

DIN EN 1993-4-1

ICS 65.040.20; 91.010.30; 91.080.13

Ersatz für
DIN EN 1993-4-1:2010-12**Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten –
Teil 4-1: Silos;
Deutsche Fassung EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 + A1:2017**

Eurocode 3: Design of steel structures –
Part 4-1: Silos;
German version EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 + A1:2017

Eurocode 3: Calcul des structures en acier –
Partie 4-1: Silos;
Version allemande EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 + A1:2017

Gesamtumfang 127 Seiten

DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (EN 1993-4-1:2007 + AC:2009 + A1:2017) wurde von CEN/TC 250 „Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau“ erarbeitet, dessen Sekretariat von BSI (Vereinigtes Königreich) gehalten wird.

Als deutsches Spiegelgremium ist der Arbeitsausschuss NA 005-08-16 AA „Tragwerksbemessung (SpA zu CEN/TC 250/SC 3, ISO/TC 167/SC 1)“ des DIN-Normenausschusses Bauwesen (NABau) zuständig.

Dieses Dokument enthält die Änderung 1, die vom CEN am 3. März 2017 angenommen wurde, sowie die Berichtigung 1.

Anfang und Ende der durch die Änderung und Berichtigung eingefügten oder geänderten Texte sind jeweils durch Änderungsmarken   und   angegeben.

Änderungen

Gegenüber DIN EN 1993-4-1:2010-12 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Änderung A1 wurde eingearbeitet.

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, 2010-12
DIN EN 1993-4-1 Berichtigung 1: 2009-09

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 Änderung A1 modifiziert die Europäische Norm EN 1993-4-1:2007. Sie wurde vom CEN am 3. März 2017 angenommen.

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 CEN-CENELEC-Management-Zentrum 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, der ehemaligen jugoslawischen Republik Mazedonien, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, der Schweiz, Serbien, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, der Türkei, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.



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

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

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	6
Europäisches Vorwort der Änderung A1	10
1 Allgemeines	11
1.1 Anwendungsbereich	11
1.2 Normative Verweisungen	12
1.3 Annahmen	13
1.4 Unterscheidung zwischen Grundsätzen und Anwendungsregeln	13
1.5 Begriffe	13
1.6 In Teil 4-1 von Eurocode 3 verwendete Symbole	16
1.6.1 Lateinische Großbuchstaben	16
1.6.2 Lateinische Kleinbuchstaben	16
1.6.3 Griechische Buchstaben	17
1.6.4 Indizes	18
1.7 Vorzeichenvereinbarungen	19
1.7.1 Vereinbarungen für das globale Koordinatensystem für kreisrunde Silos	19
1.7.2 Vereinbarungen für das globale Koordinatensystem für rechteckige Silos	20
1.7.3 Vereinbarungen für die Koordinaten von Bauteilen in kreisrunden und rechteckigen Silos	21
1.7.4 Vereinbarungen für Schnittgrößen in kreisrunden und rechteckigen Silos	23
1.8 Einheiten	25
2 Grundlagen der Bemessung	25
2.1 Anforderungen	25
2.2 Differenzierung der Zuverlässigkeit	25
2.3 Grenzzustände	27
2.4 Einwirkungen und Umwelteinflüsse	27
2.4.1 Allgemeines	27
2.4.2 Windlast	27
2.4.3 Kombination von Schüttgutlasten mit anderen Einwirkungen	27
2.5 Werkstoffeigenschaften	27
2.6 Abmessungen	27
2.7 Modellierung des Silos zur Berechnung der Beanspruchungen	27
2.8 Versuchsgestützte Bemessung	28
2.9 Beanspruchungen für den Nachweis der Grenzzustände	28
2.9.1 Allgemeines	28
2.9.2 Teilsicherheitsbeiwerte für Grenzzustände der Tragfähigkeit	28
2.9.3 Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit	29
2.10 Dauerhaftigkeit	29
2.11 Feuerwiderstand	29
3 Werkstoffeigenschaften	29
3.1 Allgemeines	29
3.2 Baustähle	30
3.3 Nichtrostende Stähle	30
3.4 Spezielle legierte Stähle	30
3.5 Anforderungen an die Zähigkeit	31
4 Grundlagen für die statische Berechnung	31
4.1 Grenzzustände der Tragfähigkeit	31

4.1.1	Basis	31
4.1.2	Zu führende Nachweise	31
4.1.3	Ermüdung und zyklisches Plastizieren — Kurzzeitermüdung	31
4.1.4	Berücksichtigung von Korrosion und Abrasion	31
4.1.5	Berücksichtigung von Temperatureinflüssen	32
4.2	Berechnung des Schalentragswerks eines kreisrunden Silos	32
4.2.1	Modellierung der Tragwerksschale	32
4.2.2	Berechnungsmethoden	32
4.2.3	Geometrische Imperfektionen	34
4.3	Berechnung des Kastentragswerks eines rechteckigen Silos	35
4.3.1	Modellierung des Tragwerkskastens	35
4.3.2	Geometrische Imperfektionen	35
4.3.3	Berechnungsmethoden	36
4.4	Orthotrope Ersatzsteifigkeiten von profilierten Wandblechen	36
5	Bemessung von zylindrischen Wänden	39
5.1	Grundlagen	39
5.1.1	Allgemeines	39
5.1.2	Bemessung der Silowand	39
5.2	Unterscheidung zwischen verschiedenen Formen zylindrischer Schalen	40
5.3	Tragsicherheitsnachweise für zylindrische Silowände	40
5.3.1	Allgemeines	40
5.3.2	Isotrope, geschweißte oder geschraubte Wände	41
5.3.3	Isotrope Wände mit Vertikalsteifen	53
5.3.4	Horizontal profilierte Wände	56
5.3.5	Vertikal profilierte Wände mit Ringsteifen	67
5.4	Besondere Lagerungsbedingungen für zylindrische Silowände	68
5.4.1	Zylinderschalen mit voller Auflagerung am unteren Rand oder Lagerung auf einem Trägerrost	68
5.4.2	Zylinderschalen mit Zargenlagerung	68
5.4.3	Zylinderschalen mit eingebundenen Stützen	69
5.4.4	Zylinderschalen mit diskreter Auflagerung	69
5.4.5	Silos mit diskreter Auflagerung am Trichter	70
5.4.6	Zylindrische Silowände: Details für örtliche Auflager und Krafteinleitungsrippen	71
5.4.7	Verankerung an der Basis eines Silos	72
5.5	Detailausbildung von Öffnungen in zylindrischen Wänden	73
5.5.1	Allgemeines	73
5.5.2	Rechteckige Öffnungen	73
5.6	Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit	74
5.6.1	Grundlagen	74
5.6.2	Durchbiegungen	74
6	Bemessung von konischen Trichtern	75
6.1	Grundlagen	75
6.1.1	Allgemeines	75
6.1.2	Bemessung der Trichterwand	75
6.2	Unterscheidung zwischen verschiedenen Formen von Trichterschalen	76
6.3	Tragsicherheitsnachweis für konische Trichterwände	76
6.3.1	Allgemeines	76
6.3.2	Isotrope, unversteifte, geschweißte oder geschraubte Trichter	77
6.4	Angaben zu speziellen Trichterkonstruktionen	82
6.4.1	Unterstützungskonstruktion	82
6.4.2	Stützengelagerte Trichter	82
6.4.3	Unsymmetrische Trichter	82
6.4.4	Versteifte Kegelschalen	83
6.4.5	Mehrfach-Kegelschalen	83

6.5	Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit.....	83
6.5.1	Grundlagen.....	83
6.5.2	Erschütterungen	83
7	Bemessung von kreisrunden konischen Dächern.....	84
7.1	Grundlagen.....	84
7.2	Unterscheidung zwischen verschiedenen Formen von Dachtragwerken	84
7.2.1	Begriffe	84
7.3	Tragsicherheitsnachweise für kreisrunde konische Silodächer	84
7.3.1	Schalendächer bzw. ungestützte Dächer	84
7.3.2	Gespärredächer bzw. gestützte Dächer.....	85
7.3.3	Traufkante (Knotenlinie zwischen Silodach und Siloschaft)	85
8	Bemessung von Abzweigungsringen und Auflagerringträgern.....	85
8.1	Grundlagen.....	85
8.1.1	Allgemeines	85
8.1.2	Bemessung des Ringes.....	85
8.1.3	Begriffe	86
8.1.4	Modellierung des Abzweigungsbereiches	86
8.1.5	Grenzen für die Ringanordnung.....	87
8.2	Berechnung des Abzweigungsbereiches.....	87
8.2.1	Allgemeines	87
8.2.2	Gleichmäßig unterstützte Abzweigungsbereiche.....	88
8.2.3	Ringträger an der Abzweigung.....	93
8.3	Tragwiderstände	96
8.3.1	Allgemeines	96
8.3.2	Widerstand gegen plastisches Versagen.....	96
8.3.3	Widerstand gegen Knicken innerhalb der Ringebene	97
8.3.4	Widerstand gegen Knicken aus der Ringebene heraus und gegen örtliches Beulen.....	98
8.4	Tragsicherheitsnachweise	100
8.4.1	Gleichmäßig unterstützte Abzweigungsbereiche.....	100
8.4.2	Ringträger an der Abzweigung.....	101
8.5	Angaben zur Auflageranordnung am Abzweigungsbereich	103
8.5.1	Zargengelagerte Abzweigungsbereiche	103
8.5.2	Stützengelagerte Abzweigungsbereiche und Ringträger.....	103
8.5.3	Basisring	103
9	Bemessung von rechteckigen und ebenwandigen Silos	103
9.1	Grundlagen.....	103
9.2	Klassifizierung der Tragwerksformen	104
9.2.1	Unversteifte Silos.....	104
9.2.2	Versteifte Silos.....	104
9.2.3	Silos mit Zugankern.....	104
9.3	Tragwiderstände von unversteiften vertikalen Wänden	105
9.4	Tragwiderstand von Silowänden aus versteiften und profilierten Platten	105
9.4.1	Allgemeines	105
9.4.2	Gesamtbiegung aus direkter Einwirkung des Schüttgutes	106
9.4.3	Membranbeanspruchung aus Querscheibenfunktion	107
9.4.4	Örtliche Biegung aus Schüttgut und/oder Ausrüstung.....	108
9.5	Silos mit innen liegenden Zugankern.....	108
9.5.1	Durch Schüttgutdruck verursachte Kräfte in innen liegenden Zugankern.....	108
9.5.2	Modellierung der Zuganker	110
9.5.3	Lastfälle für Zugankeranschlüsse.....	111
9.6	Tragsicherheit von pyramidischen Trichtern	111
9.7	Vertikale Steifen an Kastenwänden.....	113
9.8	Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit.....	113
9.8.1	Grundlagen.....	113

9.8.2 Durchbiegungen.....	114
Anhang A (informativ) Vereinfachte Regeln für kreisrunde Silos der Schadensfolgeklasse 1.....	115
A.1 Einwirkungskombinationen für Schadensfolgeklasse 1.....	115
A.2 Ermittlung der Beanspruchungen.....	115
A.3 Tragsicherheitsnachweise	115
A.3.1 Allgemeines	115
A.3.2 Isotrope, geschweißte oder geschraubte, zylindrische Wände.....	115
A.3.3 Konische geschweißte Trichter	119
A.3.4 Abzweigung	120
Anhang B (informativ) Gleichungen für Membranspannungen in konischen Trichtern.....	122
B.1 Konstanter Druck p_0 mit Wandreibung μp_0	122
B.2 Linear veränderlicher Druck (von p_1 an der Kegelspitze auf p_2 an der Abzweigung) mit Wandreibung μp	122
B.3 „Radiales Druckfeld“ mit dreieckiger Druckspitze („Switch“) an der Abzweigung	122
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	123
Anhang C (informativ) Winddruckverteilung über den Umfang kreisrunder Silos	124

Europäisches 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*

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

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, soweit für die Bemessung und Konstruktion von Silos maßgeblich. Die in diesen Dokumenten bereits behandelten Aspekte werden nicht wiederholt.

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.

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.

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); | — AC 6.3.2.7 (4) AC ; |
| — 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). |

Europäisches Vorwort der Änderung A1

Dieses Dokument (EN 1993-4-1:2007/A1:2017) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 250 „Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom BSI gehalten wird.

Diese Änderung zur Europäischen Norm EN 1993-4-1:2007 muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis Juni 2018, und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis Juni 2018 zurückgezogen werden.

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

Dieses Dokument wurde unter einem Mandat erarbeitet, das die Europäische Kommission und die Europäische Freihandelszone dem CEN erteilt haben.

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

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, Stutzen, Fülleinrichtungen, 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 $\overline{AC}$ 100 kN (10 Tonnen) $\overline{AC}$ 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).

EN1090, *Ausführung von Tragwerken aus Stahl*

EN 1990:2002, *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 1993-1-6:2007, *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*

EN 10149, *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*

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.

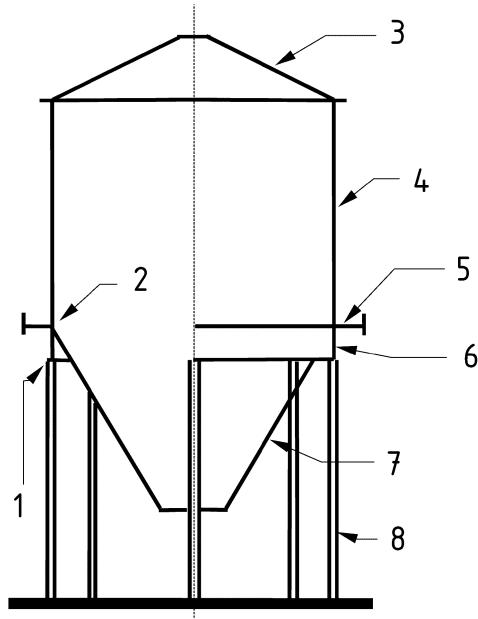
1.5.14 Schuss: Ein Schuss ist eine horizontale Reihe von Stahlblechsegmenten, aus denen ein Höhenabschnitt des Siloschaftes gebildet wird.

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.

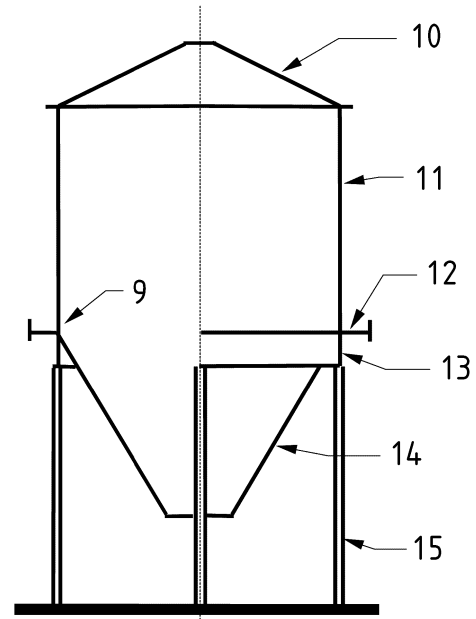
1.5.18 Verschmierte Steifen: Steifen werden als verschmiert bezeichnet, wenn ihre Eigenschaften zusammen mit denen der Schalenwand als ein zusammenhängender Querschnitt behandelt werden, dessen Breite einem ganzen Vielfachen des Steifenabstandes entspricht. Die Schaleneigenschaften einer Wandung mit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



Legende

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

a) Silo mit kreisrundem Grundriss



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

b) Silo mit rechteckigem Grundriss

Bild 1.1 — Bezeichnungen für Silotragwerke

1.5.19 Basisring: Ein Basisring ist ein Bauteil, das der Umfangslinie 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 Wandleches für Knicken von Längssteifen;
 L Höhe eines Schalensegmentes oder einer Steife;
 M Biegemoment;
 N Axialkraft;
 Q Parameter für die Herstelltoleranz-Qualitätsklasse einer beulgefährdeten Schale;
 $\langle A_1 \rangle r_\phi$ örtlicher Radius an den Kuppen (Wellenberg bzw. -tal) eines Profilbleches (Wellbleches). $\langle A_1 \rangle$

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;
 $\langle A_1 \rangle l$ Wellenlänge der Profilierung in Profilblechen; $\langle A_1 \rangle$
 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;
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	Querbelastung 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

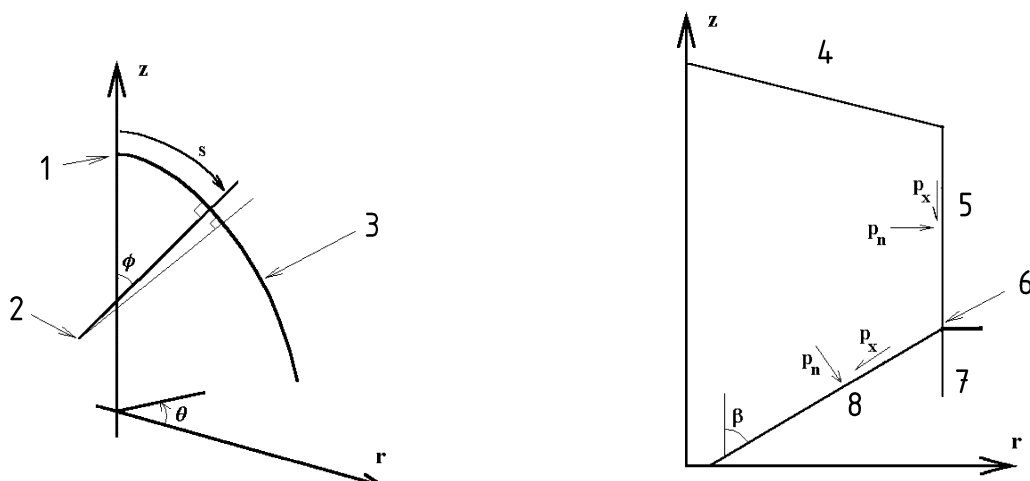
E	Spannung oder Verschiebung (als Folge von Bemessungseinwirkungen);
F	Einwirkungen;
M	Werkstoff/Material;
R	Widerstand;
S	Schnittgröße (als Folge von Bemessungseinwirkungen);
b	Biegung;

c	Zylinder;
cr	idealer Beulwert;
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) Globales Koordinatensystem

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.

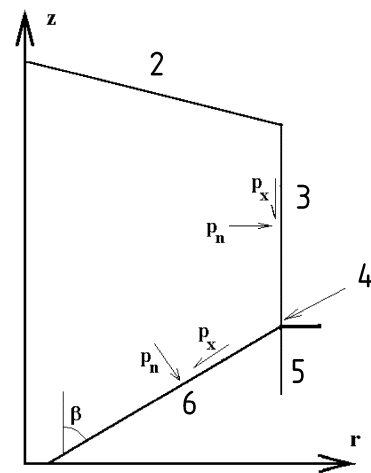
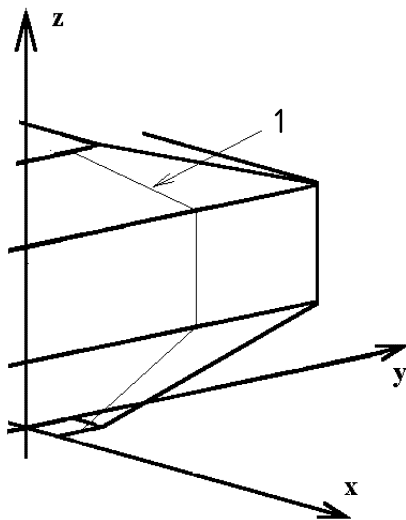
(2) In der Regel werden für das globale Koordinatensystem des Silotragwerkes kartesische Koordinaten x, y, z vereinbart, wobei z die vertikale Richtung beschreibt, siehe Bild 1.3.

(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



Legende

- 1 Kastenmeridian
- 2 Dach
- 3 Schaft

- 4 Abzweigung
- 5 Zarge
- 6 Trichter

a) Globales Koordinatensystem

b) Silo-Kastenkoordinaten und Belastung:
Schnitt

Bild 1.3 — Koordinatensysteme für ein rechteckiges Silo

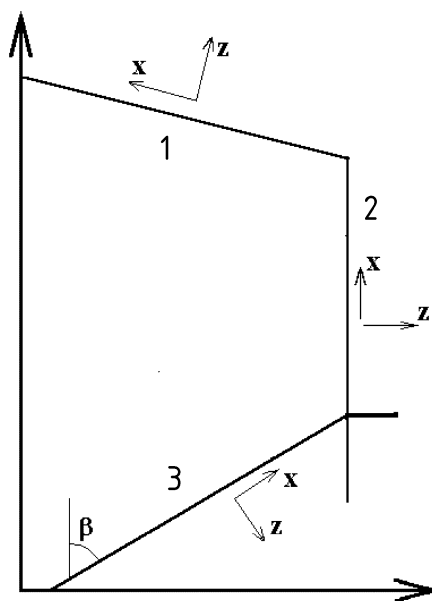
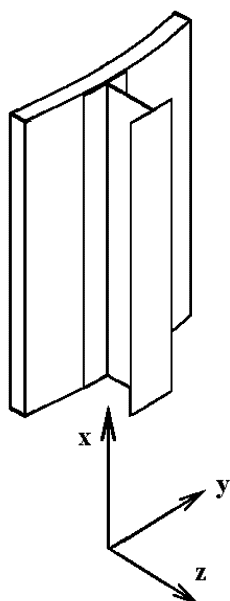
1.7.3 Vereinbarungen für die Koordinaten von Bauteilen in kreisrunden und rechteckigen Silos

(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.



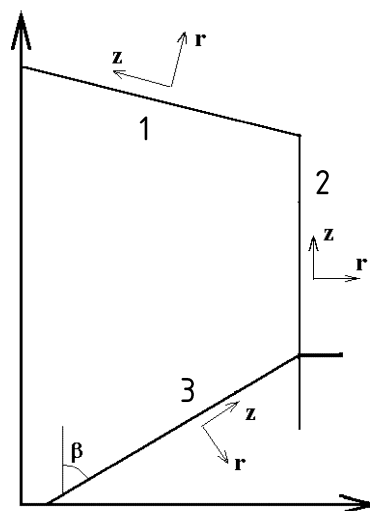
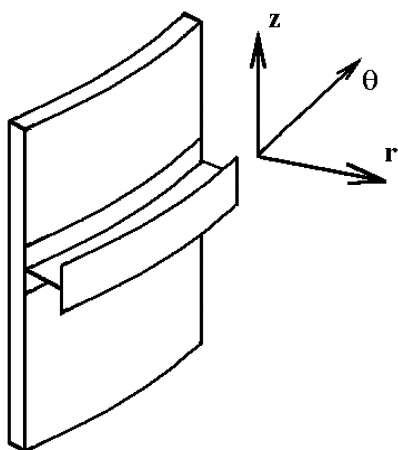
Legende

- 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



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

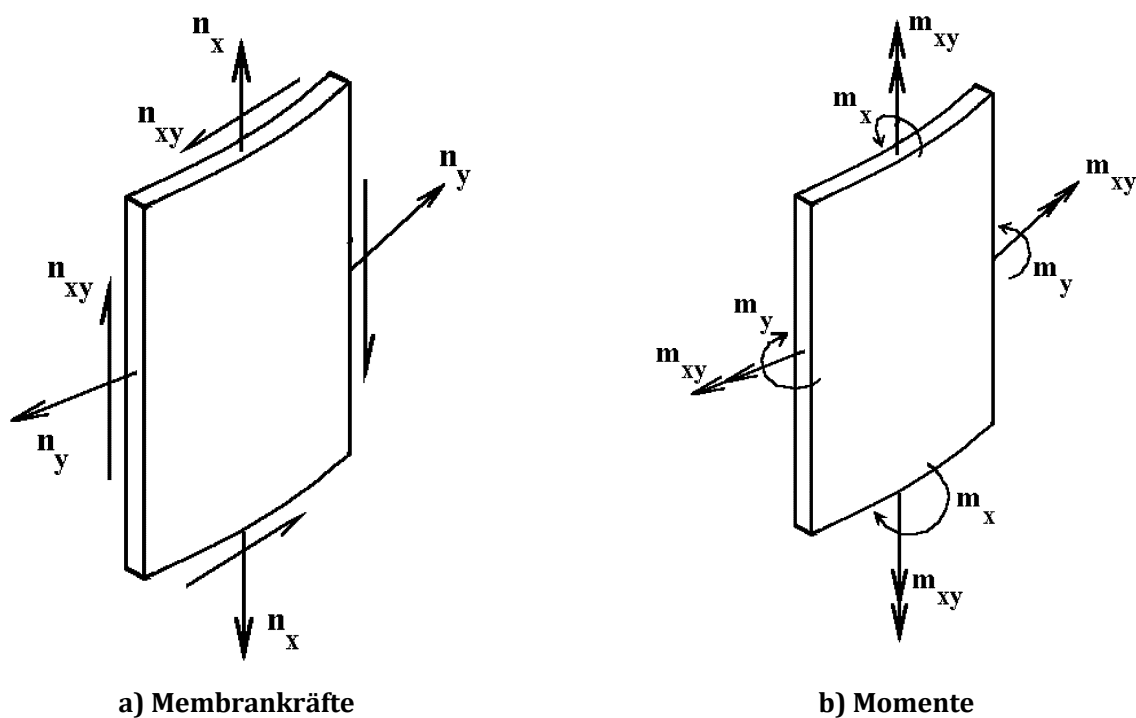


Bild 1.6 — Schnittgrößen in Schalen- und Kastensilowänden

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 Unterstützung ist in Anlehnung an Bild 1.1 festzulegen. Analog dazu gelten andere Komponenten, die ihrerseits vom Silo unterstützt werden, als dort beginnend, wo die Silowand oder das Anschlussstück endet.

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

(5) Besondere Anforderungen für spezielle Anwendungen dürfen zwischen dem Tragwerksplaner, dem Bauherrn 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.	

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 Schadensfolgekategorie 1 dürfen vereinfachte Regeln angewendet werden.

ANMERKUNG Geeignete Regeln für Schadensfolgekategorie 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)P Es 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 Schalentragswerke in EN 1993-1-6.

(3) Als Schalenwanddicke ist in der Regel die Nennblechdicke einzusetzen. Bei feuerverzinktem Stahlblech nach [AC] 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

[A1] (1)P Es gelten die allgemeinen Anforderungen nach EN 1990. [A1]

(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

[A1] (1)P Es gelten die allgemeinen Anforderungen nach EN 1990. **[A1]**

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.

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)P 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).

A1 (4) Wird warmgewalzter Profilstahl als Teil einer Silostruktur verwendet, dann sollte der entsprechende Teilsicherheitsbeiwert für den Widerstand (für die Beanspruchbarkeit) aus EN 1993-1-1 entnommen werden.

(5) Wird kaltgeformter Profilstahl als Teil einer Silostruktur verwendet, dann sollte der entsprechende Teilsicherheitsbeiwert für den Widerstand (für die Beanspruchbarkeit) aus EN 1993-1-3 entnommen werden. **A1**

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

A1 (1) In der Regel gelten die allgemeinen Anforderungen nach EN 1990:2002, 2.4. **A1**

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.

(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 Silowand berücksichtigt werden.

4.2 Berechnung des Schalentragwerks 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.

A1 (3) Wird der Silo mit unsymmetrischer Belastung aus dem Schüttgut (Teilflächenlast, exzentrisches Entleeren, unsymmetrisches Befüllen usw.) beaufschlagt, 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 Silowand und Trichter, zwischen Zylinderwand und Vertikalsteifen oder Auflager sowie zwischen verschiedenen Schüssen des Zylinders).

(4) Wird ein Ringträger zur Umverteilung der Silowandkräfte in diskrete Auflager verwendet und wenn Schrauben oder diskrete Verbindungsmittel zum Verbinden der Konstruktionselemente verwendet werden, sollte die durch die Schalen- und Ringträgerbiegung bedingte Schubübertragung zwischen den Teilen des Rings ermittelt werden.

(5) Der Beitrag der Steifigkeit des gelagerten Schüttgutes zur Verringerung der Wandverformungen oder zur Erhöhung des Beulwiderstandes des Schalentragwerks sollte nur dann berücksichtigt werden, wenn eine rationale Analyse durchgeführt wurde und eindeutige Beweise dafür vorliegen, dass das Schüttgut an der Wand an der festgelegten Stelle während der Entleerung nicht rutscht. In derartigen Situationen sollten die entsprechenden Angaben in Bezug auf das Fließprofil, den Druck im Schüttgut und die Eigenschaften des spezifischen gelagerten Schüttgutes nach EN 1991-4 bestimmt werden.

(6) Wenn ein Wellblechsilo Massenfluss aufweist, sollte das innerhalb der Profilbleche (Wellbleche) befindliche Schüttgut nicht als stationär in (5) angesehen werden. **A1**

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.

(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.

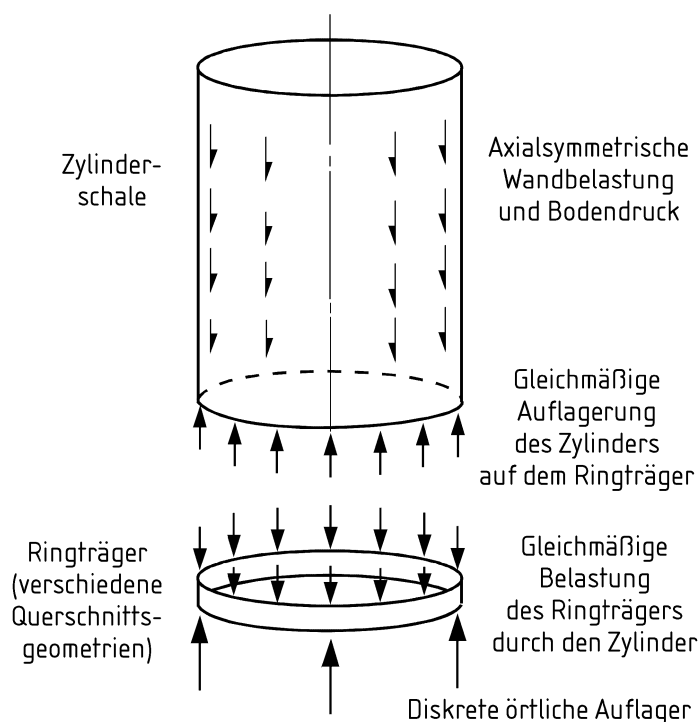
(6) Isotrope Schalenwände mit diskreten Längssteifen, deren Abstand nicht größer als $n_{vs}\sqrt{rt}$ ist, dürfen als verschmiert-längsversteift berechnet werden.

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

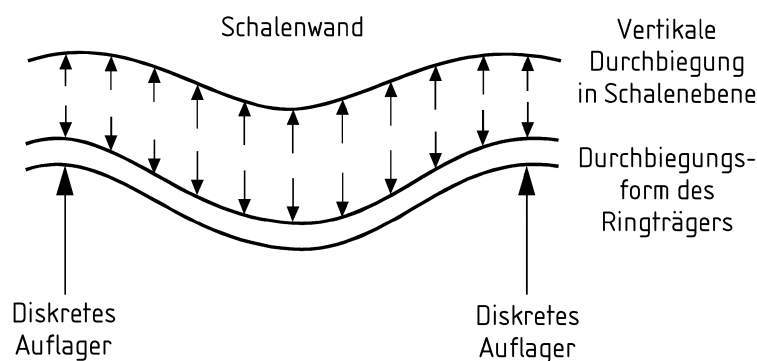
(7) Bei der Ermittlung der Steifenspannungen in einer verschmiert-längsversteift modellierten Schalenwand sollte auf eine zutreffende Erfassung der Kompatibilität zwischen Steife und Wand, einschließlich des Einflusses der Wandmembranspannungen rechtwinklig zur Steifenrichtung, geachtet werden.

(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

A1 gestrichener Text **A1**

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 $n_{ew} = 15 \varepsilon$ 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.

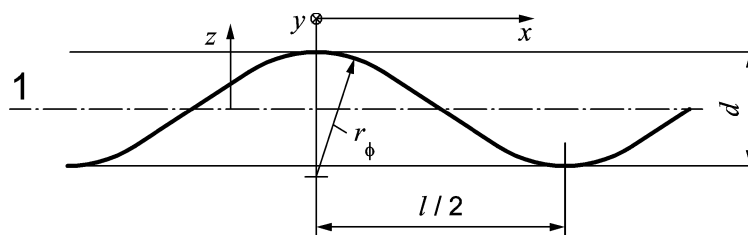
(5) Bei Silos der Schadensfolgeklasse 3 $\langle A_1 \rangle$ (siehe 2.2) $\langle A_1 \rangle$ sollten die Beanspruchungsgrößen entweder nach Methode b) oder Methode c) in Absatz (1) (wie in EN 1993-1-7 festgelegt) berechnet werden.

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.

$\langle A_1 \rangle$



Legende

- 1 effektive Mittelfläche

Bild 4.2 — Wellblechprofil und geometrische Parameter $\langle A_1 \rangle$

(3) Die Ersatzsteifigkeiten eines Wellbleches sollten in einem xy -Koordinatensystem definiert werden, wobei die y -Achse parallel zur Profilierung verläuft (Geraden auf der Oberfläche) und die x -Achse rechtwinklig dazu (Wellentäler und -berge). Die Profilgeometrie sollte, unabhängig von der genauen Wellenprofilierung, durch folgende Parameter beschrieben werden, siehe Bild 4.2.

$\langle A_1 \rangle$ 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). $\langle A_1 \rangle$

$\langle A_1 \rangle$ (4) Die äquivalenten Eigenschaften des Bleches in jeder der beiden Hauptrichtungen dürfen als unabhängig behandelt werden, sodass die Beanspruchungen in einer Richtung keine Spannungen in der rechtwinkligen Richtung (d.h. keine Poisson-Effekte) erzeugen. $\langle A_1 \rangle$

$\langle A_1 \rangle$ (5) Die äquivalenten Dehnsteifigkeiten dürfen wie folgt angesetzt werden:

$$C_x = Et_x \quad (4.2)$$

$$C_y = Et_y \quad (4.3)$$

$$C_{xy} = Gt_{xy} \quad (4.4)$$

Dabei ist

t_x die äquivalente Dicke für die verschmierte Membransteifigkeit rechtwinklig zur Profilierung, angegeben als:

$$t_x = \frac{2t^3}{3d^2} \quad (4.5)$$

t_y die äquivalente Dicke für die verschmierte Membransteifigkeit parallel zur Profilierung, angegeben als:

$$t_y = t \left(1 + \frac{\pi^2 d^2}{4l^2} \right) \quad (4.6)$$

t_{xy} die äquivalente Dicke für die verschmierte Membranschersteifigkeit, angegeben als

$$t_{xy} = \frac{t}{\left(1 + \frac{\pi^2 d^2}{4l^2} \right)} \quad (4.7) \quad \langle A_1 \rangle$$

$\langle A_1 \rangle$ (6) Die äquivalenten Biegesteifigkeiten werden nach den Begriffen der Biegefestigkeit für Momente festgelegt, die Biegespannungen in dieser Richtung erzeugen, und dürfen wie folgt angesetzt werden:

$$D_x = EI_x \quad (4.8)$$

$$D_y = EI_y \quad (4.9)$$

$$D_{xy} = GI_{xy} \quad (4.10)$$