nach den mechanischen Grundregeln ermittelt werden.

ANMERKUNG Der Wert von k_s darf im nationalen Anhang festgelegt werden. Es wird ein Wert von $k_s = 6$ empfohlen.

(6) Die Bemessungs-Normalkräfte sollten an jedem Punkt der Steifen die folgende Bedingung erfüllen:

$$N_{b,Ed} \leq N_{b,Rd} \quad (5.76)$$

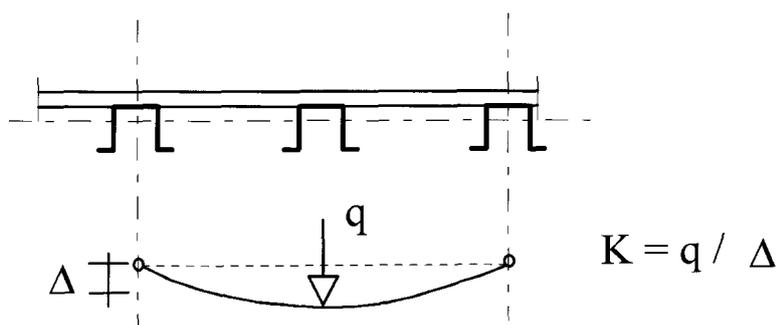


Bild 5.5 — Ermittlung der Stütz-Federsteifigkeit gegen Biegeknicen der Längssteife rechtwinklig zur Wand

5.3.4.4 Beulen und Biegedrillknicken der Steifen

(1) Der Nachweis der Steifen gegen lokales Beulen, Gesamtbeulen und Biegedrillknicken sollte nach EN 1993-1-3 (kaltprofilierter dünnwandige Bauteile) geführt werden.

5.3.4.5 LS3: Beulen unter Außendruck – Teilvakuum und/oder Wind

- (1) Die Ersatz-Dehn- und Biegesteifigkeiten der Wandbleche sollten nach 4.4 ermittelt werden.
- (2) Die Querschnittsgrößen der Ring- und Längssteifen für Biege- und Normalkraftbeanspruchung, die Exzentrizitäten zwischen den Steifenachsen und der Schalenmittelfläche sowie der Steifenabstand d_s sollten ebenfalls ermittelt werden.
- (3) Der horizontale Abstand d_s zwischen den Steifen sollte nicht größer sein als

$$d_{s,max} = k_{d\theta} \left(\frac{r^2 D_y}{C_y} \right)^{0,25} \quad (5.77)$$

Dabei ist

- D_y die Ersatz-Biegesteifigkeit des dünnsten Bleches je Längeneinheit parallel zur Profilierung;
- C_y die Ersatz-Dehnsteifigkeit des dünnsten Bleches je Längeneinheit parallel zur Profilierung;
- r der Zylinderradius.

ANMERKUNG Der Wert von $k_{d\theta}$ darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es wird ein Wert von $k_{d\theta} = 7,4$ empfohlen.

(4) Der ideale Außenbeuldruck $p_{n,Rcr}$ sollte durch Minimierung des nachfolgenden Formelenausdruckes nach der idealen Umfangswellenzahl j ermittelt werden.

$$p_{n,Rcr} = \frac{1}{r j^2} \left(A_1 + \frac{A_2}{A_3} \right) \quad (5.78)$$

mit:

$$A_1 = j^4 [\omega^4 C_{44} + 2\omega^2 (C_{45} + C_{66}) + C_{55}] + C_{22} + 2j^2 C_{25} \quad (5.79)$$

$$A_2 = 2\omega^2 (C_{12} + C_{33}) (C_{22} + j^2 C_{25}) (C_{12} + j^2 \omega^2 C_{14}) - (\omega^2 C_{11} + C_{33}) (C_{22} + j^2 C_{25})^2 - \omega^2 (C_{22} + \omega^2 C_{33}) (C_{12} + j^2 \omega^2 C_{14})^2 \quad (5.80)$$

$$A_3 = (\omega^2 C_{11} + C_{33}) (C_{22} + C_{25} + \omega^2 C_{33}) - \omega^2 (C_{12} + C_{33})^2 \quad (5.81)$$

mit:

$$C_{11} = C_\phi + EA_s/d_s \quad C_{22} = C_\theta + EA_r/d_r$$

$$C_{12} = \nu \sqrt{C_\phi C_\theta} \quad C_{33} = C_{\phi\theta}$$

$$C_{14} = e_s EA_s / (rd_s) \quad C_{25} = e_r EA_r / (rd_r)$$

$$C_{44} = [D_\phi + EI_s/d_s + EA_s e_s^2 / d_s] / r^2 \quad C_{55} = [D_\theta + EI_r/d_r + EA_r e_r^2 / d_r] / r^2$$

$$C_{45} = \nu \sqrt{D_\phi D_\theta} / r^2 \quad C_{66} = [D_{\phi\theta} + 0,5(GI_{ts}/d_s + GI_{tr}/d_r)] / r^2$$

$$\omega = \frac{\pi r}{j \ell_i}$$

worin ℓ_i , r , A_s , I_s , I_{ts} , d_s , e_s , A_r , I_r , I_{tr} , d_r und e_r dieselbe Bedeutung haben wie in 5.3.4.3.3 (3).

(5) Ist der Steifenquerschnitt oder die Blechdicke mit der Höhe veränderlich, so sollten mehrere potenzielle Beullängen ℓ_i untersucht werden, um die kritischste herauszufinden; dabei ist stets das obere Ende der potenziellen Beule am oberen Rand des dünnsten Blechsches anzunehmen.

ANMERKUNG Wenn oberhalb des dünnsten Blechsches noch ein Bereich mit dickerem Blech liegt, kann das obere Ende der potenziellen Beule nicht nur am oberen Rand des dünnsten Blechsches liegen, sondern auch am oberen Rand der Wand.

(6) Wenn keine genauere Berechnung durchgeführt wird, sollte in die vorstehende Berechnung als Blechdicke stets die Dicke des dünnsten Blechsches eingeführt werden.

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

(7) Bei Silos ohne Dach unter Windlast sollte der vorstehend berechnete Beuldruck mit dem Faktor 0,6 reduziert werden.

(8) Der Bemessungswert des Außenbeuldruckes der versteiften Wand sollte nach dem in 5.3.2.5 angegebenen Verfahren ermittelt werden, mit $C_b = C_w = 1,0$ und $\alpha_n = 0,5$ sowie dem idealen Beuldruck $p_{n,Rcrit}$ aus dem oben stehenden Absatz (4).

5.3.4.6 LS3: Beulen unter Membranschubbeanspruchung

(1) Der Beulsicherheitsnachweis unter Membranschubbeanspruchung sollte nach den Regeln von EN 1993-1-6 geführt werden.

5.3.5 Vertikal profilierte Wände mit Ringsteifen

5.3.5.1 Allgemeines

(1) Bei zylindrischen Wänden aus Profilblechen (Wellblechen), deren Profilierung vertikal verläuft, sollten die folgenden beiden Bedingungen erfüllt sein:

a) Der profilierten Wand sollten rechnerisch keine horizontalen Kräfte (in Umfangsrichtung) zugewiesen werden.

b) Das profilierte Wandblech ist als durchlaufend von Ring zu Ring spannend anzunehmen.

(2) Die Blechstöße sollten so bemessen werden, dass die angenommene Biegekontinuität erreicht wird.

(3) Bei der Ermittlung der axialen Druckkräfte in der Wand aus Wandreibung des Silogutes sollte der volle Siloumfang unter Beachtung der Profilgeometrie berücksichtigt werden.

(4) Wenn das Profilblech bis zum Boden reicht, sollte die örtliche Biegebeanspruchung aus Randstörung beachtet werden, wobei eine radial unverschiebliche Lagerung anzunehmen ist.

(5) Für die Bemessungswerte der vorhandenen Spannungen und der Widerstände sowie für die Nachweise gilt 5.3.2, aber mit den nachfolgend in 5.3.5.2 bis 5.3.5.5 wiedergegebenen zusätzlichen Regeln.

5.3.5.2 LS1: Plastische Grenze oder Zugbruch

(1) Der profilierten Wand sollten rechnerisch keine Umfangskräfte zugewiesen werden.

(2) Der Abstand der Ringsteifen sollte aus einer Berechnung des Profilbleches als über die Ringe durchlaufenden Biegeträger ermittelt werden, wobei gegebenenfalls der Einfluss unterschiedlicher radialer Verformungen von Ringsteifen unterschiedlichen Querschnittes zu berücksichtigen ist. Die aus dieser Biegeberechnung resultierenden Spannungen sollten beim Beulsicherheitsnachweis für Axialdruckbeanspruchung den Normaldruckspannungen hinzuaddiert werden.

ANMERKUNG Die Meridianbiegebeanspruchung des Profilbleches kann ermittelt werden, indem man es als an den Ringen elastisch gestützten Durchlaufträger behandelt. Die Auflagerfedersteifigkeit ergibt sich dabei aus der Steifigkeit des Ringes gegenüber radialer Belastung.

(3) Die Ringsteifen sollten für die Aufnahme der horizontalen Belastung nach EN 1993-1-1 bzw. EN 1993-1-3 (kaltgeformte dünnwandige Bauteile) bemessen werden.

5.3.5.3 LS3: Beulen unter Axialdruckbeanspruchung

(1) Die Axialbeulspannung der Wand sollte nach den Bestimmungen von EN 1993-1-3 (kaltgeformte dünnwandige Bauteile) ermittelt werden, indem der Querschnitt des Profilbleches als Biegeknickstab betrachtet wird. Die Knicklänge sollte dabei nicht kleiner angenommen werden als der Abstand zwischen benachbarten Ringen.

5.3.5.4 LS3: Beulen unter Außendruck – Teilvakuum und/oder Wind

(1) Der Bemessungs-Außenbeuldruck der versteiften Wand sollte auf dieselbe Weise wie bei horizontal profilierten Wänden ermittelt werden (siehe 5.3.4.5), dabei ist jedoch die vertauschte Orientierung der Profilierung nach 4.4 (7) zu beachten.

5.3.5.5 LS3: Beulen unter Membranschubbeanspruchung

(1) Der Bemessungswert des Beulwiderstandes unter Membranschub sollte auf dieselbe Weise wie bei horizontal profilierten Wänden ermittelt werden, siehe 5.3.4.6.

5.4 Besondere Lagerungsbedingungen für zylindrische Silowände

5.4.1 Zylinderschalen mit voller Auflagerung am unteren Rand oder Lagerung auf einem Trägerrost

(1) Schalen, die an ihrem unteren Rand vollständig gleichmäßig (d. h. kontinuierlich) aufgelagert sind, brauchen nur für die Wandschnittgrößen bemessen zu werden, die sich unmittelbar aus den axialsymmetrischen Einwirkungen und Teilflächenbelastungen nach EN 1991-4 ergeben.

(2) Bei versteiften Wänden sollten die Vertikalsteifen am Fuß voll aufgelagert und mit dem Basisring verbunden sein.

5.4.2 Zylinderschalen mit Zargenlagerung

(1) Schalen, die auf Standzargen stehen (siehe Bild 5.6), gelten als kontinuierlich aufgelagert, wenn die Standzarge eine der beiden folgenden Bedingungen erfüllt:

- a) die Standzarge selbst ist vollständig gleichmäßig auf dem Fundament aufgelagert;
- b) die Blechdicke der Standzarge ist mindestens 20 % größer als die der Siloschale, und bei der Dimensionierung der Standzarge und ihrer Flansche wurden die in Abschnitt 8 angegebenen Regeln zur Bemessung von Ringträgern angewendet.

(2) Die Standzarge sollte für die axiale Druckbeanspruchung der Silowand, jedoch ohne die stabilisierende Wirkung des Innendruckes bemessen werden.

5.4.3 Zylinderschalen mit eingebundenen Stützen

(1) Schalen, die auf in die Zylinderwand einbindenden Einzelstützen stehen (siehe Bild 5.6 b)), sollten unter Berücksichtigung der Schnittgrößen aus dem Einfluss der Einzelkräfte bemessen werden, wenn sie zu Silos der Schadensfolgeklassen 2 und 3 gehören.

(2) Die Einbindelänge der Stützen sollte nach 5.4.6 bestimmt werden.

(3) Bei der Bestimmung der Rippenlänge sollte der Grenzzustand ‚Schubbeulen neben der Rippe‘ beachtet werden, siehe 5.3.2.6.

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

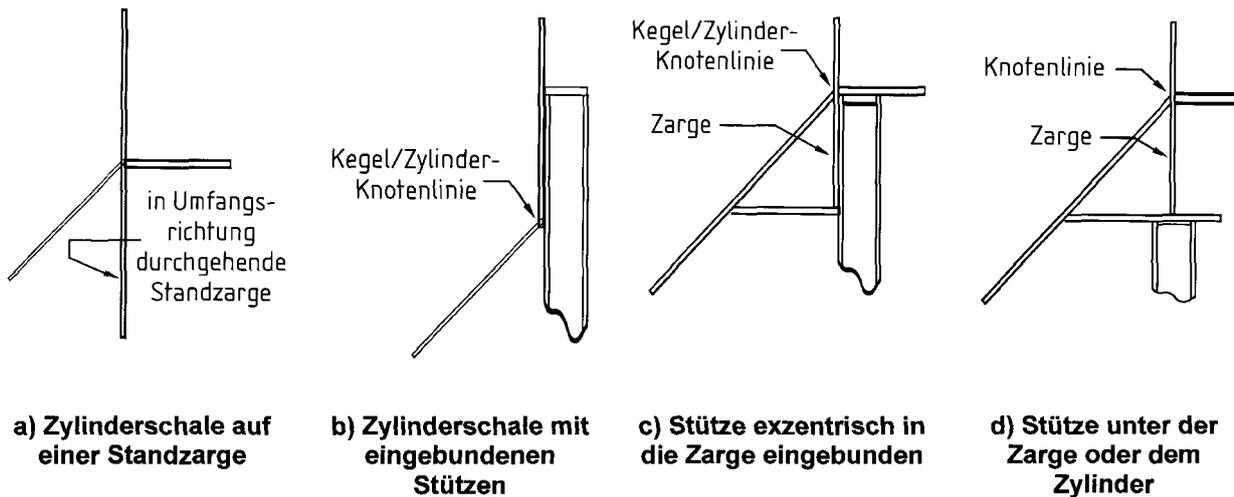


Bild 5.6 — Verschiedene Ausbildungen der Auflagerung eines Silos mit Trichter

5.4.4 Zylinderschalen mit diskreter Auflagerung

(1) Bei Schalen auf diskreten Stützen oder Auflagern sollten die Einflüsse der Einzelkräfte bei der Berechnung der Schalenschnittgrößen berücksichtigt werden, es sei denn, die Regeln in den Absätzen (2) und (3) erlauben, sie zu vernachlässigen.

(2) Wird die Schale nur mit Hilfe der Membrantheorie für axialsymmetrisch belastete Kreiszylinderschalen berechnet, so sollten alle vier folgenden Kriterien eingehalten werden:

- Das Radius-Dicken-Verhältnis r/t sollte nicht größer als $(r/t)_{\max}$ sein.
- Die Exzentrizität der Auflagerung unter der Schalenwand sollte nicht größer als $k_1 t$ sein.
- Die Zylinderwand sollte verformungsschlüssig mit einem Trichter verbunden sein, dessen Wanddicke an der Abzweigung nicht kleiner als $k_2 t$ ist.
- Die Breite jedes Auflagers sollte nicht geringer als $k_3 \sqrt{rt}$ sein.

ANMERKUNG Die Werte von $(r/t)_{\max}$, k_1 , k_2 und k_3 dürfen im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es werden folgende Werte empfohlen: $(r/t)_{\max} = 400$; $k_1 = 2,0$; $k_2 = 1,0$ und $k_3 = 1,0$.

(3) Wird die Schale nur mit Hilfe der Membrantheorie für axialsymmetrisch belastete Kreiszylinderschalen berechnet, so sollte außerdem **[AC]** eines der folgenden Kriterien **[AC]** eingehalten werden:

- Der obere Schalenrand sollte durch konstruktiv-kraftschlüssige Verbindung mit dem Dach in seiner kreisförmigen Form gesichert sein.
- Der obere Schalenrand sollte durch eine Randringsteife in seiner kreisförmigen Form gesichert sein, deren Biegesteifigkeit EI_z innerhalb der Kreisebene größer ist als

$$EI_{z,\min} = k_s E r t^3 \quad (5.82)$$

Hierin darf für t die Dicke des dünnsten Teiles der Wand angesetzt werden.

ANMERKUNG Der Wert von k_s darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es wird ein Wert von $k_s = 0,10$ empfohlen.

c) Die Schalenhöhe L sollte nicht kleiner sein als

$$L_{s,\min} = k_L r \sqrt{\left(\frac{r}{t}\right) \cdot \frac{1}{n(n^2 - 1)}} \quad (5.83)$$

Dabei ist

n die Anzahl der diskreten Auflager über den Schalenumfang.

ANMERKUNG Der Wert von k_L darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es wird ein Wert von $k_L = 4,0$ empfohlen.

(4) Bei Verwendung der linearen Schalenbiegetheorie oder bei einer noch genaueren Berechnung sollten die Einflüsse der örtlich hohen Spannungen über den Auflagern beim Beulsicherheitsnachweis gegen Axialdruckbeulen berücksichtigt werden, wie in 5.3.2.4 beschrieben.

(5) Die Auflagerkonstruktion sollte nach den Regeln in 5.4.5 bzw. 5.4.6 ausgebildet werden.

5.4.5 Silos mit diskreter Auflagerung am Trichter

(1) Liegt die nach oben verlängerte Achse des unterstützenden Bauteils um mehr als t innerhalb der Schalenmittelfläche der Zylinderschale, so sollte der Silo als am Trichter gelagert betrachtet werden.

(2) Ein am Trichter gelagerter Silo sollte den Regeln in Abschnitt 6 für die Bemessung von Trichtern entsprechen.

(3) Ein am Trichter gelagerter Silo sollte mit Hilfe der linearen Schalenbiegetheorie oder noch genauer berechnet werden. Die lokalen Biegeeinflüsse der Auflager und die meridionale Druckbeanspruchung im oberen Teil des Trichters sollten sowohl beim Nachweis gegen plastischen Kollaps als auch beim Nachweis gegen Beulen berücksichtigt werden; diese Nachweise sollten nach EN 1993-1-6 geführt werden.

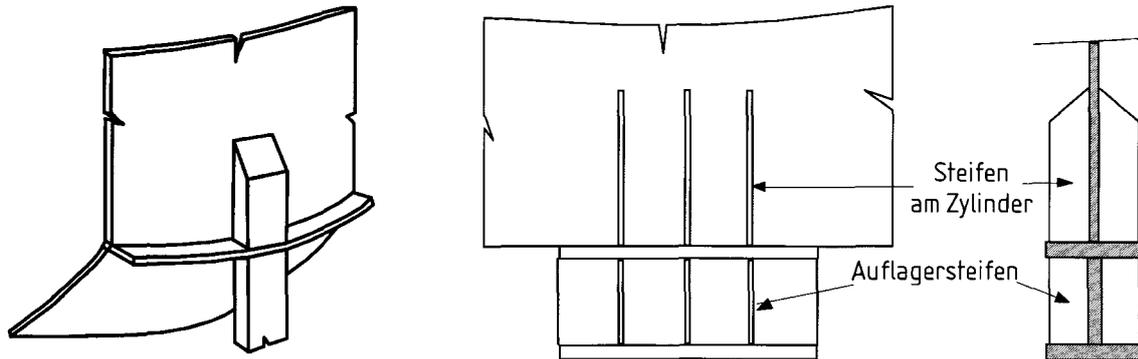
5.4.6 Zylindrische Silowände: Details für örtliche Auflager und Krafteinleitungsrippen

5.4.6.1 Örtliche Auflager unter der Zylinderwand

(1) Eine örtliche Auflagerkonsole für eine Zylinderwand sollte so dimensioniert sein, dass sie die Bemessungsauflegerkraft ohne lokale bleibende Verformungen in die Schalenwand einleiten kann.

(2) Die Auflagerung sollte so ausgebildet werden, dass sie für den Zylinderrand angemessene Verformungsbehinderungen (vertikal, in Umfangsrichtung, gegen meridionale Verdrehungen) liefert.

ANMERKUNG Einige mögliche Auflagerkonstruktionen sind in Bild 5.7 dargestellt.



Örtliches Auflager am Abzweigungsring
mit eingebundener Stütze

Mögliche Versteifungskonstruktion für eine zylindrische
Wand über hohen örtlichen Auflagerkräften

Bild 5.7 — Typische Auflagerdetails

(3) Bei der Festlegung der Einbindelänge sollte der Beulsicherheitsnachweis gegen Schubbeulen neben der eingebundenen Stütze beachtet werden, siehe 5.3.2.6.

(4) Bei diskreter Auflagerung ohne Ringträger sollte die Steife oberhalb jedes Auflagers

- a) entweder bis zur Dachtraufe reichen;
- b) oder mit einer Einbindelänge von mindestens L_{\min} eingebunden sein:

$$L_{\min} = 0,4 r \sqrt{\left(\frac{r}{t}\right) \cdot \frac{1}{n(n^2 - 1)}} \quad (5.84)$$

Dabei ist

n die Anzahl der diskreten Auflager über den Schalenumfang.

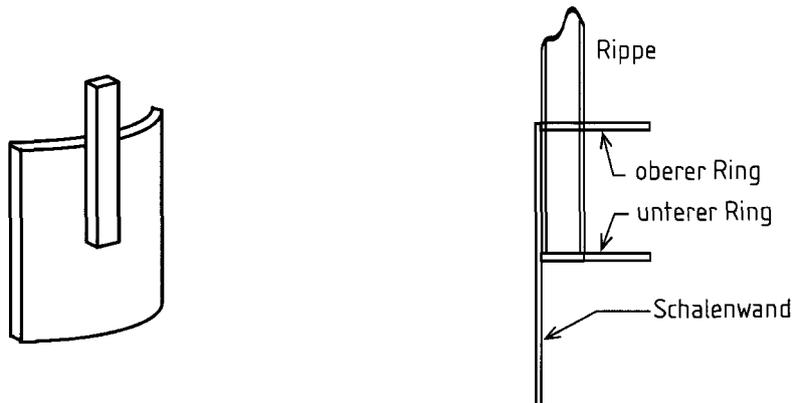
5.4.6.2 Örtliche Rippen zur Lasteinleitung in zylindrische Wände

(1) Eine örtliche Lasteinleitungsrippe für eine Zylinderwand sollte so dimensioniert sein, dass sie die Bemessungslast ohne lokale bleibende Verformungen in das Auflager und in die Schalenwand einleiten kann.

(2) Bei der Festlegung der Rippenlänge sollte der Beulsicherheitsnachweis gegen Schubbeulen neben der Rippe beachtet werden, siehe 5.3.2.6.

(3) Die Rippe sollte so ausgelegt werden, dass sie sich nicht verdrehen und damit lokale radiale Verformungen der Zylinderwand verursachen kann. Bei Bedarf sollten Versteifungsringe angeordnet werden, um radiale Verformungen zu verhindern.

ANMERKUNG Mögliche Lasteinleitungsstrukturen mit örtlichen Rippen sind in Bild 5.8 dargestellt.



Örtliche Rippe – ohne Ringe an die Zylinderwand angeschlossen

Örtliche Rippe – mit Versteifungsringen zur Verhinderung radialer Verformungen

Bild 5.8 — Typische Details von Lasteinleitungsrippen

5.4.7 Verankerung an der Basis eines Silos

(1) Bei der Bemessung der Verankerung sollte die Ungleichmäßigkeit der tatsächlichen Einwirkungen auf die Schalenwand in Umfangsrichtung berücksichtigt werden. Dabei sollte besonders auf die unter Windlast entstehenden, örtlich hohen Ankerkräfte geachtet werden.

ANMERKUNG Die Ankerkräfte werden bei Behandlung des Silos als vertikalen Kragträger unter globaler Biegung in der Regel unterschätzt.

(2) Der Ankerabstand sollte nicht größer sein als aufgrund der Bemessung des Basisringes erforderlich, siehe 8.5.3.

(3) Wenn keine genauere numerische Untersuchung angestellt wird, sollte die Verankerung für folgende abhebende Kraft $n_{x,Ed}$ je Umfangslängeneinheit ausgelegt werden:

$$n_{x,Ed} = p_{n,Edw} \left(\frac{L^2}{2r} \right) \left[C_1 + \sum_{m=2}^M m^2 C_m \left\{ 1 - \frac{3}{4} \left(\frac{a_1}{a_2 + a_3} \right) \right\} \right] \quad (5.85)$$

$$a_1 = 1 + 10,4 \left(\frac{r}{mL} \right)^2 \quad (5.86)$$

$$a_2 = 1 + 7,8 \left(\frac{r}{mL} \right)^2 \quad (5.87)$$

$$a_3 = 3 \frac{r^3 t}{I_z} \left(\frac{r}{L} \right)^3 \left(\frac{1}{m^4 (m^2 - 1)^2} \right) \quad (5.88)$$

Dabei ist

- $p_{n,Edw}$ der größte Bemessungsdruck (im Staumeridian) unter Windlast;
- L die Gesamthöhe der Schalenwand;
- t die mittlere Schalenwanddicke;

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

- I_z das Flächenmoment 2. Grades (Trägheitsmoment) der Ringsteife am oberen Zylinderrand um ihre vertikale Querschnittsachse (Umfangsbiegung);
- C_m die harmonischen Koeffizienten der Winddruckverteilung in Umfangsrichtung;
- M die höchste Harmonische in der Winddruckverteilung.

ANMERKUNG Die Werte der für die jeweiligen Bedingungen maßgeblichen harmonischen Koeffizienten des Winddrucks C_m dürfen im Nationalen Anhang festgelegt werden. Die folgenden Werte sind vereinfachte Empfehlungen für Silos der Klassen 1 und 2: $M = 4$; $C_1 = +0,25$; $C_2 = +1,0$; $C_3 = +0,45$ und $C_4 = -0,15$. Für Silos der Klasse 3 werden die in Anhang C angegebenen genaueren Verteilungen mit $M = 4$ für einzeln stehende Silos und $M = 10$ für in Gruppen angeordnete Silos empfohlen.

5.5 Detailausbildung von Öffnungen in zylindrischen Wänden

5.5.1 Allgemeines

(1) Öffnungen in der Silowandung sollten durch vertikale und horizontale Steifen neben den Öffnungsrändern verstärkt werden. Sitzen die Steifen nicht unmittelbar an den Öffnungsrändern, so dass kleine unversteifte Wandbereiche verbleiben, so sollten diese bei der Berechnung als nicht vorhanden betrachtet werden.

5.5.2 Rechteckige Öffnungen

(1) Die vertikale Verstärkung an einer rechteckigen Öffnung (siehe Bild 5.9) sollte so ausgelegt werden, dass die Querschnittsfläche der Steifen nicht kleiner ist als die entfallene Wandquerschnittsfläche, aber nicht größer als das Zweifache davon.

(2) Die horizontale Verstärkung sollte ebenfalls so ausgelegt werden, dass die Querschnittsfläche der Steifen nicht kleiner ist als die entfallene Wandquerschnittsfläche.

(3) Die Biegesteifigkeit der Randsteifen in Wandebene sollte so ausgelegt werden, dass die rechnerische Durchbiegung δ der Schalenwandung unter der zugeordneten Membrannormalkraft rechtwinklig zum betrachteten Öffnungsrand in Öffnungsachse nicht größer ist als

$$\delta_{\max} = k_{d1} \sqrt{\frac{t}{r}} \cdot d \quad (5.89)$$

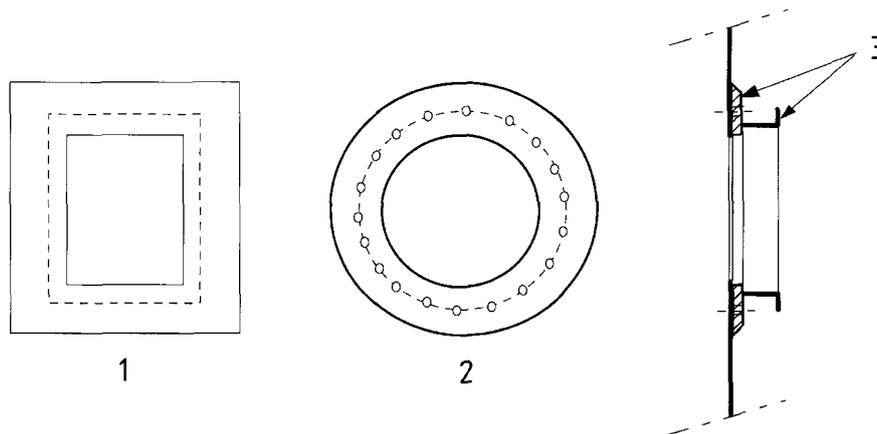
Dabei ist

d die Öffnungsbreite rechtwinklig zur betrachteten Membrannormalkraft.

ANMERKUNG Der Wert von k_{d1} darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es wird ein Wert von $k_{d1} = 0,02$ empfohlen.

(4) Die vertikalen Randsteifen sollten mindestens um $2\sqrt{rt}$ nach oben und unten über die Öffnung hinausreichen.

(5) Der Nachweis gegen örtliches Beulen der Schalenwandung im Bereich der Steifenenden sollte nach den Regeln für örtliche Lasten in 5.4.5 und 5.4.6 geführt werden.

**Legende**

- 1 rechteckige Öffnung
- 2 runde Öffnung
- 3 Verstärkungsstruktur (an die Silowand angeschweißt oder angeschraubt)

Bild 5.9 — Typische Steifenanordnung an Öffnungen in Silowänden**5.6 Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit****5.6.1 Grundlagen**

(1) Die Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit für Stahlsilos mit zylindrischen Blechwänden sind:

- Verformungen oder Durchbiegungen, die die effektive Benutzung des Tragwerks ungünstig beeinflussen;
- Verformungen, Durchbiegungen, Schwingungen oder Erschütterungen, die die Zerstörung nicht tragender Teile nach sich ziehen.

(2) Verformungen, Durchbiegungen und Erschütterungen sollten so begrenzt werden, dass die vorstehenden Kriterien eingehalten werden.

(3) Geeignete Grenzwerte sollten zwischen dem Tragwerksplaner, dem Bauherrn und der zuständigen Behörde vereinbart werden; dabei sind der vorgesehene Verwendungszweck und die Beschaffenheit des zu speichernden Schüttgutes zu beachten.

5.6.2 Durchbiegungen

(1) Der Grenzwert für die globale horizontale Ausbiegung eines Silos sollte wie folgt angesetzt werden:

$$w_{\max} = k_{d2} H \quad (5.90)$$

Dabei ist

H die Höhe des Tragwerks vom Fundament bis zum Dach.

ANMERKUNG Der Wert von k_{d2} darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es wird ein Wert von $k_{d2} = 0,02$ empfohlen.

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

(2) Der Grenzwert für lokale radiale Durchbiegungen (Abweichungen vom kreisförmigen Querschnitt) unter Windlast sollte als der kleinere der beiden folgenden Werte angesetzt werden:

$$w_{r,\max} = k_{d3} r \quad (5.91)$$

$$w_{r,\max} = k_{d4} t \quad (5.92)$$

Dabei ist

t die Dicke des dünnsten Teiles der Schalenwand.

ANMERKUNG Die Werte von k_{d3} und k_{d4} dürfen im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es werden Werte von $k_{d3} = 0,05$ und $k_{d4} = 20$ empfohlen.

6 Bemessung von konischen Trichtern

6.1 Grundlagen

6.1.1 Allgemeines

(1) Konische Trichter sollten so dimensioniert werden, dass die grundlegenden Anforderungen an die Bemessung nach Abschnitt 2 erfüllt sind.

(2) Die Tragsicherheitsnachweise der Kegelschale sollten nach den Regeln von EN 1993-1-6 geführt werden.

6.1.2 Bemessung der Trichterwand

(1) Die kegelstumpfförmige Trichterwand sollte auf Folgendes überprüft werden:

- Widerstand gegen Zugbruch unter Innendruck und Wandreibung;
- Widerstand gegen örtliches Biegefließen an der Abzweigung;
- Widerstand gegen Ermüdungsbruch;
- Widerstand der Stöße (Verbindungen);
- Widerstand gegen Beulen unter Querbelastrungen aus Austragorganen und Anschlüssen;
- lokale Effekte.

(2) Die Schalenwand sollte den Anforderungen von EN 1993-1-6 entsprechen; die Regeln in 6.3 bis 6.5 erfüllen jene Anforderungen.

(3) Die in 6.3 bis 6.5 angegebenen Regeln gelten für Trichter mit halben Kegelöffnungswinkeln im Bereich von $0^\circ < \beta < 70^\circ$.

(4) Für Trichter der Schadensfolgeklasse 1 dürfen die Grenzzustände ‚Zyklisches Plastizieren‘ und ‚Ermüdung‘ außer Acht gelassen werden, sofern die beiden folgenden Bedingungen erfüllt sind:

- a) Die Bemessung für den Grenzzustand Zugbruch an der Abzweigung sollte mit einem erhöhten Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M0} = \gamma_{M0g}$ durchgeführt werden.
- b) Es sind keine örtlichen Längssteifen oder Auflagerungen an der Trichterwandung im Bereich der Abzweigung vorgesehen.

ANMERKUNG Der Wert von γ_{M0g} darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es wird ein Wert von $\gamma_{M0g} = 1,4$ empfohlen.

6.2 Unterscheidung zwischen verschiedenen Formen von Trichterschalen

- (1) Eine Trichterwand aus gewalzten Stahlblechen wird ‚isotrop‘ genannt.
- (2) Eine Trichterwand mit Steifen an der Außenseite wird ‚außen-versteift‘ genannt.
- (3) Ein Trichter mit mehr als einer Entleerungsöffnung wird ‚Mehrfachauslass‘ genannt.
- (4) Ein Trichter, der Teil eines auf diskreten Stützen oder Konsolen aufgelagerten Silos ist, wird ‚diskret aufgelagert‘ genannt, auch wenn sich die diskreten Auflager nicht direkt unter dem Trichter befinden.

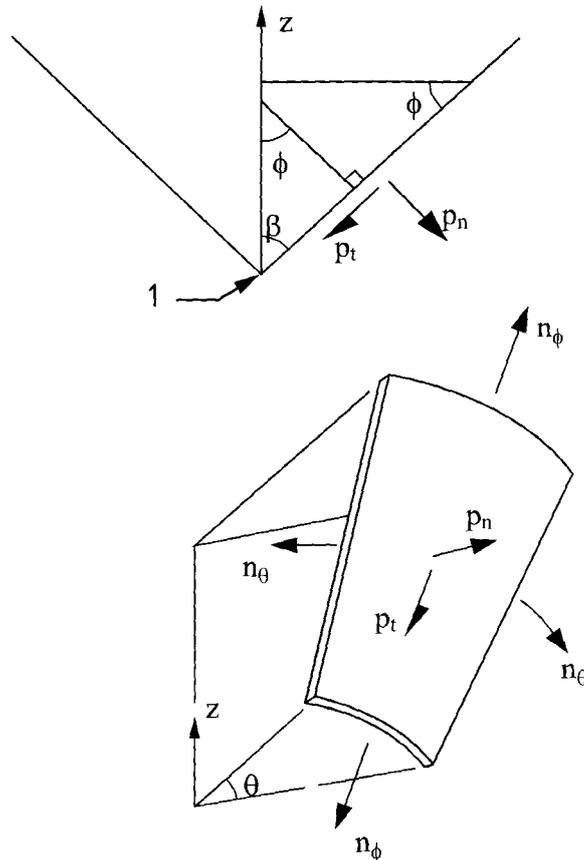
6.3 Tragsicherheitsnachweis für konische Trichterwände

6.3.1 Allgemeines

- (1) Die Kegelschale sollte den Regeln von EN 1993-1-6 entsprechen. Dem wird Genüge getan, wenn die Nachweise nach den Regeln in diesem 6.3 geführt werden.
- (2) Besonders zu beachten sind die Druckverteilungen beim Befüllen und Entleeren, unter denen einzelne Bereiche des Trichters besonders kritisch belastet werden.
- (3) Die Schnittgrößen im Hauptteil des Trichters dürfen in der Regel mit Hilfe der Membrantheorie ermittelt werden.

ANMERKUNG Zusätzliche Informationen zu den möglichen Druckverteilungen und zu den membrantheoretischen Schnittgrößen im Hauptteil des Trichters werden in Anhang B gegeben.

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)



1 Koordinatenursprung und Kegelspitze

Bild 6.1 — Trichterschale

6.3.2 Isotrope, unversteifte, geschweißte oder geschraubte Trichter

6.3.2.1 Allgemeines

(1) Ein konischer Trichter sollte als Schalentragswerk berechnet werden, das die Lasten kombiniert in Meridian- und Umfangsrichtung abträgt.

6.3.2.2 LS1: Plastischer Kollaps oder Zugbruch in der Trichterwand

(1) Beim Tragsicherheitsnachweis gegen Zugbruch sollte beachtet werden, dass die Trichterwand unterschiedlichen und wechselnden Druckverteilungen ausgesetzt sein kann. Da Zugbruchversagen sich leicht fortpflanzen kann und in der Regel nicht duktil ist, sollte jede einzelne Stelle des Trichters für ihre ungünstigste Bemessungssituation ausgelegt sein.

(2) Geschweißte oder geschraubte Stöße längs der Kegelmeridiane sollten so dimensioniert werden, dass sie an jeder Stelle die ungünstigsten Membrankräfte infolge der Druckverteilungen beim Befüllen oder Entleeren aufnehmen können.

(3) Geschweißte oder geschraubte Stöße längs der Kegelumfänge sollten so dimensioniert werden, dass sie das größtmögliche Schüttgutgewicht unterhalb des jeweiligen Stoßes aufnehmen können.

ANMERKUNG Üblicherweise ist dafür die Befüllungsdruckverteilung maßgebend: siehe EN 1991-4.

6.3.2.3 LS1: Zugbruch an der Abzweigung

(1) Der Umfangsstoß zwischen Trichter und Abzweigung (siehe Bild 6.2) sollte für die größtmögliche meridionale Gesamtbeanspruchung des Trichters ausgelegt werden, wobei eventuelle unvermeidbare Ungleichmäßigkeiten zu berücksichtigen sind.

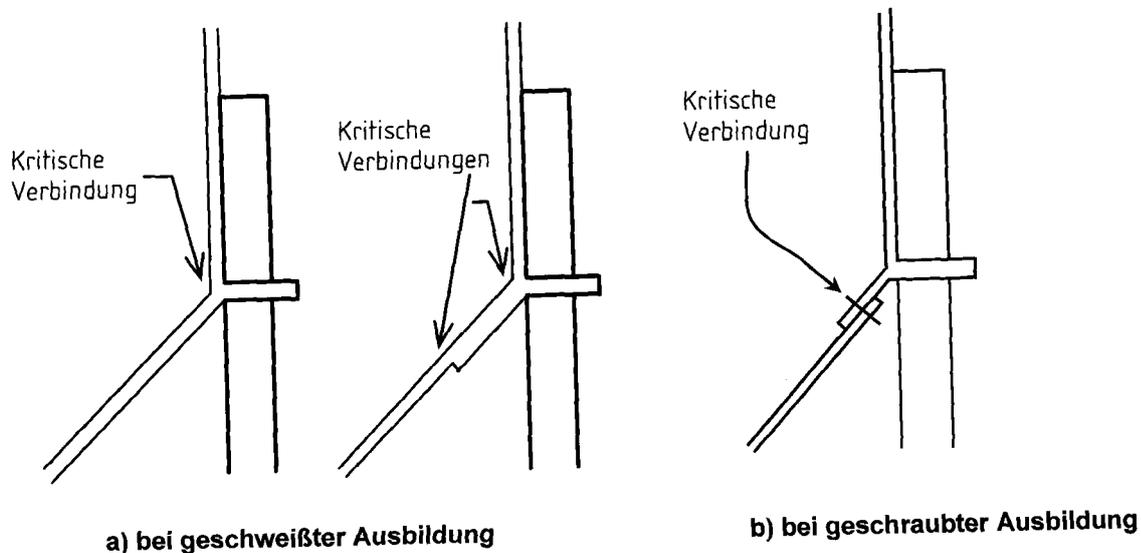


Bild 6.2 — Abzweigung des Trichters: Gefährdung durch Zugbruch

(2) Wenn die Schwerkraft- und Fließbelastung aus dem Schüttgut die einzige zu beachtende Einwirkung ist, sollte die Meridiankraft je Längeneinheit $n_{\phi h, Ed, s}$, die durch die in EN 1991-4 festgelegten symmetrischen Drücke verursacht und durch den Umfangsstoß an der Abzweigung übertragen wird, aus globalem Gleichgewicht ermittelt werden. Der Bemessungswert der örtlichen Meridiankraft je Längeneinheit $n_{\phi h, Ed}$, mit dem der möglichen Ungleichmäßigkeit der Belastung Rechnung getragen wird, sollte dann wie folgt ermittelt werden.

$$n_{\phi h, Ed} = g_{asym} n_{\phi h, Ed, s} \quad (6.1)$$

Dabei ist

- $n_{\phi h, Ed, s}$ der Bemessungswert der lokalen Meridiankraft je Umfangslängeneinheit am oberen Trichterrand, der unter der Annahme vollständig symmetrischer Trichterbelastung erhalten wird;
- g_{asym} der Faktor für die Zunahme der Meridiankraft infolge Unsymmetrie.

ANMERKUNG Ausdrücke für $n_{\phi h, Ed, s}$ sind Anhang B zu entnehmen. Der Wert von g_{asym} darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es wird ein Wert von $g_{asym} = 1,2$ empfohlen.

(3) Bei Silos der Schadensfolgeklasse 2 sollte eine schalenbiegetheoretische Berechnung des Trichters durchgeführt werden, in die gegebenenfalls andere Belastungen aus diskreter Auflagerung, Austragorganen, angeschlossenen Bauteilen, ungleichmäßigen Trichterwanddrücken usw. einzuschließen sind. Aus dieser Berechnung ist die größte lokale Meridiankraft je Umfangslängeneinheit, die vom Trichter an die Abzweigung zu übertragen ist, zu entnehmen.

(4) Der Meridianmembrankraftwiderstand (der Bemessungswert des Widerstandes) des Trichters an der Abzweigung $n_{\phi h, Rd}$ sollte wie folgt angesetzt werden:

$$n_{\phi h, Rd} = k_r t f_u / \gamma_{M2} \quad (6.2)$$

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

Dabei ist

f_u die Zugfestigkeit.

ANMERKUNG Der Wert von k_r darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es wird ein Wert von $k_r = 0,90$ empfohlen.

6.3.2.4 LS1: Plastischer Mechanismus an Dickensprüngen oder an der Abzweigung

(1) Der Widerstand des Trichters gegen Versagen durch Ausbildung eines plastischen Mechanismus sollte in Form des lokalen Wertes der Meridianmembrankraft n_ϕ am oberen Trichterrand bzw. am Dickensprung nachgewiesen werden.

(2) Der entsprechende Meridianmembrankraftwiderstand $n_{\phi,Rd}$ sollte wie folgt ermittelt werden:

$$n_{\phi,Rd} = \left(\frac{r t f_y}{r - 2,4 \sqrt{\frac{r t}{\cos \beta}} \cdot \sin \beta} \right) \left(\frac{0,91 \mu + 0,27}{\mu + 0,15} \right) / \gamma_{M0} \quad (6.3)$$

Dabei ist

t die örtliche Wanddicke;

r der Radius am plastischen Mechanismus (oberer Trichterrand oder Dickensprung);

β der halbe Kegelöffnungswinkel des Trichters, siehe Bild 6.1;

μ der Wandreibungskoeffizient für die Trichterwand.

(3) Die Bemessungsmembrankräfte sollten an allen kritischen Punkten des Tragwerks die folgende Bedingung erfüllen:

$$n_{\phi,Ed} \leq n_{\phi,Rd} \quad (6.4)$$

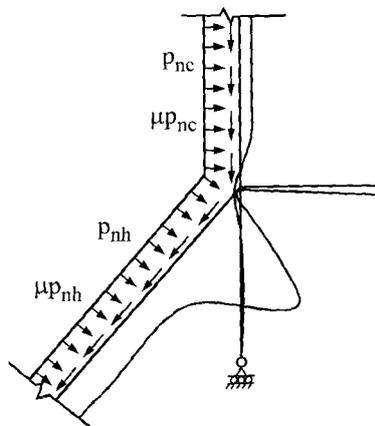


Bild 6.3 — Plastischer Kollaps eines konischen Trichters

6.3.2.5 LS2 und LS4: Örtliche Biegung an der Abzweigung

(1) Um Versagen durch zyklisches Plastizieren und/oder Ermüdung zu vermeiden, sollten für die starke Biegebeanspruchung am oberen Trichterrand, die sich sowohl aus Gleichgewichts- als auch aus Zwängungseinflüssen zusammensetzt, die entsprechenden Nachweise geführt werden.

(2) Auf diese Nachweise darf bei Silos der Schadensfolgeklasse 1 verzichtet werden.

(3) Wenn keine genaue FE-Berechnung des Tragwerks durchgeführt wird, sollte die örtliche Biegespannung am oberen Trichterrand mit Hilfe der nachfolgenden Formeln ermittelt werden.

(4) Die an der Knotenlinie der Abzweigung angreifenden effektiven Kraftgrößen (Radialkraft $F_{e,Ed}$ und Moment $M_{e,Ed}$) sollten wie folgt ermittelt werden:

$$F_{e,Ed} = n_{\phi h,Ed} \sin \beta - F_h - F_c \quad (6.5)$$

$$M_{e,Ed} = F_c x_c - F_h x_h \quad (6.6)$$

mit:

$$F_c = 2 x_c p_{nc} \quad (6.7)$$

$$F_h = 2 x_h (0,85 - 0,15 \mu \cot \beta) p_{nh} \quad (6.8)$$

$$x_c = 0,39 \sqrt{r t_c} \quad (6.9)$$

$$x_h = 0,39 \sqrt{\frac{r t_h}{\cos \beta}} \quad (6.10)$$

Dabei ist (siehe Bild 8.4)

t_h die örtliche Wanddicke des Trichters;

t_c die örtliche Wanddicke des Zylinders an der Abzweigung;

r der Radius an der Abzweigung (oberer Trichterrand);

β der halbe Kegelöffnungswinkel des Trichters;

μ der Wandreibungskoeffizient für die Trichterwand;

$n_{\phi h,Ed}$ die Bemessungs-Meridianmembrankraft am oberen Trichterrand;

p_{nh} der örtliche Wert des Trichterwanddruckes unmittelbar unterhalb der Abzweigung;

p_{nc} der örtliche Wert des Zylinderwanddruckes unmittelbar oberhalb der Abzweigung.

(5) Die örtliche Biegespannung $\sigma_{b\phi h,Ed}$ am oberen Trichterrand sollte wie folgt ermittelt werden:

$$\boxed{AC} \sigma_{b\phi h,Ed} = \left(\frac{6}{\Delta} \right) \{ (a_2 - 2 a_1 \eta) M_{e,Ed} - \rho (a_3 - a_2 \eta) F_{e,Ed} \} - \left(\frac{6}{t_h^2} \right) F_h x_h \quad \boxed{AC} \quad (6.11)$$

Dabei ist

$$\Delta = 2 a_1 a_3 - a_2^2 \quad (6.12)$$

$$\rho = 0,78 \sqrt{r} \quad (6.13)$$

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

$$\eta = \sqrt{t_h \cos \beta} \quad (6.14)$$

$$a_1 = t_s^{3/2} + t_c^{3/2} + \frac{t_h^{3/2}}{\sqrt{\cos \beta}} + \frac{A_{ep}}{\rho} \quad (6.15)$$

$$a_2 = t_s^2 - t_c^2 + t_h^2 \quad (6.16)$$

$$a_3 = t_x^{5/2} + t_c^{5/2} + t_h^{5/2} \sqrt{\cos \beta} \quad (6.17)$$

Dabei ist

- t_h die örtliche Wanddicke des Trichters;
- t_c die örtliche Wanddicke des Zylinders an der Abzweigung;
- t_s die örtliche Wanddicke der Standzarge unterhalb der Abzweigung;
- A_{ep} die Querschnittsfläche der Ringsteife an der Abzweigung (ohne mittragende Anteile der benachbarten Schalensegmente);
- r der Radius an der Abzweigung (oberer Trichterrand).

6.3.2.6 Trichter in diskret aufgelagerten Silos

- (1) Bei diskret aufgelagerten Silos sollten bei der Ermittlung der ungleichmäßig verteilten Meridianmembranspannungen im Trichter die relativen Steifigkeiten des Ringträgers an der Abzweigung, der Zylinderwand und der Trichterwand berücksichtigt werden.
- (2) Bei Silos der Schadensfolgeklasse 1 darf auf diese Anforderung verzichtet werden.
- (3) Der Trichter sollte für den größtmöglichen örtlichen Wert der Meridianzugkraft am oberen Trichterrand (im Bereich der Auflagerung) nach 6.3.2.3 und 6.3.2.4 bemessen werden.

6.3.2.7 LS3: Beulen der Trichterwand

- (1) Dieser Grenzzustand darf bei Silos der Schadensfolgeklasse 1 außer Acht gelassen werden.
- (2) Der Trichter sollte auf Beulen infolge horizontaler Einwirkungen aus Austragorganen oder angeschlossenen Bauteilen und gegebenenfalls infolge unsymmetrischer vertikaler Einwirkungen untersucht werden.
- (3) Die Bemessungs-Beulmembrankraft $n_{\phi h, Rd}$ am oberen Trichterrand sollte wie folgt ermittelt werden:

$$n_{\phi h, Rd} = 0,6 \alpha_{xh} E \left(\frac{t_h^2}{r} \right) \cos \beta / \gamma_{M1} \quad (6.18)$$

Dabei ist

- α_{xh} der elastische Imperfektions-Abminderungsfaktor für Meridianbeulen;
- t_h die örtliche Wanddicke des Trichters;
- r der Radius an der Abzweigung (oberer Trichterrand);
- γ_{M1} in 2.9.2 angegeben, jedoch sollte $n_{\phi, Rd}$ nicht größer als $n_{\phi, Rd} = t_h f_y / \gamma_{M1}$ angesetzt werden.

ANMERKUNG Der Wert von α_{xh} darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es wird ein Wert von $\alpha_{xh} = 0,10$ empfohlen.

(4) Die Bemessungsmeridiankraft am oberen Trichterrand sollte die folgende Bedingung erfüllen:

$$n_{\phi h,Ed} \leq n_{\phi h,Rd}$$

(6.19)

6.4 Angaben zu speziellen Trichterkonstruktionen

6.4.1 Unterstützungskonstruktion

(1) Die Beeinflussung des Trichters aus einer diskreten Siloauflagerung sollte nach 5.4 behandelt werden. Die Unterstützungskonstruktionen selbst sollten nach EN 1993-1-1 bemessen werden; dabei gilt für die Grenze zwischen Silo und Unterstützungskonstruktion die Definition nach 1.1 (4).

6.4.2 Stützengelagerte Trichter

- (1) Wenn die Trichterwand selbst auf diskreten Auflagern oder Stützen gelagert ist, die den oberen Trichterrand nicht erreichen, sollte sie mit Hilfe der Schalenbiegetheorie berechnet werden; siehe EN 1993-1-6.
- (2) Für die Einleitung und Verteilung der Auflagerkräfte in die Trichterwand sollten geeignete konstruktive Vorkehrungen getroffen werden.
- (3) Die Stöße der Trichterwand sollten für die von ihnen zu übertragenden, größtmöglichen örtlichen Schnittgrößen bemessen werden.
- (4) Für Wandbereiche, in denen Druckmembranspannungen entstehen können, sollte ein Beulsicherheitsnachweis geführt werden; siehe EN 1993-1-6.

6.4.3 Unsymmetrische Trichter

(1) Wenn die Trichterachse nicht lotrecht, sondern gegenüber der Vertikalen um den Winkel ω geneigt ist (Bild 6.4), sollten beim Tragsicherheitsnachweis die aus dieser Geometrie resultierenden größeren Meridianspannungen auf der steileren Seite beachtet werden, und es sollten entsprechende Vorkehrungen getroffen werden, um einen angemessenen örtlichen Meridianwiderstand sicherzustellen.

6.4.4 Versteifte Kegelschalen

- (1) Die Längssteifen (Meridiansteifen) sollten am oberen Trichterrand angemessen verankert werden.
- (2) Bei meridianversteiften Trichterkegeln sollten die Kompatibilitätseffekte zwischen Wand und Steifen beachtet werden. Darüber hinaus sollten bei der Berechnung der Steifen- und Wandschnittgrößen die Querkontraktionseinflüsse aus der Umfangszugbeanspruchung der Trichterwand beachtet werden.
- (3) Bei der Bemessung der Wandstöße sollte die infolge der Kompatibilitätseinflüsse erhöhte Zugbeanspruchung beachtet werden.
- (4) Die Verbindung zwischen Steifen und Wandblech sollte für die zwischen ihnen wirkenden Verbundkräfte bemessen werden.

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

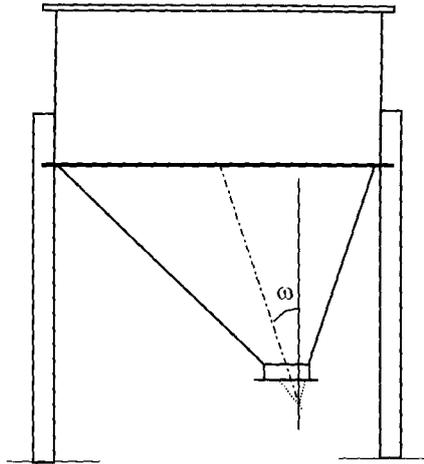


Bild 6.4 — Unsymmetrischer Trichter mit in den Zylinder eingebundenen Stützen

6.4.5 Mehrfach-Kegelschalen

- (1) Bei Trichtern, die aus mehreren Kegelsegmenten unterschiedlicher Wandneigung zusammengesetzt sind, sollten die maßgebenden Schüttguteinwirkungen für jedes Segment getrennt ermittelt und der Bemessung zu Grunde gelegt werden.
- (2) An Wandneigungssprüngen sollten beim Tragsicherheitsnachweis die örtlichen Zug- und Druckbeanspruchungen in Umfangsrichtung beachtet werden.
- (3) Die Gefahr starken Verschleißes an solchen Wandneigungssprüngen sollte bei der Bemessung ebenfalls berücksichtigt werden.

6.5 Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit

6.5.1 Grundlagen

- (1) Falls Gebrauchstauglichkeitskriterien als notwendig erachtet werden, sollten die entsprechenden Grenzwerte für den Trichter zwischen dem Tragwerksplaner und dem Bauherrn vereinbart werden.

6.5.2 Erschütterungen

- (1) Es sollte dafür gesorgt werden, dass der Trichter während des Betriebes keinen schweren Erschütterungen ausgesetzt ist.

7 Bemessung von kreisrunden konischen Dächern

7.1 Grundlagen

- (1) Bei der Bemessung von Silodächern sollten ständige, häufige und außergewöhnliche Einwirkungen beachtet werden, d. h. besonders Windlast, Schneelast, Nutzlasten und Teilvakuum.
- (2) Bei der Bemessung sollte außerdem die Möglichkeit von aufwärts gerichteten Dachlasten aus unbeachteter Überfüllung oder unerwarteter Verflüssigung des gespeicherten Schüttgutes geprüft werden.

7.2 Unterscheidung zwischen verschiedenen Formen von Dachtragwerken

7.2.1 Begriffe

- (1) Ein aus gewalzten Blechen ohne unterstützende Träger oder Ringe gebildetes Kegelschalendach wird ‚Schalendach‘ oder ‚ungestütztes Dach‘ genannt.
- (2) Ein kegelförmiges Dach, dessen Dachbleche auf Trägern oder einem Trägerrost gelagert sind, wird ‚Gespärrdach‘ oder ‚gestütztes Dach‘ genannt.

7.3 Tragsicherheitsnachweise für kreisrunde konische Silodächer

7.3.1 Schalendächer bzw. ungestützte Dächer

- (1) Schalendächer sollten nach den Anforderungen von EN 1993-1-6 bemessen werden. Dem wird für Kegeldächer mit einem Durchmesser von nicht mehr als 5 m Durchmesser und einer Dachneigung ϕ von nicht mehr als 40° gegenüber der Horizontalen Genüge getan, wenn die Nachweise nach den folgenden Regeln geführt werden.
- (2) Die berechneten Oberflächenvergleichsspannungen aus Schalenbiegung und Membrankräften sollten für jeden Punkt in der Schale auf folgenden Vergleichsspannungswiderstand begrenzt werden:

$$f_{e,Rd} = f_y / \gamma_{M0} \quad (7.1)$$

Wobei γ_{M0} nach 2.9.2 zu ermitteln ist.

- (3) Der ideale Beulaußendruck $p_{n,Rcr}$ eines isotropen Kegeldaches sollte wie folgt berechnet werden:

$$p_{n,Rcr} = 2,65 E \left(\frac{t \cos \phi}{r} \right)^{2,43} \cdot (\tan \phi)^{1,6} \quad (7.2)$$

Dabei ist

- r der Außenradius des Daches;
- t die kleinste Wanddicke;
- ϕ der Neigungswinkel des Kegels gegenüber der Horizontalen.

- (4) Der Bemessungs-Beulaußendruck (Bemessungswert des Beulwiderstandes) sollte wie folgt ermittelt werden:

$$p_{n,Rd} = \alpha_p p_{n,Rcr} / \gamma_{M1} \quad (7.3)$$

Wobei γ_{M1} nach 2.9.2 zu ermitteln ist.

ANMERKUNG Der Wert von α_p darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es wird ein Wert von $\alpha_p = 0,20$ empfohlen.

- (5) Der Bemessungswert des größten lokalen Außendruckes, der unter den in 7.1 definierten Einwirkungen auftritt, sollte die folgende Bedingung erfüllen:

$$p_{n,Ed} \leq p_{n,Rd} \quad (7.4)$$

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

7.3.2 Gespärredächer bzw. gestützte Dächer

(1) Gespärredächer bzw. gestützte Dächer sollten nach den in EN 1993-4-2 für Tankbauwerke angegebenen Regeln bemessen werden.

7.3.3 Traufkante (Knotenlinie zwischen Silodach und Siloschaft)

(1) Die Verbindung zwischen Dach und Zylinderschale einschließlich der Ringsteife entlang dieser Knotenlinie sollten ebenfalls nach den in EN 1993-4-2 für Tankbehälter angegebenen Bestimmungen bemessen werden.

8 Bemessung von Abzweigungsringen und Auflagerringträgern

8.1 Grundlagen

8.1.1 Allgemeines

(1) Stählerne Ringe oder Ringträger an der Abzweigung des Trichters vom zylindrischen Siloschaft sollten so dimensioniert werden, dass die grundlegenden Anforderungen an die Bemessung nach Abschnitt 2 erfüllt sind.

(2) Der Ring sollte den Anforderungen von EN 1993-1-6 entsprechen; die nachfolgenden Regeln erfüllen jene Anforderungen.

(3) Für Ringe in Silos der Schadensfolgeklasse 1 braucht kein Nachweis gegen die Grenzzustände ‚Zyklisches Plastizieren‘ und ‚Ermüdung‘ geführt zu werden, wenn die nachfolgenden Bedingungen eingehalten werden.

8.1.2 Bemessung des Ringes

(1) Der Ring oder Ringträger sollte auf Folgendes überprüft werden:

- Widerstand gegen plastisches Versagen unter Druckbeanspruchung in Umfangsrichtung;
- Widerstand gegen Knicken unter Druckbeanspruchung in Umfangsrichtung;
- Widerstand gegen örtliches Fließen unter Zug- oder Druckspannungen;
- Widerstand gegen örtliches Versagen über Auflagerungen;
- Widerstand gegen Torsionsversagen;
- Widerstand von Stößen und Verbindungen.

(2) Der Ringträger sollte den Anforderungen von EN 1993-1-6 entsprechen; die Regeln in 8.2 bis 8.5 erfüllen jene Anforderungen.

(3) Für Ringe in Silos der Schadensfolgeklasse 1 dürfen die Grenzzustände ‚Zyklisches Plastizieren‘ und ‚Ermüdung‘ außer Acht gelassen werden.

8.1.3 Begriffe

(1) Ein Ring, der ausschließlich der Aufnahme der radialen Kraftkomponenten aus dem Trichter dient, wird ‚Abzweigungsring‘ genannt.

(2) Ein Ring, der der Verteilung vertikaler Kräfte zwischen verschiedenen Komponenten dient (z. B. von der Zylinderwand in diskrete Auflager), wird ‚Ringträger‘ genannt.

(3) Die Knotenlinie zwischen den Mittelflächen der Trichterwand und der zylindrischen Schalenwand an der Abzweigung wird ‚Abzweigungszentrum‘ genannt und sollte als Referenzlinie für die rechnerischen Nachweise verwendet werden.

(4) Ein Silo ohne konkreten Ring an der Abzweigung (siehe Bild 8.1) besitzt einen effektiven Ring (Ersatzring), der aus mittragenden Teilen der angrenzenden Schalen besteht; er wird ‚natürlicher Ring‘ genannt.

(5) Eine Kreisringplatte an der Abzweigung wird ‚Plattenring‘ genannt, siehe Bild 8.1.

(6) Ein Walzprofil als Ringsteife an der Abzweigung wird ‚Profiling‘ genannt.

(7) Ein Walzprofil, das um den Siloumfang herumläuft und den Siloschaft unterhalb der Abzweigung abstützt, wird ‚gewalzter Ringträger‘ genannt.

(8) Ein aus Stahlblechen, die die Form von niedrigen Zylindern und Kreisringplatten haben, aufgebautes Tragglied wird ‚zusammengesetzter Ringträger‘ genannt; siehe Bild 8.1.

8.1.4 Modellierung des Abzweigungsbereiches

(1) Bei "Handberechnungen" sollte der Abzweigungsbereich ausschließlich durch zylindrische und konische Schalensegmente und Kreisringplatten repräsentiert werden.

(2) Bei gleichmäßig aufgelagerten Silos dürfen die Umfangsspannungen in den Kreisringplatten als in jeder Platte konstant angenommen werden.

(3) Bei diskret aufgelagerten Silos sollte berücksichtigt werden, dass die Umfangsspannungen in den Kreisringplatten als Folge von Wölbspannungen in radialer Richtung veränderlich sind.

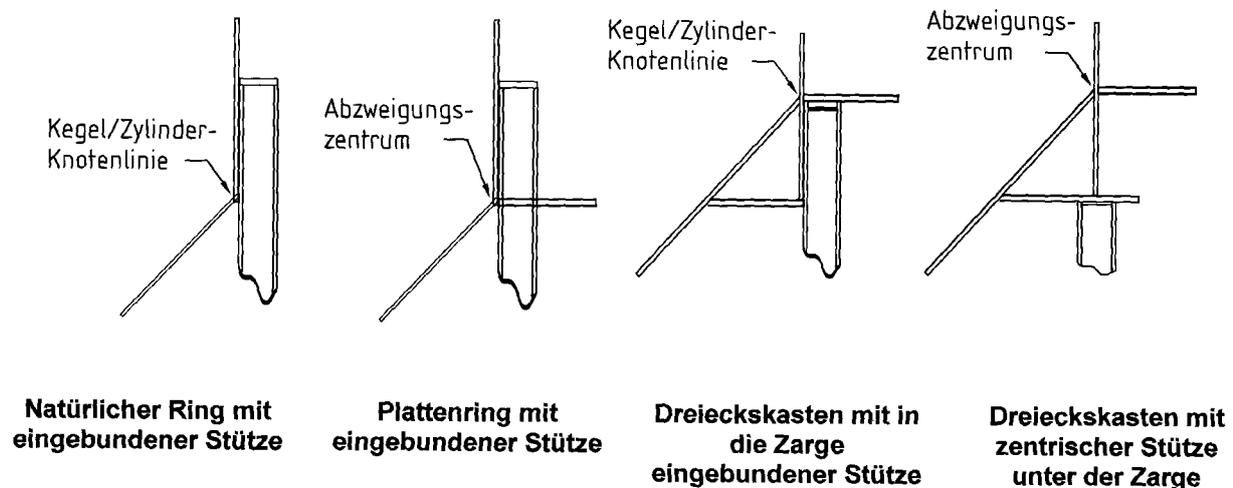


Bild 8.1 — Beispiele für Ringformen

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

8.1.5 Grenzen für die Ringanordnung

(1) Der vertikale Abstand eines Platten- oder Profilringes vom Abzweigungszentrum sollte nicht größer als $0,2\sqrt{rt}$ sein, wobei t die Zylinderwanddicke ist, es sei denn, es wird eine Schalenbiegeberechnung nach EN 1993-1-6 durchgeführt, um den Einfluss der Exzentrizität erfassen zu können.

ANMERKUNG Diese Regel leitet sich aus der Unwirksamkeit von in größerem Abstand zur Abzweigung angeordneten Ringen ab, siehe Bild 8.2.

(2) Die vereinfachten Regeln in 8.2 gelten nur unter der Voraussetzung, dass die Bedingung (1) eingehalten wird.

8.2 Berechnung des Abzweigungsbereiches

8.2.1 Allgemeines

(1) Für Silos der Schadensfolgeklasse 1 darf der Abzweigungsbereich mit Hilfe einfacher, membrantheoretisch hergeleiteter Formeln und Belastungen aus den angrenzenden Schalensegmenten berechnet werden.

(2) Wenn für den Abzweigungsbereich eine genauere Computerberechnung durchgeführt wird, sollte diese die Anforderungen von EN 1993-1-6 erfüllen.

(3) Für gleichmäßig aufgelagerte Silos darf anstelle einer genaueren Computerberechnung die Berechnung nach 8.2.2 durchgeführt werden.

(4) Für diskret aufgelagerte Silos sollte anstelle einer genaueren Computerberechnung die Berechnung nach 8.2.3 durchgeführt werden.

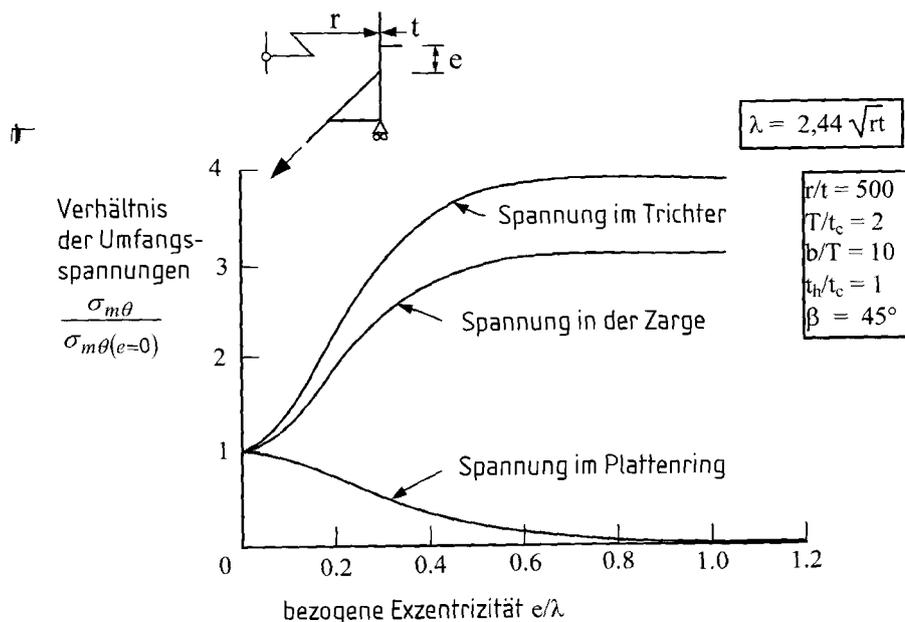


Bild 8.2 — Membranspannungen im Ring und in den angrenzenden Schalen bei exzentrisch angeordnetem Ring

8.2.2 Gleichmäßig unterstützte Abzweigungsbereiche

(1) Der effektive Querschnitt des Abzweigungsbereiches sollte wie folgt festgelegt werden: Die im Abzweigungszentrum zusammentreffenden Schalensegmente sollten in die beiden Gruppen oberhalb (Gruppe A) und unterhalb (Gruppe B) eingeteilt werden, siehe Bild 8.3 a). Alle Kreisringplatten auf Höhe des Abzweigungszentrums sollten zunächst außer Acht gelassen werden. Vertikale Flansche an der Kreisringplatte außerhalb des Abzweigungszentrums sollten als Schalensegmente analog zu den anderen behandelt werden, siehe Bild 8.3.

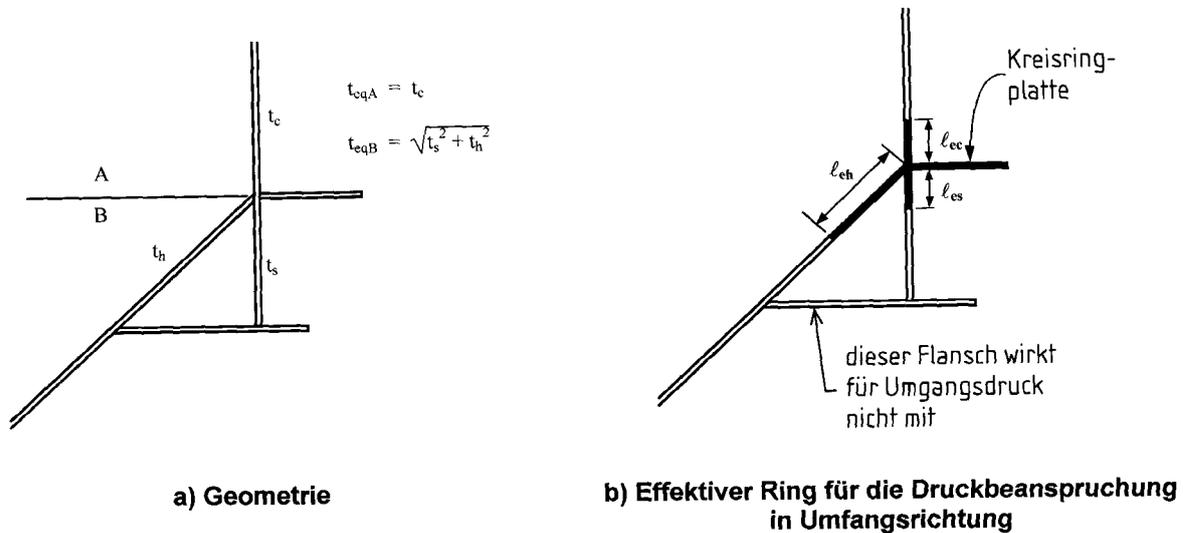


Bild 8.3 — Effektiver Querschnitt des Abzweigungsbereiches Zylinder/Trichter/Ring

(2) Die Ersatzdicken t_{eqA} und t_{eqB} der beiden Schalengruppen sollten wie folgt ermittelt werden:

$$t_{eqA} = \sqrt{\sum_A t^2} \quad (8.1)$$

$$t_{eqB} = \sqrt{\sum_B t^2} \quad (8.2)$$

(3) Das Verhältnis α zwischen dünnerer und dickerer Ersatzschale sollte wie folgt ermittelt werden:

$$\alpha = \frac{(t_{eq})_{\text{dünner}}}{(t_{eq})_{\text{dicker}}} \quad (8.3)$$

mit:

$$(t_{eq})_{\text{dünner}} = \min(t_{eqA}, t_{eqB}) \quad (8.4)$$

$$(t_{eq})_{\text{dicker}} = \max(t_{eqA}, t_{eqB}) \quad (8.5)$$

(4) Für die dünnere der beiden Schalengruppen sollte die mitttragende Länge jedes Schalensegmentes wie folgt ermittelt werden:

$$l_{e1} = 0,778 \sqrt{\frac{r t}{\cos \beta}} \quad (8.6)$$

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

Dabei ist β der Winkel zwischen dem Meridian des betreffenden Schalensegmentes und der Siloachse (halber Kegelöffnungswinkel). Die effektive Querschnittsfläche jedes Schalensegmentes ergibt sich dann zu:

$$A_{e1} = \ell_{e1} t \quad (8.7)$$

Für die dickere der beiden Schalengruppen sollte die mittragende Länge jedes Schalensegmentes wie folgt ermittelt werden:

$$\ell_{e2} = 0,389 \left[1 + 3\alpha^2 - 2\alpha^3 \right] \sqrt{\frac{r t}{\cos \beta}} \quad (8.8)$$

Für diese Gruppe ergibt sich die effektive Querschnittsfläche jedes Schalensegmentes dann zu:

$$A_{e2} = \ell_{e2} t \quad (8.9)$$

(5) Die effektive Querschnittsfläche A_{ep} eines Plattenringes (Kreisringplatte an der Abzweigung) sollte wie folgt ermittelt werden:

$$A_{ep} = \frac{b t_p}{1 + 0,8 \frac{b}{r}} \quad (8.10)$$

Dabei ist

- r der Radius der Silo-Zylinderwand;
- b die radiale Breite der Kreisringplatte;
- t_p die Dicke der Kreisringplatte.

(6) Die effektive Gesamtquerschnittsfläche A_{et} des Ersatzringes zur Aufnahme von Druckspannungen in Umfangsrichtung sollte wie folgt ermittelt werden:

$$A_{et} = A_{ep} + \sum_{i=1}^{\text{alle Segmente}} A_{ei} \quad (8.11)$$

(7) Wenn an der Abzweigung nur ein zylindrischer Siloschaft, eine zylindrische Standzarge und ein konischer Trichter zusammentreffen (siehe Bild 8.4), kann die effektive Gesamtquerschnittsfläche A_{et} des Ersatzringes alternativ wie folgt ermittelt werden:

$$A_{et} = A_{ep} + 0,778 \sqrt{r} \left\{ t_e^{3/2} + \psi \left(\frac{t_h^{3/2}}{\sqrt{\cos \beta}} + t_s^{3/2} \right) \right\} \quad (8.12)$$

mit:

$$\psi = 0,5 (1 + 3 \alpha^2 - 2 \alpha^3) \quad (8.13)$$

$$\alpha = \frac{t_c}{\sqrt{t_s^2 + t_h^2}} \quad (8.14)$$

Dabei ist

- r der Radius der Silo-Zylinderwand;
- t_c die Dicke der Silo-Zylinderwand;

- t_s die Dicke der Standzarge;
 t_h die Dicke des Trichters;
 A_{ep} die effektive Querschnittsfläche des Plattenringes.

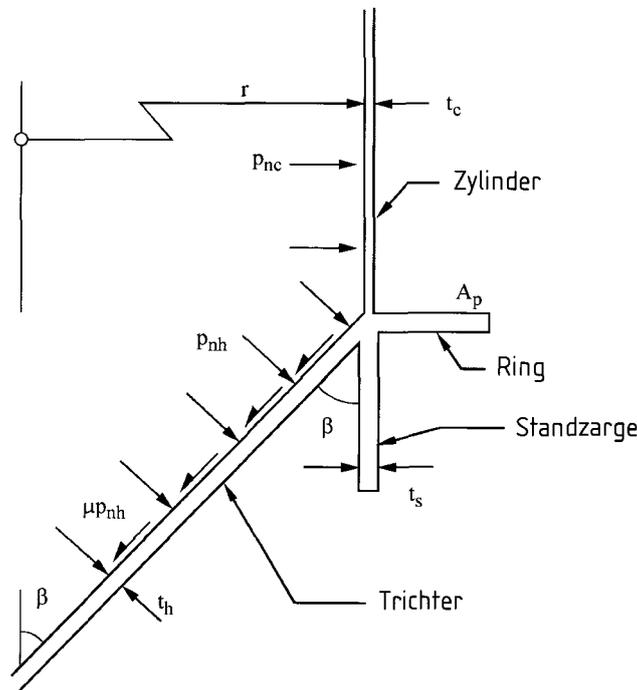


Bild 8.4 — Bezeichnungen bei einer einfachen Abzweigung mit Plattenring (Kreisringplatte)

- (8) Wird an der Abzweigung ein Ring mit komplexerer Querschnittsgeometrie vorgesehen, so dürfen nur solche Ringplattenelemente als mittragend einbezogen werden, die die Bedingung in 8.1.5 (1) einhalten.
- (9) Der Bemessungswert der in Umfangsrichtung an der Abzweigung wirksamen Druckkraft $N_{\theta,Ed}$ sollte wie folgt ermittelt werden:

$$N_{\theta,Ed} = n_{\phi h,Ed} r \sin \beta - p_{nc} r \ell_{ec} - p_{nh} (\cos \beta - \mu \sin \beta) r \ell_{eh} \quad (8.15)$$

Dabei ist (siehe Bild 8.5)

- r der Radius der Silo-Zylinderwand;
 β der halbe Kegelöffnungswinkel des Trichters (am oberen Rand);
 ℓ_{ec} die mittragende Länge des Zylindersegmentes oberhalb der Abzweigung (siehe (4));
 ℓ_{eh} die mittragende Länge des Kegelsegmentes (siehe (4));
 $n_{\phi h,Ed}$ der Bemessungswert der Meridianzugkraft je Umfangslängeneinheit am oberen Trichterrand;
 p_{nc} der über die mittragende Zylinderlänge gemittelte örtliche Wanddruck;
 p_{nh} der über die mittragende Kegellänge gemittelte Wanddruck;
 μ der Wandreibungskoeffizient an der Trichterwand.

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

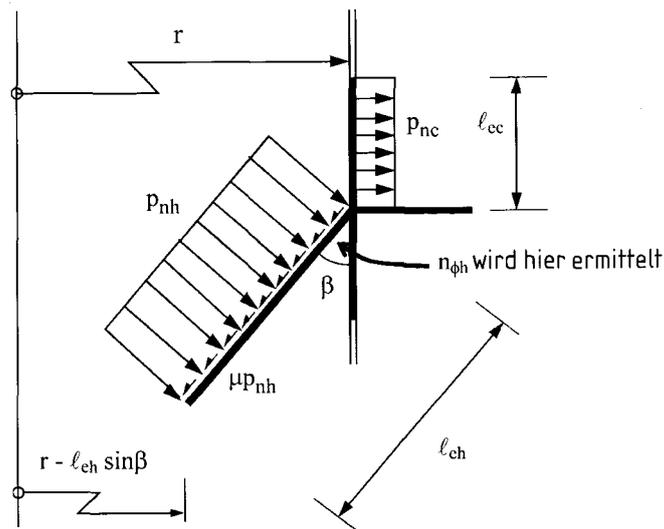


Bild 8.5 — Örtliche Wanddrücke und Membrankräfte, die den Abzweigungsbereich belasten

(10) Der Bemessungswert der in einem gleichmäßig unterstützten Abzweigungsbereich vorhandenen größten Druckspannung in Umfangsrichtung $\sigma_{u\theta,Ed}$ sollte wie folgt ermittelt werden:

$$\sigma_{u\theta,Ed} = \frac{N_{\theta,Ed}}{\eta A_{et}} \quad (8.16)$$

mit:

$$\eta = 1 + 0,3 \frac{b}{r} \quad (8.17)$$

Dabei ist

- $N_{\theta,Ed}$ der Bemessungswert der wirksamen Umfangsdruckkraft, siehe Absatz (9);
- A_{et} die effektive Gesamtquerschnittsfläche des Ringes, siehe Absatz (7);
- r der Radius der Silo-Zylinderwand;
- b die Breite des Plattenringes.

8.2.3 Ringträger an der Abzweigung

(1) Für Silos der Schadensfolgeklasse 3 sollte eine numerische Tragwerksberechnung durchgeführt werden, bei der alle flächenhaften Elemente als Schalensegmente modelliert werden und bei der in keinem der gekrümmten Elemente einem Prismenstab entsprechendes Verhalten angenommen wird. In der Berechnung sollte auch die finite Breite der diskreten Auflagerung berücksichtigt werden.

(2) Bei Silos der anderen Schadensfolgeklassen sollten die Biege- und Torsionsmomente im Ringträger unter Berücksichtigung von Last- und Auflagerexzentrizitäten gegenüber der Ringträgerachse berechnet werden.

(3) Der Gesamtwert der im Ringträger wirksamen Drucknormalkraft sollte als in Umfangsrichtung konstant angenommen und wie folgt ermittelt werden:

$$N_{\theta,Ed} = n_{\phi h,Ed} r_c \sin \beta - p_{nc} r_c l_{ec} - p_{nh} (\cos \beta - \mu \sin \beta) r_c l_{ch} \quad (8.18)$$

Dabei ist (siehe Bild 8.5)

- r_c der Radius der Silo-Zylinderwand;
- β der halbe Kegelöffnungswinkel des Trichters (am oberen Rand);
- ℓ_{ec} die mittragende Länge des Zylindersegmentes oberhalb der Abzweigung (siehe 8.2.2 (4));
- ℓ_{eh} die mittragende Länge des Kegelsegmentes (siehe 8.2.2 (4));
- $n_{\phi h,Ed}$ der Bemessungswert der Meridianzugkraft je Umfangslängeneinheit am oberen Trichterrand;
- p_{nc} der über die mittragende Zylinderlänge gemittelte örtliche Wanddruck;
- p_{nh} der über die mittragende Kegellänge gemittelte Wanddruck;
- μ der Wandreibungskoeffizient an der Trichterwand.

(4) Die in Abhängigkeit von der Umfangskoordinate θ veränderlichen Bemessungswerte des Ringträger-Biegemomentes $M_{r,Ed}$ um die horizontale (radiale) Querschnittsachse (Feldmomente positiv) und des Ringträger-Torsionsmomentes $T_{\theta,Ed}$ sollten wie folgt ermittelt werden:

$$\boxed{\text{AC}} M_{r,Ed} = n_{v,Ed} (r_g - e_r) [(r_g - e_s) \theta_0 (\sin \theta + \cot \theta_0 \cos \theta) - r_g + e_r] + n_{r,Ed} e_x (r_g - e_r) \boxed{\text{AC}} \quad \boxed{\text{AC}} (8.19a) \boxed{\text{AC}}$$

$$\boxed{\text{AC}} T_{\theta,Ed} = n_{v,Ed} (r_g - e_r) [(r_g - e_s) \theta_0 (\cot \theta_0 \sin \theta - \cos \theta) + r_g (\theta_0 - \theta)] \boxed{\text{AC}} \quad \boxed{\text{AC}} (8.19b) \boxed{\text{AC}}$$

mit:

$$\theta_0 = \frac{\pi}{j} \quad \boxed{\text{AC}} (8.20) \boxed{\text{AC}}$$

$$\boxed{\text{AC}} n_{v,Ed} = n_{xc,Ed} + n_{\phi h,Ed} \cos \beta \quad (8.21a)$$

$$n_{r,Ed} = n_{\phi h,Ed} \sin \beta \quad (8.21b) \boxed{\text{AC}}$$

Dabei ist (siehe Bild 8.6)

- θ die Umfangskoordinate (im Bogenmaß), von einem Auflager aus gemessen;
- θ_0 der zur halben Ringträger-Stützweite gehörende Umfangswinkel (im Bogenmaß);
- j die Anzahl der äquidistant über den Umfang verteilten Auflagerungen;
- r_g der Radius der Ringträgerachse;
- e_r die radiale Exzentrizität zwischen Zylinder und Ringträgerachse (positiv, wenn die Ringträgerachse einen größeren Radius hat);
- e_s die radiale Exzentrizität zwischen Auflagerungen und Ringträgerachse (positiv, wenn die Ringträgerachse einen größeren Radius hat);
- e_x die vertikale Exzentrizität zwischen Abzweigungszentrum und Ringträgerachse (positiv, wenn die Ringträgerachse unter dem Abzweigungszentrum liegt);
- $\boxed{\text{AC}} n_{v,Ed} \boxed{\text{AC}}$ der Bemessungswert der axialen Druckmembrankraft am unteren Zylinderrand;
- $\boxed{\text{AC}} n_{r,Ed} \boxed{\text{AC}}$ der Bemessungswert der meridionalen Zugmembrankraft am oberen Trichterrand.

(5) Die Bemessungswerte der größten Biegemomente um die horizontale (radiale) Querschnittsachse über der Auflagerung $M_{rs,Ed}$ und in Feldmitte zwischen den Auflagerungen $M_{rm,Sd}$ sollten wie folgt ermittelt werden:

8.3 Tragwiderstände

8.3.1 Allgemeines

(1) Der Abzweigungsbereich sollte den Anforderungen von EN 1993-1-6 entsprechen, diesen wird jedoch Genüge getan, wenn die Bemessungswerte der Bauteilwiderstände nach den folgenden Regeln ermittelt werden.

8.3.2 Widerstand gegen plastisches Versagen

8.3.2.1 Allgemeines

(1) Der Bemessungswert des Widerstandes sollte nach den Regeln von EN 1993-1-6 ermittelt werden. Ersatzweise und auf der sicheren Seite dürfen die nachfolgenden vereinfachten Näherungen verwendet werden.

8.3.2.2 Widerstand auf der Grundlage einer elastischen Berechnung

(1) Grundlage für den Nachweis gegen plastisches Versagen sollte die Spannung an der höchstbeanspruchten Stelle im Bereich der Abzweigung sein.

(2) Der Bemessungswert des Widerstandes gegen plastisches Versagen sollte demzufolge wie folgt ermittelt werden:

$$f_{p,Rd} = f_y / \gamma_{M0} \quad (8.26)$$

8.3.2.3 Widerstand auf der Grundlage einer plastischen Berechnung

(1) Als Bemessungswert des Widerstandes gegen plastisches Versagen sollte die größte erreichbare Membranzugkraft $n_{\phi h,Rd}$ im Trichter an der Abzweigung verwendet werden.

(2) Der Bemessungswert des Widerstandes gegen plastisches Versagen $n_{\phi h,Rd}$ sollte demzufolge wie folgt ermittelt werden:

$$\boxed{AC} \quad n_{\phi h,Rd} = \frac{1}{\sin \beta} \left\{ \left(\frac{A_p + l_{oc} t_c + l_{os} t_s + l_{oh} t_h}{r} \right) \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} + p_{nc} l_{oc} + p_{nh} (\cos \beta - \mu \sin \beta) l_{oh} \right\} \boxed{AC} \quad (8.27)$$

mit:

$$\alpha = \sqrt{\frac{t_c^2}{t_s^2 + t_h^2}} \quad (8.28)$$

$$\psi = 0,7 + 0,6 \alpha^2 - 0,3 \alpha^3 \quad (8.29)$$

— für den Zylinder $l_{oc} = 0,975 \sqrt{r t_c}$

— für die Standzarge $l_{os} = 0,975 \psi \sqrt{r t_s}$

— für den Trichterkegel $l_{oh} = 0,975 \psi \sqrt{\frac{r t_h}{\cos \beta}}$

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

Dabei ist (siehe Bild 8.5)

- r der Radius der Silo-Zylinderwand;
- t_c die Wanddicke des Zylinders;
- t_s die Wanddicke der Standzarge;
- t_h die Wanddicke des Trichters;
- A_p die Querschnittsfläche des Ringes;
- β der halbe Kegelöffnungswinkel des Trichters (am oberen Rand);
- l_{oc} die plastisch mittragende Länge des Silozylinders oberhalb der Abzweigung;
- l_{oh} die plastisch mittragende Länge des Trichterkegels;
- l_{os} die plastisch mittragende Länge der Standzarge unterhalb der Abzweigung;
- $n_{\phi h, Rd}$ der Bemessungswert des Meridianmembrankraftwiderstandes je Umfangslängeneinheit am oberen Trichterrand;
- p_{nc} der über die mittragende Zylinderlänge gemittelte örtliche Wanddruck;
- p_{nh} der über die mittragende Kegellänge gemittelte Wanddruck;
- μ der Wandreibungskoeffizient an der Trichterwand.

8.3.3 Widerstand gegen Knicken innerhalb der Ringebene

- (1) Der Bemessungswert des Widerstandes sollte nach den Regeln von EN 1993-1-6 ermittelt werden. Ersatzweise und auf der sicheren Seite dürfen die nachfolgenden vereinfachten Näherungen verwendet werden.
- (2) Grundlage für den Nachweis gegen Knicken innerhalb der Ringebene sollte die größte Umfangsdruckmembranspannung im Bereich der Abzweigung sein.
- (3) Der Bemessungswert des Widerstandes gegen Knicken innerhalb der Ringebene sollte demzufolge als Bemessungs-Knickspannung $\sigma_{ip, Rd}$ wie folgt ermittelt werden:

$$\sigma_{ip, Rd} = \frac{4 EI_z}{A_{et} r_g^2} \cdot \frac{1}{\gamma_{M1}} \quad (8.30)$$

Dabei ist

- EI_z die Biegesteifigkeit des Ersatzringquerschnittes (siehe Bild 8.3) um seine vertikale Achse;
- A_{et} die effektive Querschnittsfläche des Ersatzringes nach 8.2.2;
- r_g der Radius der Schwerachse des Ersatzringquerschnittes.

- (4) Die vorstehende Berechnung eines Knickwiderstandes und der zugehörige Tragsicherheitsnachweis in 8.4 dürfen entfallen, wenn der halbe Kegelöffnungswinkel β größer ist als β_{lim} .

ANMERKUNG Der Wert von β_{lim} darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es wird ein Wert von $\beta_{lim} = 20^\circ$ empfohlen.

8.3.4 Widerstand gegen Knicken aus der Ringebene heraus und gegen örtliches Beulen**8.3.4.1 Allgemeines**

(1) Der Bemessungswert des Widerstandes sollte nach den Regeln von EN 1993-1-6 ermittelt werden. Ersatzweise und auf der sicheren Seite dürfen die nachfolgenden vereinfachten Näherungen verwendet werden.

8.3.4.2 Örtliches Beulen der Schale in der Nähe des Abzweigungsbereiches

(1) Bei Abzweigungsbereichen ohne Ring an der Abzweigung (einfache Kegel/Zylinder-Knotenlinie) oder bei ringversteiften Abzweigungen sollte als Bemessungswert des Beulwiderstandes der an den Abzweigungsbereich angrenzenden Wand die Bemessungs-Beulspannung $\sigma_{op,Rd}$ verwendet werden:

$$\sigma_{op,Rd} = \frac{1}{\gamma_{M1}} \cdot 4,1 (\cos \beta)^{0,4} \cdot \left(\frac{t}{r_s}\right)^{1,5} \cdot \left(\frac{E t r_g}{A_{et}}\right) \quad (8.31)$$

mit:

$r_s = r$ für die zylindrische Wand;

$r_s = \frac{r}{\cos \beta}$ für die konische Trichterwand.

Dabei ist

- r der Radius der Silo-Zylinderwand;
- β der halbe Kegelöffnungswinkel des Trichters (am oberen Rand);
- t die Wanddicke des betreffenden Schalensegments;
- A_{et} die effektive Querschnittsfläche des Ersatzringes nach 8.2.2;
- r_g der Radius der Schwerachse des Ersatzringquerschnittes.

8.3.4.3 Abzweigung mit Plattenring

(1) Für Abzweigungen mit Plattenring sollte als Bemessungswert des Widerstandes gegen Knicken aus der Ringebene heraus die Bemessungs-Knickspannung $\sigma_{op,Rd}$ verwendet werden:

$$\sigma_{op,Rd} = kE \left(\frac{t_p}{b}\right)^2 \cdot \frac{1}{\gamma_{M1}} \quad (8.32)$$

mit:

$$k = \frac{\eta_c k_c + \eta_s k_s}{\eta_c + \eta_s} \quad (8.33)$$

$$k_s = 0,385 + 0,452 \sqrt{\frac{b}{r}} \quad (8.34)$$

$$k_c = 1,154 + 0,56 \frac{b}{r} \quad (8.35)$$

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

$$\eta_s = 0,43 + 0,1 \left(\frac{r}{20b} \right)^2 \quad (8.36)$$

$$\eta_c = 0,5 \left\{ \left(\frac{t_c}{t_p} \right)^{5/2} + \left(\frac{t_s}{t_p} \right)^{5/2} + \left(\frac{t_h}{t_p} \right)^{5/2} \right\} \quad (8.37)$$

Dabei ist

- r der Radius der Silo-Zylinderwand;
- t_c die Wanddicke des Zylinders;
- t_s die Wanddicke der Standzarge;
- t_h die Wanddicke des Trichters;
- t_p die Dicke des Plattenringes;
- b die Breite des Plattenringes;
- k_c der Plattenbeulkoeffizient für einen Ring mit eingespanntem Innenrand;
- k_s der Plattenbeulkoeffizient für einen Ring mit gelenkig gelagertem Innenrand;
- γ_{M1} der Teilsicherheitsbeiwert nach 2.9.2.

8.3.4.4 Abzweigung mit T-Ring

(1) Die folgenden Regeln gelten für einen Ring an der Abzweigung, der aus einer Kreisringplatte der Breite b_p mit einem symmetrisch angeordneten Versteifungsflansch der Höhe b_f an ihrem Außenrand besteht, so dass ein T-Querschnitt mit Basis im Verzweigungszentrum entsteht.

(2) Grundlage für den Nachweis gegen Knicken eines T-Ringes aus der Ringebene heraus sollte die größte Umfangsmembrandruckspannung am Innenrand der zentralen Kreisringplatte des Ringes sein. Der Bemessungswert des Widerstandes sollte demzufolge als Bemessungs-Knickspannung $\sigma_{op,Rd}$ wie folgt ermittelt werden:

$$\sigma_{op,Rd} = \frac{\eta_s \sigma_s + \eta_c \sigma_c}{\eta_s + \eta_c} \cdot \frac{1}{\gamma_{M1}} \quad (8.38)$$

mit:

$$\eta_s = 0,385 + \left(\frac{r}{175 b_p} \right)^2 \quad (8.39)$$

$$\eta_c = 0,5 \left\{ \left(\frac{t_c}{t_p} \right)^{5/2} + \left(\frac{t_s}{t_p} \right)^{5/2} + \left(\frac{t_h}{t_p} \right)^{5/2} \right\} \quad (8.40)$$

$$\sigma_s = \frac{EI_r}{A r_o^2} \left(0,2 \frac{b_p}{r} + \frac{G I_t}{EI_r} + 2 \sqrt{\frac{G I_t b_p}{EI_r r}} \right) \quad (8.41)$$

$$\sigma_c = E \left(\frac{t_p}{b_p} \right)^{1,1} \cdot \frac{(1 + 5\rho)(1 + 32\rho - 16\rho^2)}{64 \left(1 + 5 \frac{b_f t_f}{b_p t_p} \right)} \quad (8.42)$$

$$r_o^2 = \frac{I_r + I_z + A x_c^2}{A} \quad (8.43)$$

$$\rho = \frac{b_f}{b_p} \left(\frac{t_f}{t_p} \right)^{1/3} \quad (8.44)$$

Dabei ist

- r der Radius der Silo-Zylinderwand;
- t_c die Wanddicke des Zylinders;
- t_s die Wanddicke der Standzarge;
- t_h die Wanddicke des Trichters;
- t_p die Dicke der Kreisringplatte;
- t_f die Dicke des vertikalen Außenflansches des T-Querschnitts;
- b_p die Breite der Kreisringplatte;
- b_f die Höhe (Flanschbreite) des vertikalen Außenflansches des T-Querschnitts;
- A die Querschnittsfläche des T-Ringes;
- x_c der Schwerpunktabstand des T-Querschnittes von seinem Innenrand;
- I_r das Flächenmoment 2. Grades (Trägheitsmoment) des T-Querschnitts um seine radiale Achse;
- I_z das Flächenmoment 2. Grades (Trägheitsmoment) des T-Querschnitts um seine vertikale Achse;
- I_t das St.Venantsche Torsionsträgheitsmoment des T-Querschnitts;
- γ_{M1} der Teilsicherheitsbeiwert nach 2.9.2.

8.4 Tragsicherheitsnachweise

8.4.1 Gleichmäßig unterstützte Abzweigungsbereiche

(1) Wenn für den Silo eine computergestützte Schalenberechnung durchgeführt wurde, sollten die Nachweise nach EN 1993-1-6 geführt werden. Falls die Computerberechnung keine Beulanalyse einschließt, dürfen die Beulwiderstände nach 8.3 für die nach EN 1993-1-6 geforderten Nachweise verwendet werden.

(2) Bei Silos, die über eine Standzarge gleichmäßig auf einem Fundament aufgelagert sind (siehe 5.4.2) und für die die Berechnungen nach 8.2 durchgeführt wurden, darf angenommen werden, dass die Abzweigung nur durch die in 8.2.2 (10) ermittelte konstante Umfangsmembranspannung $\sigma_{u,\theta Ed}$ beansprucht wird. Die Tragsicherheitsnachweise sollten dann wie nachfolgend beschrieben geführt werden.

(3) Wird der Nachweis gegen plastisches Versagen des Abzweigungsbereiches auf der Grundlage einer elastischen Berechnung geführt, so sollte er wie folgt geführt werden:

$$\sigma_{u,\theta,Ed} \leq f_{p,Rd} \quad (8.45)$$

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

Dabei ist

- $\sigma_{u,\theta,Ed}$ der Bemessungswert der Umfangsdruckspannung nach 8.2.2 (10);
 $f_{p,Rd}$ der Bemessungswert des Widerstandes gegen plastisches Versagen nach 8.3.2.2.

(4) Wird der Nachweis gegen plastisches Versagen des Abzweigungsbereiches auf der Grundlage einer plastischen Berechnung geführt, so sollte er wie folgt geführt werden:

$$n_{\phi h,Ed} \leq n_{\phi h,Rd} \quad (8.46)$$

Dabei ist

- $n_{\phi h,Ed}$ der Bemessungswert der Meridian-Zugmembrankraft am oberen Trichterrand;
 $n_{\phi h,Rd}$ der Bemessungswert des Widerstandes gegen plastisches Versagen nach 8.3.2.3.

(5) Der Nachweis gegen Knicken des Abzweigungsbereiches innerhalb der Ringebene sollte wie folgt geführt werden:

$$\sigma_{u\theta,Ed} \leq \sigma_{ip,Rd} \quad (8.47)$$

Dabei ist

- $\sigma_{u\theta,Ed}$ der Bemessungswert der Umfangsdruck-Spannung nach 8.2.2 (10);
 $\sigma_{ip,Rd}$ der Bemessungswert des Widerstandes gegen Knicken innerhalb der Ringebene nach 8.3.3.

(6) Der Nachweis gegen Knicken innerhalb der Ringebene darf entfallen, wenn die folgenden beiden Bedingungen erfüllt sind:

- der halbe Kegelöffnungswinkel β ist größer als β_{lim} , und über dem Ring befindet sich ein Zylinder;
- Unrundheits-Verformungen des oberen Zylinderrandes werden, falls die Höhe L des Zylinders geringer als $L_{min} = k_L \sqrt{rt}$ ist, durch einen Ring behindert, dessen Biegesteifigkeit EI_z um seine vertikale Achse (Biegung in Umfangsrichtung) größer ist als:

$$EI_{z,min} = k_R E (rt)^2 \sqrt{(t/r)} \quad (8.48)$$

Dabei ist

- t die Dicke des dünnsten Schusses im Zylinder.

ANMERKUNG 1 Die Werte von β_{lim} , k_L und k_R dürfen im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es werden Werte von $\beta_{lim} = 10^\circ$; $k_L = 10$ und $k_R = 0,04$ empfohlen.

ANMERKUNG 2 Die Anforderung, dass der obere Zylinderrand gehalten sein sollte, um seine Rundheit sicherzustellen, gilt nur für kurze Zylinder über der Abzweigung, da höhere Zylinder, auch ohne am oberen Rand gehalten zu sein, ausreichend widerstandsfähig gegen diese Art des Ringknickens sind.

(7) Der Nachweis gegen Knicken des Abzweigungsbereiches aus der Ringebene heraus sollte wie folgt geführt werden:

$$\sigma_{u\theta,Ed} \leq \sigma_{op,Rd} \quad (8.49)$$

Dabei ist:

- $\sigma_{u\theta,Ed}$ der Bemessungswert der Umfangsdruckspannung nach 8.2.2 (10);
 $\sigma_{op,Rd}$ der entsprechende Bemessungswert des Widerstandes gegen Knicken aus der Ringebene heraus nach 8.3.4.

8.4.2 Ringträger an der Abzweigung

(1) Wenn für den Silo eine computergestützte Schalenberechnung durchgeführt wurde, sollten die Nachweise nach EN 1993-1-6 geführt werden. Falls die Schalenberechnung keine Beulanalyse einschließt, dürfen die Beulwiderstände nach 8.3 für die in EN 1993-1-6 geforderten Tragsicherheitsnachweise verwendet werden.

(2) Bei Silos, die diskret aufgelagert sind, so dass der Abzweigungsbereich als Ringträger wirkt, sollten dessen sowohl über den Querschnitt als auch über den Umfang veränderliche Umfangsmembranspannungen bei den Tragsicherheitsnachweisen berücksichtigt werden. Falls die Berechnungen nach 8.2 durchgeführt wurden, sollten die Tragsicherheitsnachweise wie nachfolgend beschrieben geführt werden.

(3) Der Nachweis gegen plastisches Versagen des Abzweigungsbereiches sollte unter Verwendung der nach 8.2.3 (8) ermittelten Spannung $\sigma_{m\theta,Ed}$ wie folgt geführt werden:

$$\sigma_{m\theta,Ed} \leq f_{p,Rd} \quad (8.50)$$

Dabei ist

- $\sigma_{m\theta,Ed}$ der Bemessungswert der absolut größten Umfangsspannung nach 8.2.3 (8);
 $f_{p,Rd}$ der Bemessungswert des Widerstandes gegen plastisches Versagen nach 8.3.2.2.

(4) Der Nachweis gegen Knicken des Abzweigungsbereiches innerhalb der Ringebene sollte unter Verwendung der nach 8.2.3 (9) ermittelten Spannung $\sigma_{c\theta,Ed}$ wie folgt geführt werden:

$$\sigma_{c\theta,Ed} \leq \sigma_{ip,Rd} \quad (8.51)$$

Dabei ist

- $\sigma_{c\theta,Ed}$ der Bemessungswert der größten Umfangsdruckspannung nach 8.2.3 (9);
 $\sigma_{ip,Rd}$ der Bemessungswert des Widerstandes gegen Knicken innerhalb der Ringebene nach 8.3.3.

(5) Der Nachweis gegen Knicken innerhalb der Ringebene darf entfallen, wenn die folgenden beiden Bedingungen erfüllt werden:

- der halbe Kegelöffnungswinkel β ist größer als β_{lim} , und über dem Ring befindet sich ein Zylinder;
- Unrundheits-Verformungen des oberen Zylinderrandes werden, falls die Höhe L des Zylinders geringer als $L_{min} = k_L \sqrt{rt}$ ist, durch einen Ring behindert, dessen Biegesteifigkeit EI_z um seine vertikale Achse (Biegung in Umfangsrichtung) größer ist als:

$$EI_{z,min} = k_R E (rt)^2 \sqrt{(t/r)} \quad (8.52)$$

Dabei ist

- t die Dicke des dünnsten Schusses im Zylinder;
 L die Höhe der Schalenwand oberhalb des Ringes.

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

ANMERKUNG 1 Die Werte von β_{lim} , k_L und k_R dürfen im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es werden Werte von $\beta_{lim} = 10^\circ$; $k_L = 10$ und $k_R = 0,04$ empfohlen.

ANMERKUNG 2 Die Anforderung, dass der obere Zylinderrand gehalten sein sollte, um seine Rundheit sicherzustellen, gilt nur für kurze Zylinder über dem Ring, da höhere Zylinder, auch ohne am oberen Rand gehalten zu werden, ausreichend widerstandsfähig gegen diese Art des Ringknickens sind.

(6) Der Nachweis gegen Knicken des Abzweigungsbereiches aus der Ringebene heraus sollte unter Verwendung der nach 8.2.3 (9) ermittelten Spannung $\sigma_{c\theta,Ed}$ wie folgt geführt werden:

$$\sigma_{c\theta,Ed} \leq \sigma_{op,Rd} \quad (8.53)$$

Dabei ist

$\sigma_{c\theta,Ed}$ der Bemessungswert der größten Umfangsdruckspannung nach 8.2.3 (9);

$\sigma_{op,Rd}$ der Bemessungswert des Widerstandes gegen Knicken aus der Ringebene heraus nach 8.3.4.

8.5 Angaben zur Auflageranordnung am Abzweigungsbereich

8.5.1 Zargengelagerte Abzweigungsbereiche

(1) Bei Silos, die über eine Standzarge gleichmäßig auf einem Fundament aufgelagert sind (siehe 5.4.2), darf angenommen werden, dass der Abzweigungsbereich nur durch Umfangsmembranspannungen beansprucht wird.

(2) Für die Standzarge sollte ein Beulsicherheitsnachweis für Axialdruckbeulen geführt werden, in dem gegebenenfalls Öffnungen in der Zarge zu berücksichtigen sind.

8.5.2 Stützelgelagerte Abzweigungsbereiche und Ringträger

(1) Bei Silos, die auf einem Ringträger aufgelagert sind, der diskrete Stützenkräfte in die Schale einleiten soll, sollten Abzweigung und Ringträger die in 8.2.3 und 8.4.2 angegebenen Bedingungen erfüllen.

(2) Falls der Ringträger aus einer oberen und einer unteren Hälfte zusammengeschrubt wird, von denen jede mit einem anderen Schalensegment verbunden ist, sollten die Schrauben für den vollen Bemessungswert der von der oberen Ringhälfte zu tragenden Kraft in Umfangsrichtung dimensioniert werden, wobei auch die Biegebeanspruchung des Ringes zu beachten ist.

8.5.3 Basisring

(1) Kontinuierlich bodengelagerte Silos sollten mit einem Basisring versehen und verankert werden.

(2) Der Abstand der Ankerschrauben oder sonstigen Verankerungspunkte in Umfangsrichtung sollte nicht größer sein als $4\sqrt{rt}$, wobei t die örtliche Schalenwanddicke ist.

(3) Der Basisring sollte eine Biegesteifigkeit EI_z um seine vertikale Achse (Umfangsbiegung) von mindestens

$$EI_{z,min} = k E r t^3 \quad (8.54)$$

haben, wobei t als die Wanddicke des Schusses am Basisring anzusetzen ist.

ANMERKUNG Der Wert von k darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es wird ein Wert von $k = 0,10$ empfohlen.

9 Bemessung von rechteckigen und ebenwandigen Silos

9.1 Grundlagen

(1) Ein rechteckiger Silo sollte entweder als versteiftes Kastentragwerk bemessen werden, in dem die Lasten vorwiegend über Biegung abgetragen werden, oder als dünnwandiges Membrantragwerk, in dem die Lasten nach großen Verformungen vorwiegend über Membrankräfte abgetragen werden.

(2) Wenn der Kasten auf Biegung bemessen wird, sollten die Stöße so ausgebildet werden, dass die bei der Berechnung angenommene Kontinuität bei der Bauausführung tatsächlich erreicht wird.

9.2 Klassifizierung der Tragwerksformen

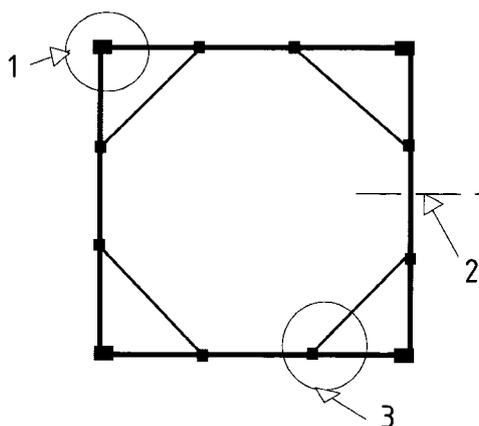
9.2.1 Unversteifte Silos

(1) Ein Tragwerk, das aus ebenen Stahlblechen ohne Steifen besteht, wird ‚unversteifter Kasten‘ genannt.

(2) Ein Tragwerk, das Steifen nur entlang der Verbindungslinien von Blechen enthält, die nicht in der gleichen Ebene liegen, wird ebenfalls ‚unversteifter Kasten‘ genannt.

9.2.2 Versteifte Silos

(1) Ein Tragwerk, das aus ebenen Stahlblechen mit Steifen innerhalb der ebenen Blechflächen besteht, wird ‚versteifter Kasten‘ genannt. Die Steifen können horizontal (in Umfangsrichtung) oder vertikal oder orthogonal (in beiden Richtungen) verlaufen.



Legende

- 1 Detail 1
- 2 Vertikalschnitt
- 3 Detail 2

Bild 9.1 — Grundriss eines rechteckigen Kastensilos mit Zugankern

9.2.3 Silos mit Zugankern

(1) Silos mit Zugankern können einen quadratischen oder allgemein rechteckigen Grundriss haben.

ANMERKUNG Einige typische konstruktive Details eines dreifeldrigen quadratischen Einzellensilos sind  in den Bildern 9.1 und 9.2 dargestellt. 

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

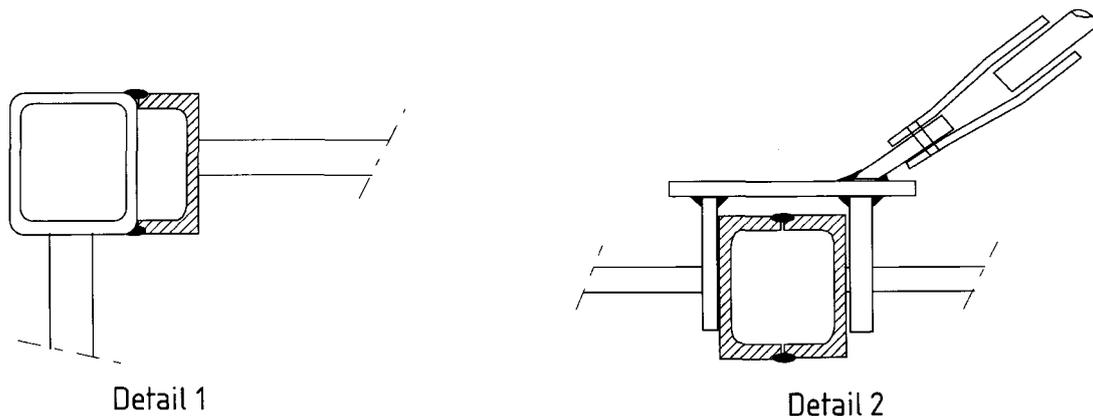


Bild 9.2 — Typische Anschlussdetails eines Kastensilos mit Zugankern

9.3 Tragwiderstände von unverteiften vertikalen Wänden

- (1) Der Tragwiderstand von vertikalen Wänden sollte nach EN 1993-1-7 ermittelt werden. Dem wird Genüge getan, wenn die Nachweise nach den Regeln in 9.4 geführt werden.
- (2) Der Tragwiderstand von vertikalen Wänden sollte unter Berücksichtigung sowohl des Membran- als auch des Plattenbiegungstragverhaltens ermittelt werden.
- (3) Die von der unverteiften Platte aufzunehmenden Beanspruchungen lassen sich in folgende Kategorien einteilen:

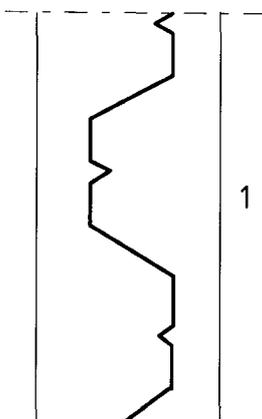
- Gesamtbiegung als zweiachsig gespannte Platte aus Schüttgutbelastung;
- Membranbeanspruchung aus Querscheibenfunktion;
- örtliche Biegung aus Schüttgut und/oder Ausrüstung.

9.4 Tragwiderstand von Silowänden aus versteiften und profilierten Platten

9.4.1 Allgemeines

- (1) Der Tragwiderstand unverteifter Teile von vertikalen Wänden sollte nach den in 9.4 angegebenen Regeln ermittelt werden. Dabei sollte sowohl das Membran- als auch das Plattenbiegungstragverhalten berücksichtigt werden.
- (2) Horizontal profilierte Platten AC sollten für Folgendes nachgewiesen werden (siehe Bild 9.3) AC:
 - Gesamtbiegung aus Schüttgutbelastung;
 - Membranspannungen aus Querscheibenfunktion;
 - örtliche Biegung aus Schüttgut und/oder Ausrüstung.
- (3) Die effektiven Biegesteifigkeiten und Biegegewidstände der versteiften Platten sollten nach den Regeln für Trapezbleche mit Zwischensteifen in EN 1993-1-3 ermittelt werden.

- (4) Die Steifen sollten nach den in EN 1993-1-1 und EN 1993-1-3 angegebenen Regeln für Stäbe bemessen werden, wobei der Zusammenhang der Steifen mit den Wandelementen, die Auswirkungen der Exzentrizität der Wandbleche gegenüber den Steifenachsen und der Durchlaufwirkung der Wandelemente sowie der Horizontal- und Vertikalsteifen zu berücksichtigen sind. Darüber hinaus sollten bei der Bauteilbemessung der Steifen Spannungen rechtwinklig zur Steifenachse an den Stellen berücksichtigt werden, an denen die Steifen statisch durchlaufende Wandelemente kreuzen.
- (5) Die Lasteinleitung aus vertikalen Steifen in untere Randbauteile sollte der Tragfähigkeit des betreffenden Bauteils und des vorhandenen Fundaments entsprechend bemessen werden.
- (6) Die Schubsteifigkeit und der Schubwiderstand sollten aus Versuchen oder geeigneten theoretischen Beziehungen hergeleitet werden.
- (7) Falls keine genaueren Angaben vorliegen, darf der Schubbeulwiderstand nach 5.3.4.6 unter Annahme eines unendlich großen Schalenradius ermittelt werden.
- (8) Bei Versuchen darf die Schubsteifigkeit aus der Lastverformungsbeziehung als Sekantenmodul bei $2/3$ der erreichten Schubtraglast entnommen werden, siehe Bild 9.4.



1 Vertikalschnitt

Bild 9.3 — Typischer Schnitt durch die profilierte Wand eines rechteckigen Silos

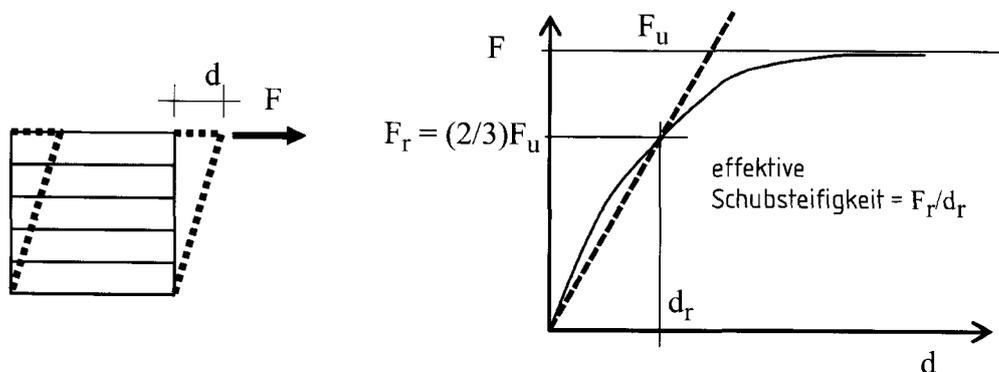


Bild 9.4 — Schubverhalten einer profilierten Wand

9.4.2 Gesamtbiegung aus direkter Einwirkung des Schüttgutes

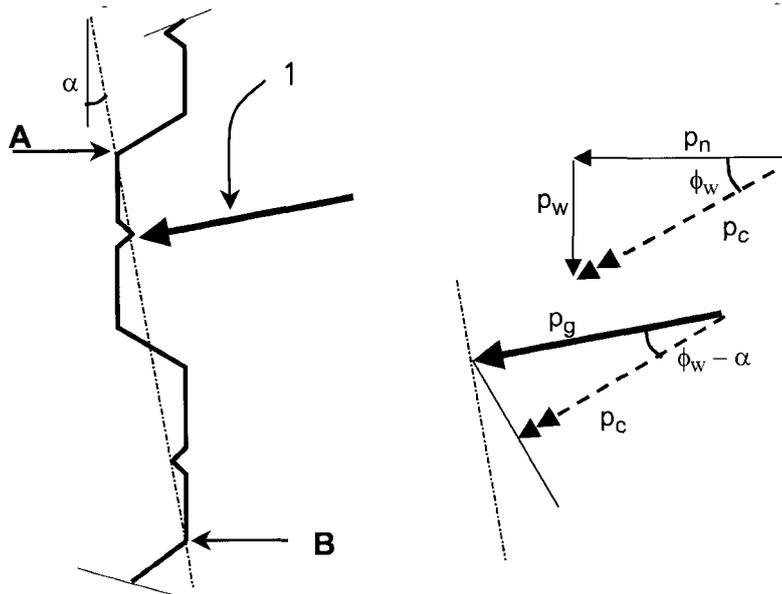
- (1) Wenn der Horizontaldruck aus dem Schüttgut, gegebenenfalls kombiniert mit Wandreibung, horizontale Biegung zur Folge hat, sollte diese Biegebeanspruchung bei der Bemessung berücksichtigt werden.

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

(2) Für Biegung aus dem Horizontaldruck allein sollte die Berechnung auf den effektiven Querschnittswerten nach EN 1993-1-3 beruhen.

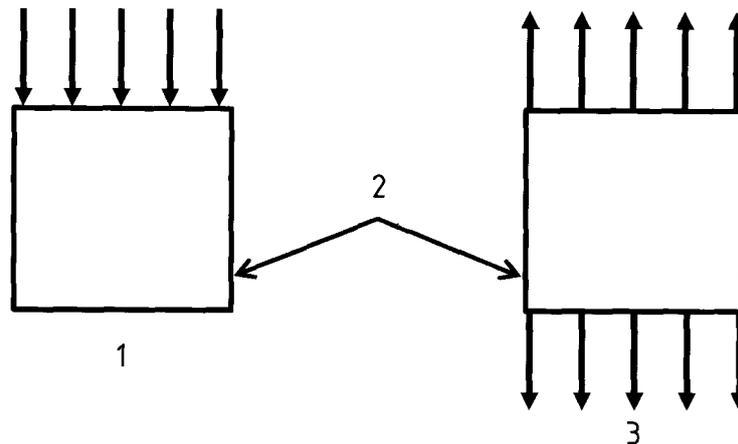
(3) Für Biegung aus Horizontaldruck in Kombination mit Wandreibung darf die Berechnung nach dem in Bild 9.5 skizzierten Ansatz vorgenommen werden, bei dem der Wandabschnitt zwischen den Punkten A und B als biegebeanspruchter Querschnitt unter der Einwirkung des kombinierten Drucks p_g angenommen wird. Die aus dem Biegemoment resultierenden Spannungen sollten mit denen überlagert werden, die durch die Axialkraft verursacht werden, die sich aus dem Schüttgutdruck auf die rechtwinklig angrenzenden Wände ergibt (siehe 9.4.3).

ANMERKUNG Diese Berechnung ist allgemein üblich und eingeführt. Es darf jedoch angemerkt werden, dass dabei die Dehnungskontinuität zwischen benachbarten Wandabschnitten vernachlässigt wird.



1 Kombiniertes Druck p_g rechtwinklig zur Ebene A-B

Bild 9.5 — Biegebeanspruchung bei kombinierter Einwirkung von Horizontaldruck und Wandreibung (Vertikalschnitt)



Legende

- 1 Windlast
- 2 Querscheibenwirkung in diesen Wänden
- 3 Schüttgutdruck

Bild 9.6 — Membranbeanspruchung in Wänden aus Schüttgutdruck oder Windlast

9.4.3 Membranbeanspruchung aus Querscheibenfunktion

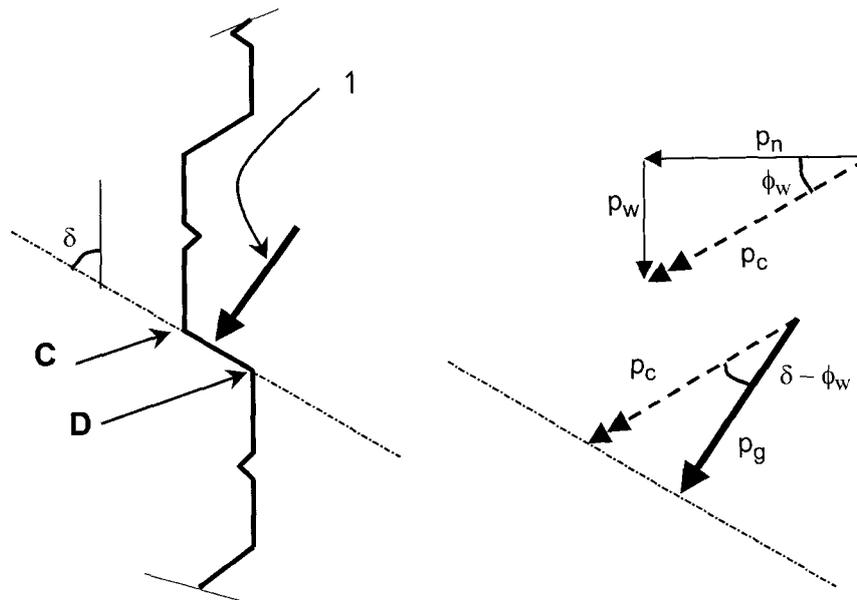
- (1) Die Membranbeanspruchungen resultieren aus Schüttgutdruck und/oder Windlast auf die jeweils rechtwinklig benachbarten Wände, siehe Bild 9.6.
- (2) Als einfache Näherung darf angenommen werden, dass der Schüttgutdruck nur durch Normalspannungen aufgenommen wird (d. h., die Wandreibung wird vernachlässigt).
- (3) Normal- und Schubspannungen aus Windlast dürfen entweder durch "Handberechnungen" oder mit Hilfe einer FE-Berechnung ermittelt werden.

9.4.4 Örtliche Biegung aus Schüttgut und/oder Ausrüstung

- (1) Die Möglichkeit schädlicher lokaler Biegeeffekte in tragenden Einzelteilen, die durch den Schüttgutdruck verursacht werden, sollte beachtet werden.

ANMERKUNG Bei der in Bild 9.7 dargestellten Situation kann der Nachweis des Plattenelementes CD bemessungsbestimmend sein.

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)



1 Kombiniertes Druck p_g rechtwinklig zur Ebene C-D

Bild 9.7 — Mögliche lokale Biegeeffekte

9.5 Silos mit innen liegenden Zugankern

9.5.1 Durch Schüttgutdruck verursachte Kräfte in innen liegenden Zugankern

- (1) Die vom Schüttgut auf den Zuganker ausgeübte Belastung sollte ermittelt werden.
- (2) Falls keine genaueren Berechnungen angestellt werden, darf die auf den Zuganker ausgeübte Streckenlast q_t je Längeneinheit des Zugankers näherungsweise wie folgt ermittelt werden:

$$q_t = C_t p_v b \quad (9.1)$$

mit:

$$C_t = \frac{C_s \beta}{k_L} \quad (9.2)$$

Dabei ist

- p_v der vertikale Schüttgutdruck in Höhe des Zugankers;
- b die größte horizontale Breite des Zugankers;
- C_t der Lastvergrößerungsfaktor;
- C_s der Formfaktor für den Ankerquerschnitt;
- k_L der Lastfallfaktor;
- β der von der Position des Zugankers innerhalb der Silozelle abhängige Lagefaktor (siehe Bilder 9.8 und 9.9).

(3) Der Formfaktor C_s sollte wie folgt angesetzt werden:

- für glatte Kreisquerschnitte: $C_s = C_{sc}$
- für raue Kreisquerschnitte oder quadratische Querschnitte: $C_s = C_{ss}$

ANMERKUNG Die Werte von C_{sc} und C_{ss} dürfen im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es werden Werte von $C_{sc} = 1,0$ und $C_{ss} = 1,2$ empfohlen.

(4) Der Lastfallfaktor k_L sollte wie folgt angesetzt werden:

- für den Füllvorgang: $k_L = k_{Lf}$
- für den Entleervorgang: $k_L = k_{Le}$

ANMERKUNG Der Wert von k_L darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es werden Werte von $k_{Lf} = 4,0$ und $k_{Le} = 2,0$ empfohlen.

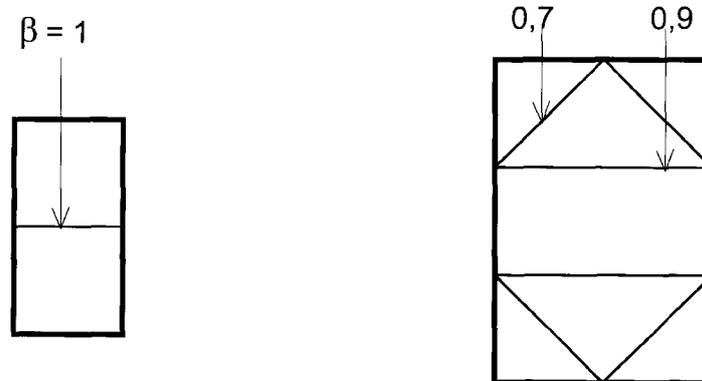


Bild 9.8 — Lagefaktor β für innen liegende Zuganker

9.5.2 Modellierung der Zuganker

(1) Je nach Steifigkeiten sind zwei Arten von Zugankern zu unterscheiden. Ein Anker sollte als Seil behandelt werden, wenn seine Biegesteifigkeit vernachlässigbar klein ist. Hat er neben seiner Axialsteifigkeit auch eine signifikante Biegesteifigkeit, so sollte er als Stab behandelt werden. Die Berechnung sollte auf diese Klassifizierung Rücksicht nehmen.

(2) Ist der Zuganker ein Stab, so sollten zusätzlich zur axialen Zugkraft die Biegemomente berücksichtigt werden.

(3) Die Zugkraft N (und bei Stäben: die Biegemomente M) im Zuganker sollte (sollten) unter Berücksichtigung der geometrischen Nichtlinearität berechnet werden. Dabei sollten auch die tatsächlichen Randbedingungen und die Steifigkeit der Silowand berücksichtigt werden (siehe Bild 9.10).

(4) Für die Bemessung sind die Werte N und M am Anschluss des Zugankers an die Wand maßgebend.

(5) Der Anfangsdurchhang der Anker sollte \overline{AC} zwischen dem Kunden, dem Tragwerksplaner und dem Hersteller vereinbart werden \overline{AC} vereinbart werden. Für Seile (Biegesteifigkeit vernachlässigbar) sollte der Anfangsdurchhang nicht größer als $k_s L$ sein, wobei L die Länge des Ankers ist.

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

ANMERKUNG 1 Der Wert von k_s darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es wird ein Wert von $k_s = 0,01$ empfohlen.

ANMERKUNG 2 Bisher wurde der Anfangsdurchhang oft zu $0,02 L$ angenommen. Der hier empfohlene kleinere Wert wird benötigt, um bei Betrieb einen näherungsweise linearen Zusammenhang zwischen Drücken und eingetragenen Zugkräften zu erhalten.

(6) Die Ankeranschlüsse sollten sowohl für die vertikale als auch die horizontale Komponente der Ankerzugkraft ausgebildet werden.

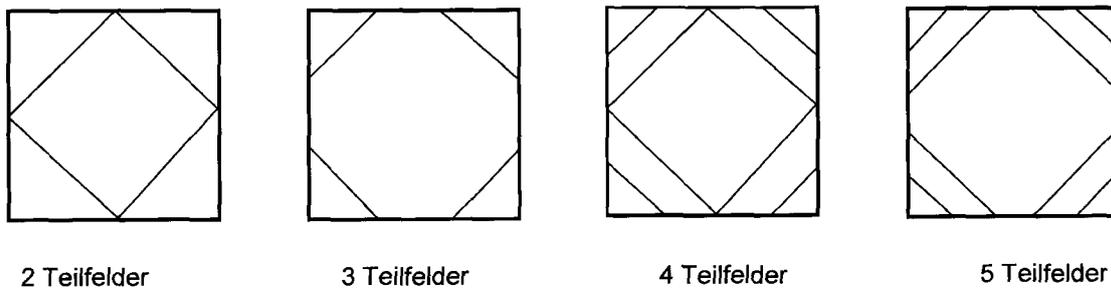


Bild 9.9 — Zuganker über Eck: $\beta = 0,7$

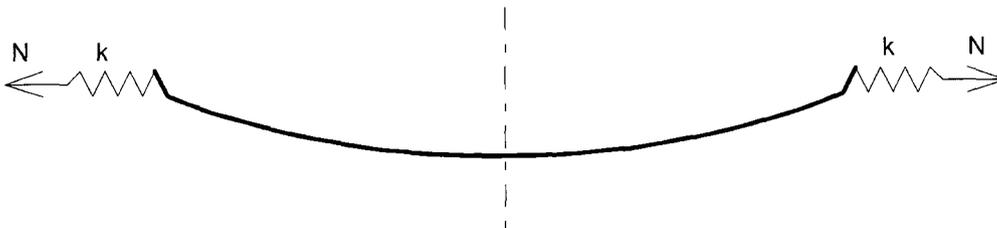


Bild 9.10 — Aufbau der Zugkraft in einem Zuganker

9.5.3 Lastfälle für Zugankeranschlüsse

(1) Bei der Berechnung der Zuganker sind zu berücksichtigen:

- Einwirkungen aus dem Schüttgut;
- Zwängungskräfte, die infolge der Wandverformungen aus anderen Lastfällen in die Zuganker eingetragen werden.

(2) Die folgenden beiden Lastfälle sollten bei der Ermittlung der Anschlusskräfte und -momente eines Zugankers beachtet werden:

- a) Lastfall 1: Streckenlast q_t und Zugkraft N , wie nach 9.5.1 und 9.5.2 berechnet;
- b) Lastfall 2: Erhöhter Streckenlastwert $1,2 q_t$ und reduzierter Zugkraftwert $0,7 N$, wobei q_t und N die Werte nach 9.5.1 und 9.5.2 sind.

9.6 Tragsicherheit von pyramidischen Trichtern

(1) Pyramidische Trichter (Bild 9.12) sollten als Kastentragwerke nach den Regeln von EN 1993-1-7 behandelt werden. Diese gelten als erfüllt, wenn die Anforderungen an Wände nach 9.3 und 9.4 erfüllt und die nachstehenden Näherungsverfahren angewendet werden.

(2) Die Biegemomente und Membrankräfte dürfen mit Hilfe numerischer Verfahren nach EN 1993-1-6 und EN 1993-1-7 ermittelt werden. Die Biegemomente in den trapezförmigen Wandplatten des Trichters dürfen alternativ mit Hilfe der nachstehenden Näherungsbeziehungen ermittelt werden.

(3) Die Trichterplatte ABCD wird durch ein gleichseitiges Dreieck ABE mit dem Flächeninhalt A und dieses durch einen flächengleichen Kreis mit folgendem Ersatzradius ersetzt:

$$r_{\text{eq}} = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = 0,37 a \quad (9.3)$$

Dabei ist

a die horizontale Länge des oberen Randes der Platte, siehe Bild 9.11.

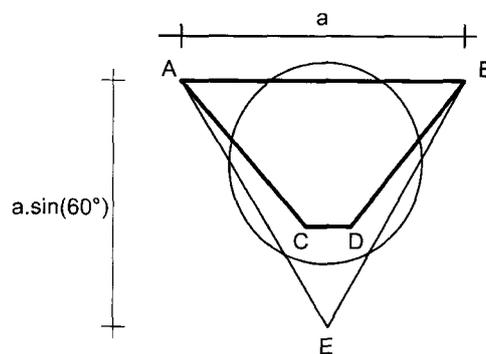


Bild 9.11 — Vereinfachtes Modell für die Biegebeanspruchung einer trapezförmigen Platte

(4) Das Referenz-Biegemoment M_0 sollte dann wie folgt ermittelt werden:

$$M_0 = \frac{3}{16} p_n r_{\text{eq}}^2 = 0,026 p_n a^2 \quad (9.4)$$

Dabei ist

p_n der mittlere Flächendruck auf der trapezförmigen Platte.

(5) Bei gelenkig gelagerten Plattenrändern kann der Bemessungswert des Biegemomentes in der trapezförmigen Platte wie folgt angesetzt werden:

$$M_{s,Ed} = M_0 \quad (9.5)$$

(6) Bei eingespannt gelagerten Plattenrändern können das Biegemoment in Plattenmitte $M_{s,Ed}$ und das Biegemoment am Plattenrand $M_{e,Ed}$ wie folgt angesetzt werden:

$$M_{s,Ed} = 0,80 M_0 \quad (9.6)$$

$$M_{e,Ed} = 0,53 M_0 \quad (9.7)$$

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

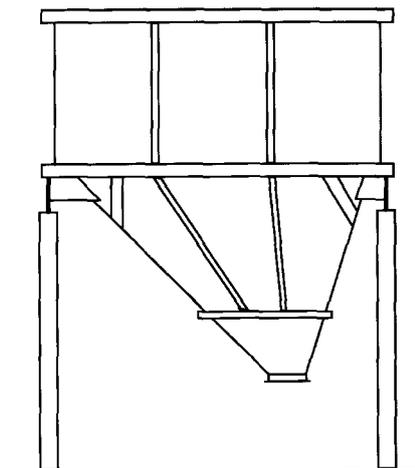


Bild 9.12 — Unsymmetrischer Trichter mit geneigten Rippen

9.7 Vertikale Steifen an Kastenwänden

(1) Vertikale Steifen an Kastenwänden sollten nachgewiesen werden für:

- die ständigen Einwirkungen;
- den Flächendruck auf die Wand infolge Schüttgut;
- die Reibungskräfte auf die Wand;
- die veränderlichen Einwirkungen aus dem Dach;
- die Axialkräfte, die sich aus dem Beitrag der Querscheibenwirkung in den Wänden ergeben.

(2) Die Exzentrizität der Reibungskräfte gegenüber der Plattenmittelfläche und den Steifenachsen darf vernachlässigt werden.

9.8 Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit

9.8.1 Grundlagen

(1) Die Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit für Stahlsilos mit rechteckigem Grundriss und ebenen Blechwänden sind:

- Verformungen oder Durchbiegungen, die die effektive Benutzung des Tragwerks ungünstig beeinflussen;
- Verformungen, Durchbiegungen, Schwingungen oder Erschütterungen, die die Zerstörung tragender oder nicht tragender Teile nach sich ziehen.

(2) Verformungen, Durchbiegungen und Erschütterungen sollten so begrenzt werden, dass die vorstehenden Kriterien eingehalten werden.

(3) Geeignete Grenzwerte sollten zwischen dem Tragwerksplaner, dem Bauherrn und der zuständigen Behörde vereinbart werden; dabei sind der Verwendungszweck und die Beschaffenheit des zu speichernden Schüttgutes zu beachten.

9.8.2 Durchbiegungen

(1) Als Grenzwert für die globale horizontale Ausbiegung eines Silos sollte der kleinere der beiden folgenden Werte angesetzt werden:

$$\delta_{\max} = k_1 H \quad (9.8)$$

$$\delta_{\max} = k_2 t \quad (9.9)$$

Dabei ist

H die Höhe des Tragwerks vom Fundament bis zum Dach;

t die Dicke des dünnsten Wandbleches.

ANMERKUNG Die Werte von k_1 und k_2 dürfen im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es werden Werte von $k_1 = 0,02$ und $k_2 = 10$ empfohlen.

(2) Als Grenzwert für die lokale Durchbiegung einzelner Blechfelder gegenüber ihren Rändern wird folgender Wert empfohlen:

$$\delta_{\max} < k_3 L \quad (9.10)$$

Dabei ist

L die kleinere Abmessung der Rechteckplatte.

ANMERKUNG Der Wert von k_3 darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es wird ein Wert von $k_3 = 0,05$ empfohlen.

Anhang A (informativ)

Vereinfachte Regeln für kreisrunde Silos der Schadensfolgeklasse 1

Die nachfolgenden vereinfachten Regeln erlauben eine tragsichere Bemessung von kreisrunden Silos der Schadensfolgeklasse 1 für eine begrenzte Anzahl von Einwirkungskombinationen (Lastfällen).

A.1 Einwirkungskombinationen für Schadensfolgeklasse 1

Die folgenden vereinfachten Einwirkungskombinationen dürfen für Silos der Schadensfolgeklasse 1 berücksichtigt werden:

- Befüllen des Silos;
- Entleerung des Silos;
- Wind auf leerem Silo;
- Befüllen bei Wind.

Beim Ansetzen der Windlasten sind Vereinfachungen zulässig.

A.2 Ermittlung der Beanspruchungen

(1) Wird die Bemessung mit Hilfe der in diesem Anhang angegebenen Formelausdrücke durchgeführt, so sollten die Membranspannungen um den Faktor k_M vergrößert werden, um lokale Biegeeffekte abzudecken.

ANMERKUNG Der Wert von k_M darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es wird ein Wert von $k_M = 1,1$ empfohlen.

(2) Wird die Bemessung mit Hilfe der in diesem Anhang angegebenen Formelausdrücke durchgeführt, so sollten die Trichter- und Ringsteifenschnittgrößen um den Faktor k_h vergrößert werden, um Biegeeffekte aus Unsymmetrien und Umfangsbiegung abzudecken.

ANMERKUNG Der Wert von k_h darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es wird ein Wert von $k_h = 1,2$ empfohlen.

A.3 Tragsicherheitsnachweise

A.3.1 Allgemeines

(1) Die hier angegebenen vereinfachten Regeln erlauben eine schnellere Bemessung, sind jedoch teilweise konservativer als die vollständigeren Regeln der Norm.

A.3.2 Isotrope, geschweißte oder geschraubte, zylindrische Wände

A.3.2.1 Plastische Grenze oder Zugbruch

(1) Unter Innendruck und allen maßgeblichen Bemessungslasten sollten für jeden Punkt die nachfolgend beschriebenen Nachweise geführt werden, gegebenenfalls unter Berücksichtigung des veränderlichen Innendrucks und der veränderlichen Wanddicken.

(2) Die Bemessungswerte der Membranschnittgrößen $n_{x,Ed}$ und $n_{\theta,Ed}$ (beide als Zugkräfte positiv) sollten an jedem Punkt der Schale die folgende Bedingung erfüllen:

$$\sqrt{n_{x,Ed}^2 - n_{x,Ed} n_{\theta,Ed} + n_{\theta,Ed}^2} \leq t f_y / \gamma_{M0} \quad (\text{A.1})$$

Dabei ist

- $n_{x,Ed}$ die vertikale (axiale) Membrankraft je Längeneinheit, berechnet aus den Bemessungswerten der Einwirkungen (Lasten);
- $n_{\theta,Ed}$ die horizontale (Umfangs-)Membrankraft je Längeneinheit, berechnet aus den Bemessungswerten der Einwirkungen (Lasten);
- f_y der charakteristische Wert der Streckgrenze der Schalenwandbleche;
- γ_{M0} der Teilsicherheitsbeiwert gegen plastisches Versagen.

(3) Die Bemessungswerte der Schnittgrößen sollten an allen geschraubten Stößen oder Anschlüssen in der Schale die folgenden Bedingungen gegen Nettoquerschnittsversagen einhalten:

$$\text{— in Meridianrichtung} \quad n_{x,Ed} \leq f_u t / \gamma_{M2} \quad (\text{A.2})$$

$$\text{— in Umfangsrichtung} \quad n_{\theta,Ed} \leq f_u t / \gamma_{M2} \quad (\text{A.3})$$

Dabei ist

- f_u der charakteristische Wert der Zugfestigkeit der Schalenwandbleche;
- γ_{M2} der Teilsicherheitsbeiwert gegen Zugbruch (= 1,25).

(4) Die Verbindungen sollten nach EN 1993-1-8 oder EN 1993-1-3 bemessen werden. Der Einfluss der Schraub- und Nietlöcher sollte nach EN 1993-1-1 unter Anwendung der jeweils zutreffenden Anforderungen für Zug, Druck oder Schub erfasst werden.

(5) Der Bemessungswiderstand an Überlappstößen in geschweißten Schalenwänden $f_{e,Rd}$ sollte durch ein fiktives Festigkeitskriterium wie folgt angegeben werden:

$$f_{e,Rd} = j f_y / \gamma_{M0} \quad (\text{A.4})$$

Dabei ist

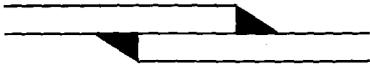
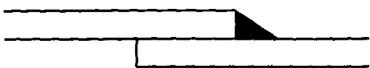
- j der Verbindungswirksamkeitsfaktor.

(6) Die Verbindungswirksamkeit von überlappt geschweißten Stößen mit durchgehenden Kehlnähten sollte mit $j = j_i$ angesetzt werden.

ANMERKUNG AC Der Wert von j_i darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Die für j_i empfohlenen Werte sind in der nachstehenden Tabelle für verschiedene Ausführungen von Stößen angegeben. Einfach geschweißte Überlappstöße sollten nicht verwendet werden, wenn mehr als 20 % des Wertes von $\sigma_{e,Ed}$ in Gleichung (5.4) aus Biegemomenten resultieren. AC

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

Verbindungswirksamkeit j_i von geschweißten Überlappstößen

Verbindungsart	Skizze	Wert von j_i
Doppelt geschweißter Überlappstoß		$j_1 = 1,0$
Einfach geschweißter Überlappstoß		$j_2 = 0,35$

A.3.2.2 LS3: Beulen unter Axialdruckbeanspruchung

(1) Für jede Stelle der Schale sollte ein Beulsicherheitsnachweis gegen Axialdruckbeulen geführt werden. Dabei ist die vertikale Veränderlichkeit des Axialdruckes zu vernachlässigen, es sei denn, EN 1993-1-6 gibt explizite Regeln dazu. Bei den Beulberechnungen sollten Druckmembrankräfte als positiv behandelt werden, um das Rechnen mit negativen Zahlen zu vermeiden.

(2) An horizontalen Überlappstößen sollte zur Abdeckung der Exzentrizität der durch den Stoß hindurchgeleiteten Axialkräfte der Wert des im nächsten Absatz gegebenen Imperfektions-Abminderungsfaktors α auf 70 % reduziert werden, wenn die Exzentrizität zwischen den beiden Blechmittelflächen größer ist als $\frac{AC}{t}$ und der Dickensprung zwischen den beiden Blechen nicht größer ist als $t/4$, wobei t die Dicke des dünneren der beiden Bleche ist. Bei kleinerer Exzentrizität oder größerem Dickensprung braucht α nicht reduziert zu werden.

(3) Der elastische Imperfektions-Abminderungsfaktor α sollte wie folgt ermittelt werden:

$$\alpha = \frac{0,62}{1 + 0,035 \left(\frac{r}{t} \right)^{0,72}} \quad (\text{A.5})$$

Dabei ist

- r der Radius der Silowand;
- t die Wanddicke an der betreffenden Stelle.

(4) Die ideale Axialbeulspannung $\sigma_{x,Rcr}$ sollte für jeden Punkt der isotropen Wand wie folgt berechnet werden:

$$\sigma_{x,Rcr} = 0,605 E \frac{t}{r} \quad (\text{A.6})$$

(5) Die charakteristische Axialbeulspannung sollte wie folgt ermittelt werden:

$$\sigma_{x,Rk} = \chi_x f_y \quad (\text{A.7})$$

wobei:

$$\chi_x = 1 \quad \text{wenn} \quad \bar{\lambda}_x \leq \bar{\lambda}_0 \quad (\text{A.8})$$

$$\chi_x = 1 - 0,6 \left(\frac{\bar{\lambda}_x - \bar{\lambda}_0}{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_0} \right) \quad \text{wenn} \quad \bar{\lambda}_0 < \bar{\lambda}_x < \bar{\lambda}_p \quad (\text{A.9})$$

$$\chi_x = \frac{\alpha}{\bar{\lambda}_x} \quad \text{wenn} \quad \bar{\lambda}_p \leq \bar{\lambda}_x \quad (\text{A.10})$$

mit:

$$\bar{\lambda}_x = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{x,Rc}}}, \bar{\lambda}_o = 0,2 \text{ und } \bar{\lambda}_p = \sqrt{2,5 \alpha}$$

(6) Der Beulsicherheitsnachweis sollte für jeden Punkt der Schale mit dem Bemessungswert der dort vorhandenen Axialmembrankraft $n_{x,Ed}$ (Druck positiv) wie folgt geführt werden:

$$n_{x,Ed} \leq t \sigma_{x,Rk} / \gamma_{M1} \quad (\text{A.11})$$

mit γ_{M1} nach 2.9.2.

ANMERKUNG Der Wert von γ_{M1} darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es wird ein Wert von $\gamma_{M1} = 1,1$ empfohlen.

(7) Die größtzulässige messbare Vorbeul-Imperfektion, gemessen nach den in EN 1993-1-6 festgelegten Verfahren, aber ohne Messung über Überlappstöße hinweg, sollte wie folgt festgelegt werden:

$$\Delta w_{od} = 0,0375 \sqrt{r t} \quad (\text{A.12})$$

(8) Der Nachweis der Schalenwand gegen Axialbeulen über einem diskreten Auflager oder im Bereich einer Konsole (z. B. zur Lagerung einer Förderbrücke) oder im Bereich einer Öffnung sollte nach 5.6 geführt werden.

A.3.2.3 LS3: Beulen unter Außendruck — inneres Teilvakuum und/oder Wind

(1) Für konstantes inneres Teilvakuum (Außendruck) sollte der ideale Beuldruck $p_{n,Rcru}$ für die isotrope Wand, falls ein mit dem Zylinder kraftschlüssig verbundenes Dach vorhanden ist, wie folgt ermittelt werden:

$$p_{n,Rcru} = 0,92 E \left(\frac{r}{\ell} \right) \left(\frac{t}{r} \right)^{2,5} \quad (\text{A.13})$$

Dabei ist

- r der Radius der Silowand;
- t die Dicke des dünnsten Teils der Wand;
- ℓ die Höhe zwischen Versteifungsringen oder gehaltenen Rändern.

(2) Der Bemessungswert des maximalen Außendrucks $p_{n,Ed}$, dem das Tragwerk unter der kombinierten Einwirkung von Wind und Teilvakuum ausgesetzt ist, sollte die folgende Bedingung erfüllen:

$$p_{n,Ed} \leq \alpha_n p_{n,Rcru} / \gamma_{M1} \quad (\text{A.14})$$

ANMERKUNG Die Werte von α_n und γ_{M1} dürfen im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es werden Werte von $\alpha_n = 0,5$ und $\gamma_{M1} = 1,1$ empfohlen.

(3) Falls der obere Zylinderrand nicht kraftschlüssig mit dem Dach verbunden ist, sollte dieses vereinfachte Verfahren durch das in 5.3 angegebene Verfahren ersetzt werden.

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

A.3.3 Konische geschweißte Trichter

(1) Die vereinfachten Bemessungsregeln dürfen angewendet werden, wenn die beiden folgenden Bedingungen erfüllt sind:

- Es wird ein größerer Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M0} = \gamma_{M0g}$ für den Trichter verwendet.
- Im Bereich der Abzweigung sind keine lokalen Meridiansteifen oder Auflagerungen mit der Trichterwand verbunden.

ANMERKUNG Der Wert von γ_{M0g} darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es wird ein Wert von $\gamma_{M0g} = 1,4$ empfohlen.

(2) Wenn die Schwerkraft- und Fließbelastung aus dem Schüttgut die einzige zu beachtende Einwirkung ist, sollte die Meridiankraft je Umfangslängeneinheit $n_{\phi h, Ed, s}$ am Anschluss des oberen Trichterrandes, die durch die symmetrischen Drücke nach EN 1991-4 verursacht wird, aus globalem Gleichgewicht ermittelt werden, siehe Bild A.1. Der Bemessungswert der örtlichen Meridiankraft je Umfangslängeneinheit $n_{\phi h, Ed}$, mit dem der möglichen Ungleichmäßigkeit der Belastung Rechnung getragen wird, sollte dann wie folgt ermittelt werden.

$$n_{\phi h, Ed} = g_{asym} n_{\phi h, Ed, s} \quad (A.15)$$

Dabei ist

$n_{\phi h, Ed, s}$ der Bemessungswert der Meridianmembrankraft je Umfangslängeneinheit am oberen Trichterrand, der unter der Annahme vollständig symmetrischer Trichterbelastung erhalten wird;

g_{asym} der Spannungserhöhungsfaktor für den Einfluss unsymmetrischer Belastungen.

ANMERKUNG Ausdrücke für $n_{\phi h, Ed, s}$ sind Anhang B zu entnehmen. Der Wert von g_{asym} darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es wird ein Wert von $g_{asym} = 1,2$ empfohlen.

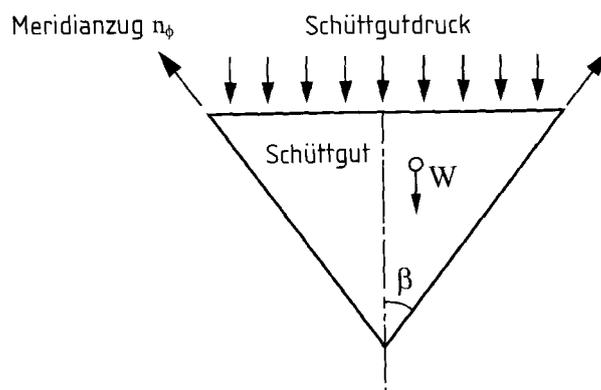


Bild A.1 — Globales Gleichgewicht am Trichter

(3) Der Bemessungswert der Meridianmembranzugkraft $n_{\phi h, Ed}$ am oberen Trichterrand sollte die folgende Bedingung erfüllen:

$$n_{\phi h, Ed} \leq k_r t f_u / \gamma_{M2} \quad (A.16)$$

Dabei ist

- t die Dicke der Trichterwand;
- f_u die Zugfestigkeit;
- γ_{M2} der Teilsicherheitsbeiwert für Zugbruch.

ANMERKUNG Der Wert von k_r darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es wird ein Wert von $k_r = 0,90$ empfohlen. Der Wert von γ_{M2} darf ebenfalls im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es wird ein Wert von $\gamma_{M2} = 1,25$ empfohlen.

A.3.4 Abzweigung

(1) Die nachfolgenden vereinfachten Bemessungsregeln gelten für Zylinder/Konus-Abzweigungen in Silos der Schadensfolgeklasse 1, mit oder ohne Kreisringplatte oder eine ähnlich kompakte Ringsteife an der Abzweigung, siehe Bild A.2.

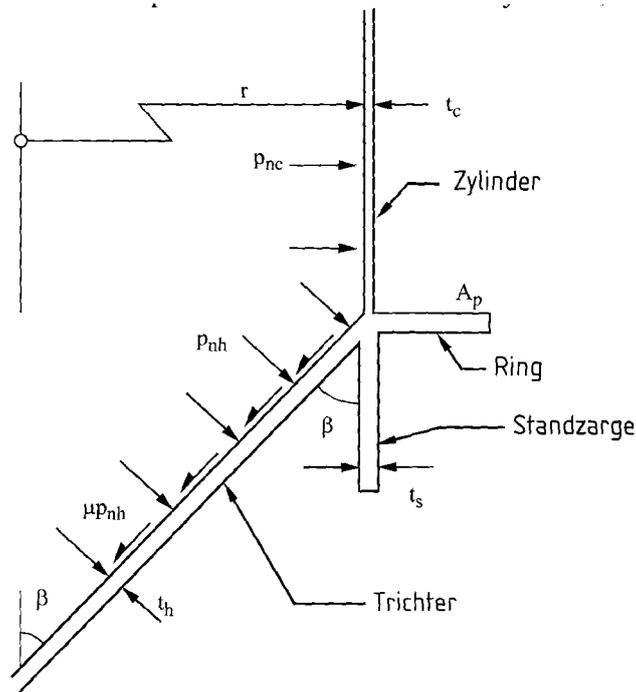


Bild A.2 — Bezeichnungen für eine einfache Abzweigung

(2) Die wirksame Gesamtquerschnittsfläche A_{et} des Ringes sollte wie folgt ermittelt werden:

$$A_{et} = A_p + 0,4 \sqrt{r} \left\{ t_c^{3/2} + t_s^{3/2} + \frac{t_h^{3/2}}{\sqrt{\cos \beta}} \right\} \quad (A.17)$$

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

Dabei ist

- r der Radius der Silo-Zylinderwand;
- t_c die Wanddicke des Zylinders;
- t_s die Wanddicke der Standzarge;
- t_h die Wanddicke des Trichters;
- β der halbe Kegelöffnungswinkel des Trichters;
- A_p die Querschnittsfläche des Ringes an der Abzweigung.

(3) Der Bemessungswert der Umfangsdruckkraft $N_{\theta,Ed}$ an der Abzweigung sollte wie folgt ermittelt werden:

$$N_{\theta,Ed} = n_{\phi h,Ed} r \sin \beta \quad (\text{A.18})$$

Dabei ist

- $n_{\phi h,Ed}$ der Bemessungswert der Meridianzugkraft je Umfangslängeneinheit am oberen Trichterrand, siehe Bild A.1 und Gleichung (A.15).

(4) Die mittlere Umfangsdruckspannung im Ring sollte die folgende Bedingung erfüllen:

$$\frac{N_{\theta,Ed}}{A_{et}} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (\text{A.19})$$

Dabei ist

- f_y die kleinste der charakteristischen Streckgrenzen der Ring- und Blechwerkstoffe;
- γ_{M0} der Teilsicherheitsbeiwert für plastisches Versagen.

ANMERKUNG Der Wert von γ_{M0} darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es wird ein Wert von $\gamma_{M0} = 1,0$ empfohlen.

Anhang B (informativ)

Gleichungen für Membranspannungen in konischen Trichtern

Die hier angegebenen Formeln ermöglichen die membrantheoretische Ermittlung von Spannungen für Lastfälle, die in Standard-Monographien über Schalen und Silos in der Regel nicht behandelt werden. Membrantheoretische Formeln liefern exakte Membranspannungen in der Trichterwand (d. h. an Stellen, die nicht in unmittelbarer Nachbarschaft der Abzweigung oder von Auflagerungen liegen), vorausgesetzt, die Lasten werden nach den Verteilungen nach EN 1991-4 angesetzt.

Koordinatensystem mit dem Ursprung für z an der Kegelspitze-

Vertikale Höhe des Trichters h und halber Kegelöffnungswinkel des Trichters β .

B.1 Konstanter Druck p_0 mit Wandreibung μp_0

$$\sigma_\phi = \frac{p_0 z}{t} \left(\frac{\tan \beta}{\cos \beta} \right) \quad (\text{B.1})$$

$$\sigma_\phi = \frac{p_0 z}{2 t} \left(\frac{\tan \beta + \mu}{\cos \beta} \right) \quad (\text{B.2})$$

B.2 Linear veränderlicher Druck (von p_1 an der Kegelspitze auf p_2 an der Abzweigung) mit Wandreibung μp

$$p = p_1 + \frac{z}{h} (p_2 - p_1) \quad (\text{B.3})$$

$$\sigma_\theta = \left\{ p_1 + \frac{z}{h} (p_2 - p_1) \right\} \frac{z}{t} \left(\frac{\tan \beta}{\cos \beta} \right) \quad (\text{B.4})$$

$$\sigma_\phi = \left\{ 3 p_1 + \frac{2 z}{h} (p_2 - p_1) \right\} \frac{z}{6 t} \left(\frac{\tan \beta + \mu}{\cos \beta} \right) \quad (\text{B.5})$$

Für den Sonderfall von Mises $\mu = 0$ und $p_2 < 0,48 p_1$ liegt der Größtwert der Membran-Vergleichsspannung im Trichter auf der Höhe

$$z = 0,52 \left(\frac{p_1}{p_2 - p_1} \right) h \quad (\text{B.6})$$

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

B.3 „Radiales Druckfeld“ mit dreieckiger Druckspitze („Switch“) an der Abzweigung

$$p = p_1 \frac{z}{h_1} \quad \text{für } 0 < z < h_1 \quad (\text{B.7})$$

$$p = \frac{p_1 (h - z) - p_2 (h_1 - z)}{h - h_1} \quad \text{für } h_1 < z < h \quad (\text{B.8})$$

$$\sigma = p_1 \left(\frac{z^2}{3 h t} \right) \left(\frac{\tan \beta}{\cos \beta} \right) \quad \text{für } 0 < z < h_1 \quad (\text{B.9})$$

$$\sigma_{\theta} = \left\{ \frac{z p_1 (h - z) - p_2 (h_1 - z)}{t (h - h_1)} \right\} \left(\frac{\tan \beta}{\cos \beta} \right) \quad \text{für } h_1 < z < h \quad (\text{B.10})$$

$$\sigma_{\phi} = \frac{p_1 z^2}{3 t h_1} \left(\frac{\tan \beta + \mu}{\cos \beta} \right) \quad \text{für } 0 < z < h_1 \quad (\text{B.11})$$

$$\sigma_{\phi} = \left\{ \frac{2 z^3 (p_2 - p_1) + (3 z^2 - h_1^2) (h p_1 - h_1 p_2)}{6 z t (h - h_1)} \right\} \left(\frac{\tan \beta + \mu}{\cos \beta} \right) \quad \text{für } h_1 < z < h \quad (\text{B.12})$$

B.4 Wobei p_1 der Druck in Höhe h_1 oberhalb der Spitze und p_2 der Druck an der Abzweigung ist. Drücke nach verallgemeinerter Trichtertheorie

Die Druckverteilung lässt sich in Form des rechtwinklig auf die Wand wirkenden Druckes p mit begleitender Wandreibungslast μp wie folgt beschreiben:

$$p = F q \quad (\text{B.13})$$

$$q = \frac{\gamma h}{n-1} \left[\left(\frac{z}{h} \right) - \left(\frac{z}{h} \right)^n \right] + q_t \left(\frac{z}{h} \right)^n \quad (\text{B.14})$$

mit:

$$n = 2 (F \mu \cot \beta + F - 1) \quad (\text{B.15})$$

Dabei ist F das Verhältnis des Wanddruckes p zur vertikalen Spannung q im Schüttgut, und q_t ist die mittlere vertikale Spannung im Schüttgut an der Abzweigung:

$$\sigma_{\theta} = \left[\frac{\gamma h}{(n-1)} \left(\frac{z}{h} \right)^2 + \left(q_t - \frac{\gamma h}{(n-1)} \right) \left(\frac{z}{h} \right)^{n+1} \right] \cdot \left(\frac{F h}{t} \right) \left(\frac{\tan \beta}{\cos \beta} \right) \quad (\text{B.16})$$

$$\sigma_{\phi} = \left[\frac{\gamma h}{3(n-1)} \left(\frac{z}{h} \right)^2 + \frac{1}{(n+2)} \left(q_t - \frac{\gamma h}{(n-1)} \right) \left(\frac{z}{h} \right)^{n+1} \right] \cdot \left(\frac{F h}{t} \right) \left(\frac{\tan \beta + \mu}{\cos \beta} \right) \quad (\text{B.17})$$

Anhang C (informativ)

Winddruckverteilung über den Umfang kreisrunder Silos

Die Verteilung des Winddruckes um einen flachen Silo mit kreisförmigem Grundriss oder einen bodengelagerten Tankbehälter herum (siehe Bild C.1) kann wichtig sein bei der Bemessung der Verankerung und beim Beulsicherheitsnachweis. Die in EN 1991-1-4 enthaltenen Angaben sind für gewisse Fälle nicht detailliert genug.

Die Druckverteilung über den Umfang eines einzeln stehenden Silos kann mit Hilfe der Umfangskoordinate θ beschrieben werden, wobei der Ursprung am windzugewandten Meridian (Staumeridian) liegt (siehe Bild C.2).

Die Umfangsfunktion der Druckverteilung (nach innen gerichtet positiv) an einem einzeln stehenden Silo mit geschlossenem Dach beträgt (siehe Bild C.2):

$$C_p = -0,54 + 0,16 (d_c/H) + \{0,28 + 0,04 (d_c/H)\} \cos \theta + \{1,04 - 0,20 (d_c/H)\} \cos 2 \theta \\ + \{0,36 - 0,05 (d_c/H)\} \cos 3 \theta - \{0,14 - 0,05 (d_c/H)\} \cos 4 \theta \quad (\text{C.1})$$

Dabei ist d_c der Durchmesser des Silos und H dessen Gesamthöhe (H/d_c ist das Abmessungsverhältnis für das gesamte Tragwerk einschließlich seiner Unterstützungsstruktur) (siehe Bild C.1). Bei Silos mit $H/d_c < 0,50$ sollten die Werte für $H/d_c = 0,50$ verwendet werden. Die Druckverteilung sollte nicht auf der Zylinderhöhe H_c beruhen.

Die Umfangsfunktion der Druckverteilung (nach innen gerichtet positiv) an einem geschlossenen Silo in einer Gruppe beträgt (siehe Bild C.3):

$$C_p = +0,20 + 0,60 \cos \theta + 0,27 \cos 2\theta - 0,05 \cos 3\theta - 0,13 \cos 4\theta + 0,13 \cos 6\theta \\ - 0,09 \cos 8\theta + 0,07 \cos 10\theta \quad (\text{C.2})$$

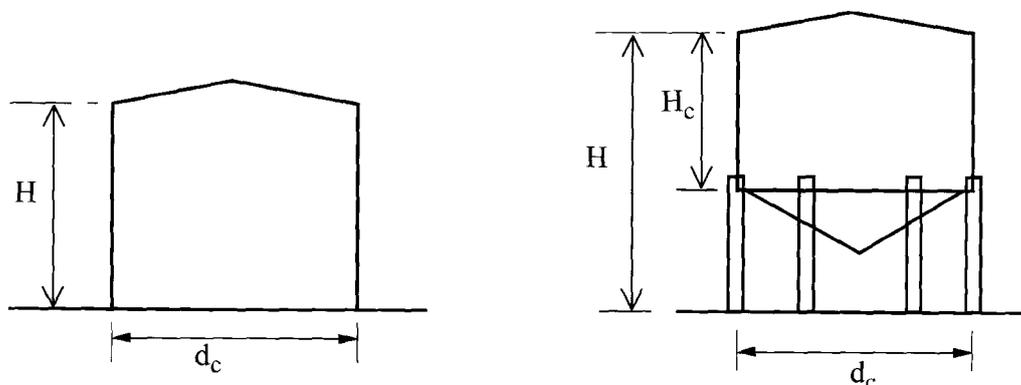


Bild C.1 — Windbelastete Silos

DIN EN 1993-4-1:2010-12
EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 (D)

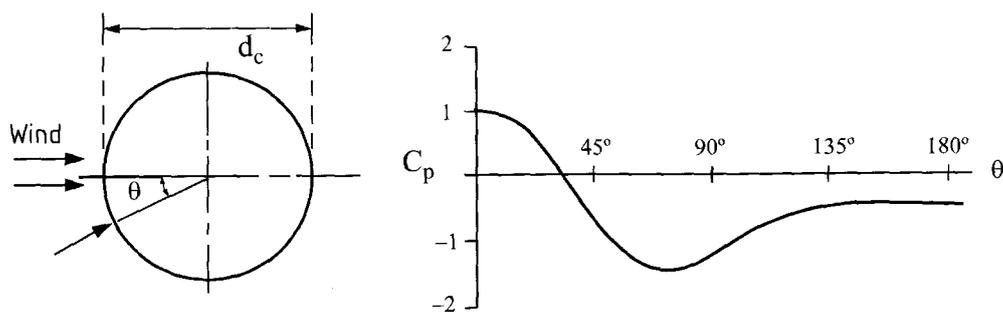


Bild C.2 — Winddruckverteilung über den halben Umfang bei einem einzeln stehenden Silo

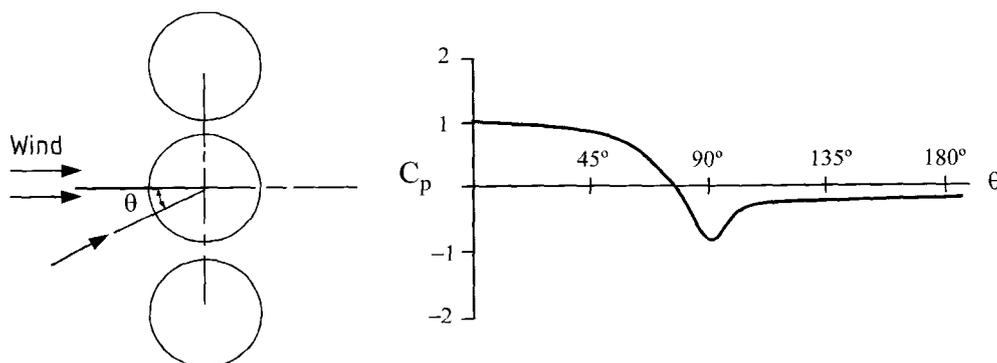


Bild C.3 — Winddruckverteilung über den halben Umfang bei einem in einer Gruppe stehenden Silo

Bei Silos ohne geschlossenes Dach sollten die folgenden konstanten Druckbeiwerte ΔC_p für den inneren Unterdruck zu den obigen Funktionen hinzuaddiert werden, wodurch sich der nach innen gerichtete Druck am Staumeridian vergrößert:

- Zusätzlicher innerer Unterdruck in einem oben offenen Silo: $\Delta C_p = +0,6$.
- Zusätzlicher innerer Unterdruck in einem belüfteten Silo mit kleiner Öffnung: $\Delta C_p = +0,4$.

ANMERKUNG ΔC_p wird als nach innen gerichtet positiv angesetzt. Für diesen Fall ist die Resultante des Außen- und Innendrucks an der Silowand auf der Leeseite des Silos annähernd gleich null.