

DIN EN 1993-4-1



ICS 65.040.20; 91.010.30; 91.080.13

Einsprüche bis 2024-02-15
Vorgesehen als Ersatz für
DIN EN 1993-4-1:2017-09**Entwurf****Eurocode 3 –
Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten –
Teil 4-1: Silos;
Deutsche und Englische Fassung prEN 1993-4-1:2024**

Eurocode 3 –
Design of steel structures –
Part 4-1: Silos;
German and English version prEN 1993-4-1:2024

Eurocode 3 –
Calcul des structures en acier –
Partie 4-1: Silos;
Version allemande et anglaise prEN 1993-4-1:2024

Anwendungswarnvermerk

Dieser Entwurf mit Erscheinungsdatum 2023-12-15 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil das beabsichtigte Dokument von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an nabau@din.de möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an den DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau), 10772 Berlin oder Am DIN-Platz, Burggrafenstr. 6, 10787 Berlin.

Es wird gebeten, mit den Kommentaren zu diesem Entwurf jegliche relevanten Patentrechte, die bekannt sind, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 313 Seiten

DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (prEN 1993-4-1:2024) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 250 „Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau“ erarbeitet, dessen Sekretariat von BSI (Vereinigtes Königreich) gehalten wird.

Das zuständige deutsche Normungsgremium ist der Arbeitsausschuss NA 005-08-16 AA „Tragwerksbemessung (SpA zu CEN/TC 250/SC 3, ISO/TC 167/SC 1)“ im DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau).

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung beigefügt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen Text.

Aktuelle Informationen zu diesem Dokument können über die Internetseiten von DIN (www.din.de) durch eine Suche nach der Dokumentennummer aufgerufen werden.

Änderungen

Gegenüber DIN EN 1993-4-1:2017-09 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) technische Überarbeitung des Normeninhalts;
- b) komplette redaktionelle Überarbeitung.

<i>Titel de:</i>	Eurocode 3 — Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 4-1: Silos
<i>Titel en:</i>	Eurocode 3 — Design of steel structures — Part 4-1: Silos
<i>Titel fr:</i>	Eurocode 3 — Calcul des structures en acier — Partie 4-1: Silos

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	7
0 Einleitung	8
0.1 Einleitung zu den Eurocodes	8
0.2 Einleitung zu EN 1993 (alle Teile)	8
0.3 Einleitung zu prEN 1993-4-1	10
0.4 In den Eurocodes verwendete Verbformen	10
0.5 Nationaler Anhang zu prEN 1993-4-1	10
1 Anwendungsbereich	11
1.1 Anwendungsbereich zu EN 1993-4-1	11
1.2 Voraussetzungen	12
2 Normative Verweisungen	13
3 Begriffe, Symbole, Vorzeichenvereinbarungen und Einheiten	13
3.1 Begriffe	13
3.2 In Teil 4-1 von Eurocode 3 verwendete Symbole	18
3.2.1 Lateinische Großbuchstaben	18
3.2.2 Lateinische Kleinbuchstaben	19
3.2.3 Griechische Buchstaben	20
3.2.4 Indizes	22
3.3 Vorzeichenvereinbarungen	23
3.3.1 Vereinbarungen für ein globales Koordinatensystem für das Tragwerk kreisförmiger Silos	23
3.3.2 Vereinbarungen für ein globales Koordinatensystem für das Tragwerk rechteckiger Silos	24
3.3.3 Vereinbarungen für die Koordinaten von Bauteilen in kreisförmigen und rechteckigen Silos	25
3.3.4 Vereinbarungen für Spannungsergebnisse für kreisförmige und rechteckige Silos	28
4 Grundlagen der Bemessung	29
4.1 Grundlegende Anforderungen	29
4.2 Einheiten	30
4.3 Klassifizierungen von Silos	31
4.3.1 Versagensfolgeklassen für Silos	31
4.3.2 Komplexitätsklassifizierung des Silotragwerks	31
4.3.3 Kategorisierung in Silogruppen	32
4.4 Nachweisverfahren mit Teilsicherheitsbeiwerten	34
4.4.2 Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit	35
4.5 Einwirkungen und Umweltauswirkungen	35
4.5.1 Allgemeines	35
4.5.2 Windeinwirkung	35
4.5.3 Kombination von Drücken infolge Schüttgut mit anderen Einwirkungen	35
4.6 Abmessungen	35
4.7 Modellierung des Silos zur Bestimmung der Auswirkungen von Einwirkungen	36
4.8 Versuchsgestützte Bemessung	36
4.9 Auswirkungen von Einwirkungen für Grenzzustandsnachweise	36
4.10 Dauerhaftigkeit	36
4.11 Feuerwiderstandsfähigkeit	36

5	Werkstoffeigenschaften	36
5.1	Allgemeines	36
5.2	Baustähle	37
5.3	Nichtrostende Stähle	37
5.4	Spezielle legierte Stähle	37
5.5	Anforderungen an die Zähigkeit	38
6	Grundlagen für die statische Berechnung	38
6.1	Grenzzustände der Tragfähigkeit	38
6.1.1	Grundlagen	38
6.1.2	Zu führende Nachweise	38
6.1.3	Ermüdung und zyklisches Plastizieren – Kurzzeitermüdung	38
6.1.4	Korrosions- und Abrasionszuschläge	39
6.1.5	Berücksichtigung von Temperatúrauswirkungen	39
6.2	Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit	39
6.3	Berechnung des Schalensilotragwerks	40
6.3.1	Modellierung der Tragwerksschale	40
6.3.2	Berechnungsverfahren	40
6.3.3	Geometrische Imperfektionen	43
6.4	Berechnung des Kastentragwerks eines Silos aus Platteneinheiten	43
6.4.1	Modellierung des Kastentragwerks aus einer Platteneinheit	43
6.4.2	Geometrische Imperfektionen	44
6.4.3	Berechnungsverfahren	44
6.5	Berechnungsansatz für Profilbleche	44
7	Bemessung von Zylinderschalenwänden im Grenzzustand der Tragfähigkeit	47
7.1	Grundlagen	47
7.1.1	Allgemeines	47
7.1.2	Bemessung der Silowand	47
7.2	Unterscheidung zwischen verschiedenen Formen zylindrischer Schalen	48
7.3	Widerstand geschweißter oder geschraubter isotroper Zylinderschalenwände	49
7.3.1	Allgemeines	49
7.3.2	Beurteilung von Bemessungsspannungsergebnissen	49
7.3.3	Grenzzustand des plastischen Versagens	50
7.4	Widerstand isotroper Zylinderwände unter Normaldruckbeanspruchung	51
7.4.1	Elastisches Beulen unter konstanter Normaldruckbeanspruchung	51
7.4.2	Elastisches Beulen unter ungleichmäßiger Normaldruckbeanspruchung	53
7.4.3	Elastisches Normaldruckbeulen über einem horizontalen Überlappstoß	55
7.4.4	Vereinfachte Behandlung des Beulwiderstands über einem diskreten Auflager	56
7.4.5	Bewertung des Beulwiderstands unter Normaldruckbeanspruchung	56
7.5	Widerstand isotroper Zylinderwände unter Außendruck, innerem Teilvakuum und Windlast	58
7.5.1	Beulen der Zylinderwand	58
7.5.2	Einspannung am oberen Rand durch Traufring	61
7.5.3	Zwischenringe	63
7.5.4	Widerstand isotroper Zylinderwände unter Membranschub	63
7.6	Interaktionen zwischen Normaldruck-, Umfangsdruck- und Membranschubbeanspruchung in isotropen Wänden	65
7.7	Isotrope Wände unter zyklischen Lasten	65
7.7.1	Ermüdung, LS4	65
7.7.2	Zyklisches Plastizieren, LS2	65
7.8	Widerstand isotroper Wände mit Vertikalsteifen	65
7.8.1	Allgemeines	65
7.8.2	Grenzzustand des plastischen Versagens	66
7.8.3	Beulen unter Normaldruckbeanspruchung	66
7.8.4	Beulen unter Außendruck, Teilvakuum oder Windlast	68

7.8.5	Beulen unter Membranschubbeanspruchung	68
7.9	Widerstand horizontal profilierter Zylinderwände	69
7.9.1	Allgemeines	69
7.9.2	Toleranzanforderungen.....	70
7.9.3	Grenzzustand des plastischen Versagens.....	70
7.9.4	Beulen unter Normaldruckbeanspruchung.....	71
7.9.5	Beulen profilierter Zylinderschalen unter Außendruck, Teilvakuum oder Windlast.....	77
7.9.6	Beulen profilierter Zylinderschalen unter Membranschubbeanspruchung	78
7.10	Vertikal profilierte Zylinderwände mit Ringsteifen.....	78
7.10.1	Allgemeines	78
7.10.2	Grenzzustand des plastischen Versagens.....	79
7.10.3	Beulen unter Normaldruckbeanspruchung.....	79
7.10.4	Beulen unter Außendruck, Teilvakuum oder Windlast.....	79
7.10.5	Membranschub.....	79
7.11	Bauliche Durchbildung bei Öffnungen in Zylinderwänden.....	79
7.11.1	Allgemeines	79
7.11.2	Rechteckige Öffnungen.....	79
8	Lagerungsbedingungen für Zylinderwände	81
8.1	Schale mit vollständig aufgelagerter Basis	81
8.2	Isotrope Schalen mit Zargenlagerung.....	81
8.3	Isotrope Zylinderschalenwand mit eingebundenen Stützen	81
8.4	Rahmenauflager unter isotroper Siloschalenwand.....	82
8.5	Diskret aufgelagerte isotrope Zylinderschale ohne Ringträger.....	84
8.6	Diskret aufgelagerte isotrope Zylinderschale mit Ringträger.....	85
8.7	Diskret aufgelagerte isotrope Zylinderschale mit Zwischenring	86
8.7.1	Zwischenring auf idealer Höhe.....	86
8.7.2	Zwischenring unterhalb der idealen Höhe	88
8.8	Diskret aufgelagerte isotrope Silos mit Stützen unterhalb des Trichters.....	90
8.9	Lokale Auflagerdetails und Krafteinleitungsrippen in isotropen Zylinderwänden	90
8.9.1	Lokale Auflager unter der Wand eines isotropen Zylinders	90
8.9.2	Lokale Rippen zur Lasteinleitung in isotrope Zylinderwände	91
8.10	Verankerung an der Basis eines Silos mit isotroper Wand.....	92
8.11	Zylinderschalen mit isotroper Wand und Vertikalsteifen mit vollständig aufgelagerter Basis.....	93
8.12	Profilierte versteifte Zylinderschalen mit vollständig aufgelagerter Basis.....	93
9	Bemessung isotroper konischer Trichter im Grenzzustand der Tragfähigkeit	94
9.1	Grundlagen.....	94
9.1.1	Allgemeines	94
9.1.2	Unterscheidung zwischen Trichterschalenformen.....	94
9.2	Bemessung einer isotropen Trichterwand	94
9.3	Widerstand isotroper konischer Trichter.....	95
9.3.1	Allgemeines	95
9.3.2	Isotrope, unversteifte, geschweißte oder geschraubte Trichter	96
9.4	Angaben zu speziellen Trichtertragwerken	102
9.4.1	Tragkonstruktionen	102
9.4.2	Auf einem Rahmentragwerk aufgelagerte Trichter.....	102
9.4.3	Stützengelagerte Trichter.....	102
9.4.4	Unsymmetrische Trichter	103
9.4.5	Versteifte konische Trichter.....	103
9.4.6	Konische Trichter aus mehreren Segmenten.....	103
10	Bemessung von Abzweigungen und Stützringträgern in kreisförmigen Silos im Grenzzustand der Tragfähigkeit	104
10.1	Grundlagen.....	104
10.1.1	Allgemeines	104

10.1.2	Bemessung von Abzweigungsring und Ringträger	104
10.1.3	Unterscheidungen zwischen Abzweigungsformen	104
10.1.4	Modellierung isotroper Abzweigungen.....	105
10.1.5	Grenzen für die Ringanordnung	106
10.2	Berechnung der Abzweigung	106
10.2.1	Allgemeines	106
10.2.2	Gleichmäßig aufgelagerte isotrope Abzweigungen	107
10.2.3	Abzweigung mit isotropem Ringträger über diskreten Auflagern	113
10.3	Tragwerkswiderstände für isotrope Knotenlinien.....	116
10.3.1	Allgemeines	116
10.3.2	Widerstand im Grenzzustand des plastischen Versagens.....	116
10.3.3	Widerstand gegen Knicken in der Ebene.....	118
10.3.4	Widerstand gegen Knicken aus der Ebene und lokales Schalenbeulen nahe der Knotenlinie	118
10.4	Grenzzustandsnachweise für isotrope Abzweigungen.....	121
10.4.1	Gleichmäßig aufgelagerte Abzweigungen	121
10.4.2	Abzweigungsringträger.....	122
10.5	Betrachtungen zu Auflageranordnungen für die Knotenlinie	124
10.5.1	Zargengelagerte Knotenlinien.....	124
10.5.2	Stützengelagerte Knotenlinien und Ringträger	124
10.5.3	Basisring	124
11	Bemessung kreisförmiger konischer Dachtragwerke im Grenzzustand der Tragfähigkeit..	124
11.1	Grundlagen	124
11.2	Unterscheidung zwischen verschiedenen Formen von Dachtragwerken	125
11.2.1	Bezeichnungen für Dächer	125
11.3	Widerstand kreisförmiger konischer isotroper Silodächer	125
11.3.1	Schalendächer bzw. ungestützte Dächer	125
11.3.2	Gespärredächer bzw. gestützte Dächer	126
11.3.3	Profilblechdächer.....	126
11.3.4	Traufkante (Knotenlinie zwischen Dach und Schale).....	126
12	Bemessung von rechteckigen und ebenwandigen Silos im Grenzzustand der Tragfähigkeit.....	126
12.1	Grundlagen	126
12.2	Klassifizierung von ebenwandigen Tragwerksformen	127
12.2.1	Unversteifte Silos.....	127
12.2.2	Versteifte Silos.....	127
12.2.3	Silos mit Zugankern.....	127
12.3	Tragwiderstand unversteifter vertikaler Wände.....	128
12.4	Tragwiderstand von Silowänden aus versteiften oder profilierten Platten	128
12.4.1	Allgemeines	128
12.4.2	Allgemeine Biegung infolge direkter Einwirkung des Schüttguts.....	130
12.4.3	Membranspannungen aus Schubfeldwirkung.....	130
12.4.4	Lokale Biegeeinwirkung aus Schüttgut und/oder Ausrüstung	131
12.5	Silos mit innen liegenden Zugankern	131
12.5.1	Kräfte in innen liegenden Zugankern infolge Schüttgutdruck	131
12.5.2	Modellierung und Grundsätze für die Zugankerberechnung	133
12.5.3	Lastfälle für Silos mit innen liegenden Zugankern	137
12.5.4	Vertikalsteifen an Silos mit innen liegenden Zugankern	137
12.6	Festigkeit von pyramidischen Trichtern	138
12.7	Vertikale Steifen an Kastenwänden.....	138
12.8	Auflagerungsanforderungen für Platteneinheiten	139
13	Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit	139
13.1	Allgemeines	139
13.2	Zylindrische isotrope und isotrope versteifte Schalenwände	139

13.2.1	Durchbiegungen.....	139
13.3	Zylindrische profilierte und profilierte versteifte Schalenwände	140
13.3.1	Grundlagen.....	140
13.4	Konische Trichter	140
13.4.1	Grundlagen.....	140
13.4.2	Schwingungen	140
13.5	Rechteckige und ebenwandige Silos.....	140
13.5.1	Grundlagen.....	140
13.5.2	Durchbiegungen.....	141
Anhang A (informativ) Vereinfachte Regeln für kreisförmige Silos der Silogruppe 1 mit isotropen Wänden.....		
A.1	Anwendung dieses Anhangs	142
A.2	Anwendungs- und Gültigkeitsbereich.....	142
A.3	Einwirkungskombinationen für Silogruppe 1	142
A.4	Beurteilung der Auswirkung von Einwirkungen	142
A.5	Beurteilung im Grenzzustand der Tragfähigkeit.....	142
A.5.1	Allgemeines	142
A.5.2	Geschweißte oder geschraubte isotrope Zylinderwände.....	143
A.5.3	Konische geschweißte oder geschraubte Trichter.....	145
A.5.4	Abzweigung.....	146
Anhang B (informativ) Vereinfachte Regeln für Abzweigungsringträger in kreisförmigen Silos mit horizontal profilierten Wänden und Vertikalsteifen		
B.1	Anwendung dieses Anhangs	149
B.2	Anwendungs- und Gültigkeitsbereich.....	149
B.3	Bewertung der Umfangskraft im Abzweigungsring.....	149
B.4	Bewertung der Umfangskraft im Abzweigungsring.....	150
B.4.1	Geometrie des Abzweigungsrings	150
B.4.2	Bestimmung der Umfangskraft im Ring.....	151
B.5	Bestimmung des Knickwiderstands eines Abzweigungsrings.....	152
Anhang C (informativ) Ausdrücke für Membranspannungsergebnisse in konischen Trichtern.....		
C.1	Anwendung dieses Anhangs	154
C.2	Anwendungs- und Gültigkeitsbereich.....	154
C.3	Drücke nach allgemeiner Trichtertheorie (nach EN 1991-4)	154
C.4	Gleichmäßiger Normaldruck p_0 mit Wandreibung μp_0	155
C.5	Linear veränderlicher Normaldruck von p_1 an der Kegelspitze auf p_2 an der Abzweigung mit Wandreibung μp	155
C.6	Normaldruckverteilung im „radialen Spannungsfeld“ mit dreieckiger Spannungsspitze unterhalb der Abzweigung.....	155
Literaturhinweise.....		157

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (prEN 1993-4-1:2024) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 250 „Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau“ erarbeitet, dessen Sekretariat von BSI gehalten wird. CEN/TC 250 ist für alle Eurocodes des konstruktiven Ingenieurbaus zuständig. Die Verantwortung für alle Angelegenheiten der Tragwerks- und geotechnischen Planung wurde dem CEN/TC 250 von CEN übertragen.

Dieses Dokument ist derzeit zur CEN-Umfrage vorgelegt.

Dieses Dokument wird EN 1993-4-1:2007 einschließlich Änderungen und Berichtigungen ersetzen.

Die erste Generation der EN Eurocodes wurde zwischen den Jahren 2002 und 2007 veröffentlicht. Dieses Dokument wurde als Teil der zweiten Generation der Eurocodes im Rahmen des Mandats M/515 erarbeitet, das die Europäische Kommission und die Europäische Freihandelsassoziation CEN erteilt haben.

Die Eurocodes wurden erarbeitet, um in Verbindung mit einschlägigen Ausführungs-, Werkstoff-, Produkt- und Prüfnormen angewendet zu werden und um Anforderungen an Ausführung, Werkstoffe, Produkte und Prüfung zu identifizieren, auf denen die Eurocodes beruhen.

Die Eurocodes erkennen die Verantwortlichkeit aller Mitgliedstaaten an und wahren deren Recht, sicherheitsbezogene Werte auf nationaler Ebene in Nationalen Anhängen festzulegen.

0 Einleitung

0.1 Einleitung zu den Eurocodes

Die Eurocodes des konstruktiven Ingenieurbaus umfassen die folgenden Normen, die in der Regel aus mehreren Teilen bestehen:

- EN 1990, *Eurocode — Grundlagen der Planung von Tragwerken und geotechnischen Bauwerken*
- EN 1991, *Eurocode 1 — Einwirkungen auf Tragwerke*
- 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 Aluminiumtragwerken*
- Neue Teile sind derzeit in Erarbeitung, z. B. der Eurocode für die Bemessung und Konstruktion von Bauteilen aus Glas.

0.2 Einleitung zu EN 1993 (alle Teile)

EN 1993 gilt für den Entwurf, die Berechnung und die Bemessung von Bauwerken aus Stahl. Eurocode 3 entspricht den Grundsätzen und Anforderungen an die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit von Tragwerken sowie den Grundlagen für ihre Bemessung und Nachweise, die in EN 1990, Grundlagen der Planung von Tragwerken und geotechnischen Bauwerken, enthalten sind.

EN 1993 behandelt ausschließlich Anforderungen an die Tragfähigkeit, die Gebrauchstauglichkeit, die Dauerhaftigkeit und die Feuerwiderstandsfähigkeit von Tragwerken aus Stahl. Andere Anforderungen, wie z. B. bezüglich Wärmeschutz oder Schallschutz, werden nicht berücksichtigt.

EN 1993 besteht aus mehreren Teilen:

EN 1993-1, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*;

EN 1993-2, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 2: Brücken*;

EN 1993-3, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 3: Türme, Maste und Schornsteine*;

EN 1993-4, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 4: Silos und Tankbauwerke*;

EN 1993-5, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 5: Pfähle und Spundwände*;

EN 1993-6, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 6: Kranbahnen*;

EN 1993-7, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 7: Sandwich-Elemente.*

EN 1993-1 existiert nicht als physisches Dokument, sondern besteht aus den folgenden 14 Einzelteilen, deren grundlegender Teil EN 1993-1-1 ist:

EN 1993-1-1, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau;*

EN 1993-1-2, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-2: Allgemeine Regeln — Tragwerksbemessung für den Brandfall;*

EN 1993-1-3, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-3: Kaltgeformte Bauteile und Profiltafeln;*

ANMERKUNG Kaltgeformte Hohlquerschnitte nach EN 10219 werden in EN 1993-1-1 behandelt.

EN 1993-1-4, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-4: Tragwerke aus nichtrostenden Stählen;*

EN 1993-1-5, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile;*

EN 1993-1-6, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-6: Festigkeit und Stabilität von Schalen;*

EN 1993-1-7, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-7: Plattenförmige Bauteile mit Querbelaastung;*

EN 1993-1-8, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-8: Anschlüsse;*

EN 1993-1-9, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-9: Ermüdung;*

EN 1993-1-10, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-10: Stahlsortenwahl im Hinblick auf Bruchzähigkeit und Eigenschaften in Dickenrichtung;*

EN 1993-1-11, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-11: Zugglieder;*

EN 1993-1-12, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-12: Zusätzliche Regeln zur Erweiterung von EN 1993 auf Stahlsorten bis S960*

EN 1993-1-13, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-13: Träger mit großen Stegöffnungen;*

EN 1993-1-14, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-14: Bemessung mithilfe von Finite-Element-Berechnung.*

Alle folgenden Teile von EN 1993-1-2 bis EN 1993-1-14 behandeln allgemeine Themen, die unabhängig von der Art des Tragwerks sind, wie die Tragwerksbemessung für den Brandfall, kaltgeformte Bauteile und Bleche, nichtrostende Stähle, plattenförmige Bauteile usw.

Alle folgenden Teile von EN 1993-2 bis EN 1993-7 behandeln Themen, die für eine bestimmte Tragwerksart maßgebend sind, wie Stahlbrücken; Türme, Maste und Schornsteine; Silos und Tankbauwerke; Pfähle und Spundwände; Kranbahnen usw. EN 1993-2 bis EN 1993-7 beziehen sich auf die allgemeinen Regeln nach EN 1993-1 und ergänzen, ändern oder ersetzen diese.

0.3 Einleitung zu prEN 1993-4-1

prEN 1993-4-1 enthält Hinweise zur Tragwerksplanung von Silos und Bemessungsregeln, welche die allgemeinen Regeln nach den jeweiligen Teilen von EN 1993-1 ergänzen.

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

0.4 In den Eurocodes verwendete Verbformen

Das Verb „muss“ beschreibt eine Anforderung, die zwingend zu befolgen ist und von der bei Anwendung der Eurocodes keine Abweichung zulässig ist.

Das Verb „sollte“ beschreibt eine streng empfohlene Auswahl oder Vorgehensweise. In Abhängigkeit von nationalen Regeln und/oder relevanten Vertragsbestimmungen können alternative Lösungen verwendet/angenommen werden, wenn sie technisch gerechtfertigt sind.

Das Verb „darf“ beschreibt eine erlaubte Vorgehensweise innerhalb der Anwendungsgrenzen der Eurocodes.

Das Verb „kann“ beschreibt Möglichkeiten und Fähigkeiten; es wird für Tatsachenfeststellungen und Erklärungen verwendet.

0.5 Nationaler Anhang zu prEN 1993-4-1

Nationale Festlegungen sind in dieser Norm zulässig, wo diese Möglichkeit ausdrücklich in Anmerkungen angegeben wird. Nationale Festlegungen umfassen die Auswahl der Werte für national festzulegende Parameter (NDP).

Hierzu kann die jeweilige nationale Ausgabe von prEN 1993-4-1 einen Nationalen Anhang mit allen nationalen Festlegungen enthalten, die für den Entwurf und die Bemessung von Hoch- und Ingenieurbauten im jeweiligen Land Verwendung finden.

Wird keine nationale Festlegung angeführt, ist der in dieser Norm angegebene Standardwert anzuwenden.

Wenn keine nationale Festlegung angeführt wird und kein Standardwert in dieser Norm angegeben ist, kann die Festlegung durch eine zuständige Behörde getroffen werden, oder sofern keine Festlegungen getroffen wurden, können die beteiligten Parteien im Einzelfall eine Vereinbarung treffen.

Nationale Festlegungen sind in prEN 1993-4-1 durch Anmerkungen zu den folgenden Abschnitten gestattet:

4.3.2(4)	4.3.3(1)	4.3.3(3)	4.3.3(8)
4.4.1.2(3)	4.4.2(2)	4.5.3(1)	5.4(1)
6.1.4(6)	7.5.4(3)	12.5.2(9)	

Nationale Festlegungen sind in prEN 1993-4-1 zulässig bei Anwendung der folgenden informativen Anhänge:

Keine

Der Nationale Anhang kann, direkt oder durch Verweisungen, ergänzende nicht widersprechende Angaben zur Erleichterung der Umsetzung enthalten, sofern dadurch keine Bestimmungen der Eurocodes geändert werden.

1 Anwendungsbereich

1.1 Anwendungsbereich zu EN 1993-4-1

(1) prEN 1993-4-1 enthält Regeln für die Tragwerksplanung von (auf dem Baugrund) freistehenden oder auf Rahmentragwerken aufgelagerten (aufgeständerten) Stahlsilos mit kreisförmigem oder rechteckigem Grundriss.

(2) prEN 1993-4-1 gilt für Silos aus isotropen Walzblechen mit oder ohne Versteifung, aus Profilblechen mit oder ohne Versteifung sowie aus Flach- oder Profilblechen, die zu Kastentragwerken unterschiedlicher Geometrien zusammengesetzt werden. prEN 1993-4-1 gilt für vertikale Wände, Trichter, Dächer, Abzweigungen und Tragkonstruktionen.

(3) prEN 1993-4-1 gilt weder für Lagerbehälter für Silage und Anwelksilage noch für die Lagerung von nicht frei fließenden Materialien (siehe EN 1991-4). Dieser Teil 4-1 deckt auch nicht Folgendes ab:

- Feuerwiderstandsfähigkeit (Brandschutz);
- zylindrische Silos mit inneren Unterteilungen;
- Innenkonstruktionen innerhalb eines einzelnen Silos (ausgenommen bei innen liegenden Zugankern nach 12.5);
- Silos mit einer Tragfähigkeit kleiner als 100 kN (10 Tonnen);
- auf einem Rahmentragwerk aufgelagerte Trichter;
- Fälle, in denen spezielle Maßnahmen zur Begrenzung von Schadensfolgen erforderlich sind.

(4) Dieses Dokument ist anwendbar auf Silos innerhalb der folgenden Maßgrenzen (siehe EN 1991-4):

- Verhältnis von Höhe zu Durchmesser des Silos $h_b/d_c < 10$
- Gesamthöhe des Silos $h_b < 70 \text{ m}$
- äquivalenter Durchmesser des Silos $d_c < 60 \text{ m}$

ANMERKUNG Diese Maßgrenzen sind enger gefasst als jene nach EN 1991-4, die auch für Silos aus anderen Baustoffen gelten.

(5) In den Abschnitten dieser Norm, die für Silos mit kreisförmigem Grundriss gelten, ist die geometrische Form zwar auf rotationssymmetrische Tragwerke beschränkt, diese können jedoch unsymmetrischen Einwirkungen ausgesetzt sein und Auflager enthalten, welche nicht rotationssymmetrische Kräfte in das Silobauwerk eintragen.

(6) Dieser Teil behandelt ausschließlich die Anforderungen an Tragwiderstand und Stabilität von Stahlsilos. Zu weiteren Anforderungen (z. B. an die Betriebssicherheit, Funktionstüchtigkeit, Herstellung und Montage, Qualitätskontrolle, Details wie Mannlöcher, Stutzen, Füllrichtungen, Austragsöffnungen, Förderanlagen usw.) siehe sonstige einschlägige Normen und Angaben.

(7) Dieser Teil behandelt sowohl einzeln stehende Silotragwerke als auch Silos, die mit anderen zu einer Batterie verbunden sind; in dieser gesamten Norm bezieht sich jedoch der Begriff Silo auf eine einzelne Zelle innerhalb einer Silobatterie.

(8) Bestimmungen für die speziellen Anforderungen der Bemessung gegen Erdbeben sind in EN 1998-4 enthalten, wodurch die Bestimmungen nach Eurocode 3 speziell für diesen Zweck ergänzt oder angepasst werden.

(9) Die Tragwerksplanung von Tragkonstruktionen für Silos wird in EN 1993-1-1 behandelt. Als zur Tragkonstruktion gehörend werden alle tragenden Bauteile unterhalb des Untergurtes des untersten Silorings (siehe Bild 1.1) angesehen, wobei Abschnitt 8 dieses Dokuments Angaben zu einigen Formen von Tragkonstruktionen enthält.

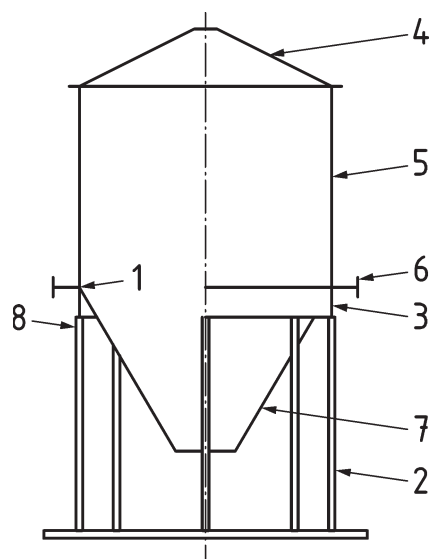
(10) Stahlbetonfundamente für Silos werden in EN 1992 (alle Teile) und EN 1997 (alle Teile) behandelt.

1.2 Voraussetzungen

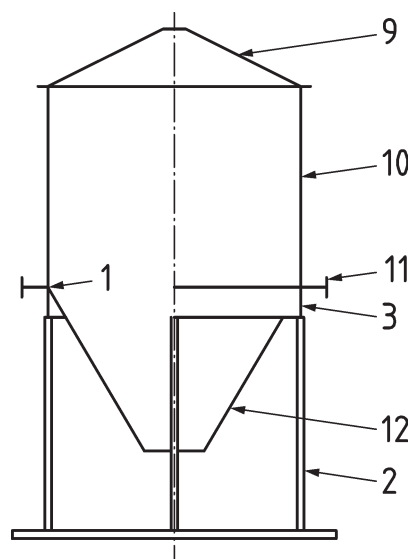
(1) Sofern nicht ausdrücklich anders angegeben, gelten die Bestimmungen nach EN 1990, EN 1991 (alle Teile) und EN 1993-1 (alle Teile).

(2) Die in EN 1993-4-1 angegebenen Bemessungsverfahren sind anwendbar, wenn:

- die Qualität der Ausführung den Festlegungen nach EN 1090-2 entspricht; und
- die verwendeten Baustoffe und Bauprodukte den Festlegungen nach den maßgebenden Teilen von EN 1993 (alle Teile) oder nach den maßgebenden Baustoff- und Produktspezifikationen entsprechen.



a) Silo mit kreisförmigem Grundriss



b) Silo mit rechteckigem Grundriss

Legende

- | | | | |
|---|--------------------------------|----|---|
| 1 | Abzweigung | 7 | konischer Trichter |
| 2 | Stütze: Tragkonstruktion | 8 | unterhalb dieser Linie gilt EN 1993-1-1 |
| 3 | Zarge | 9 | pyramidisches Dach |
| 4 | konisches Dach | 10 | rechteckiger Kasten |
| 5 | Zylinderschale oder Siloschaft | 11 | Ringträger |
| 6 | Ring | 12 | pyramidischer Trichter |

Bild 1.1 — Bezeichnungen für Silotragwerke

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. 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 1090-2, *Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken — Teil 2: Technische Regeln für die Ausführung von Stahltragwerken*

EN 1990:2023¹, *Eurocode — Grundlagen der Planung von Tragwerken und geotechnischen Bauwerken*

EN 1991 (alle Teile), *Eurocode 1 — Einwirkungen auf Tragwerke*

EN 1993 (alle Teile), *Eurocode 3 — Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten*

ISO 8930, *General principles on reliability for structures — Vocabulary*

3 Begriffe, Symbole, Vorzeichenvereinbarungen und Einheiten

3.1 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach EN 1990, ISO 8930 und die folgenden Begriffe.

3.1.1

Längsrichtung

vertikale Tangente an die zylindrische Silowand

Anmerkung 1 zum Begriff: Nur bei der Zylinderform ist sie mit der Meridianrichtung identisch.

3.1.2

Rotationsschale

Schalentragwerk, dessen Geometrie durch die Rotation eines Meridians um eine zentrale Achse definiert ist

3.1.3

Basisring

Bauteil, das der Umfangslinie an der Basis des Tragwerks folgt und die Möglichkeit bietet, das Tragwerk an das Fundament oder ein anderes Tragwerkselement anzuschließen

Anmerkung 1 zum Begriff: Er wird auch benötigt, um die angenommenen Randbedingungen praktisch sicherzustellen.

3.1.4

Kasten

durch Zusammenbau ebener Bleche zu einer dreidimensionalen geschlossenen Form gebildetes Tragwerk

Anmerkung 1 zum Begriff: Ein Kasten im Sinne dieser Norm hat im Allgemeinen in allen Richtungen Maße von gleicher Größenordnung.

¹ Unter Berücksichtigung von EN 1990:2023/prA1:2024

3.1.5

Umfangsrichtung

horizontale Tangente an die Silowand in jedem Punkt

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Umfangsrichtung ändert sich längs des Siloumfangs, liegt in der horizontalen Ebene und ist tangential zur Silowand, unabhängig davon, ob der Silo im Grundriss kreisrund oder rechteckig ist.

3.1.6

kontinuierlich aufgelagerter Silo

Silo, bei dem alle Stellen längs des Umfangs in gleicher Weise unterstützt werden

Anmerkung 1 zum Begriff: Kleine Abweichungen von dieser Bedingung (z. B. eine kleine Öffnung) beeinflussen nicht notwendigerweise die Anwendbarkeit dieser Definition.

3.1.7

profilierte Silowand

Einzelschuss einer Siloschale mit kreisförmigem Grundriss, der aus Blechen gebildet wird, welche vor der Bauausführung in eine Profilform gewalzt wurden (gerundete oder trapezförmige Wellenformen) für einen erhöhten Biege­widerstand in einer Richtung

Anmerkung 1 zum Begriff: Siehe 6.5. Dieser Begriff bezieht sich ebenfalls auf eine Wand in einem Silo mit rechteckigem oder mehrseitigem Grundriss, wenn trapezförmige Wellenformen eingesetzt werden, um den Biege­widerstand zu erhöhen.

3.1.8

Schuss

Höhenabschnitt einer Zylinderwand aus einer einzelnen Blechdicke oder zwischen Ringsteifen, gewöhnlich aus mehreren Einzelschüssen hergestellt

Anmerkung 1 zum Begriff: Siehe 3.1.32.

3.1.9

Zylinderschale

vertikaler Wandabschnitt eines Silos mit kreisförmigem Grundriss

Anmerkung 1 zum Begriff: Siehe Bild 1.1.

3.1.10

diskretes Auflager

Stelle, an welcher der Silo durch eine lokale Konsole oder Stütze unterstützt wird, mit einer begrenzten Anzahl schmaler Lagerungen längs des Siloumfangs

Anmerkung 1 zum Begriff: Üblicherweise werden vier oder sechs diskrete Auflager verwendet, jedoch kommen auch drei oder mehr als sechs vor.

3.1.11

Trichter

zum Siloboden zusammenlaufender Siloabschnitt mit üblicherweise konischer Form

Anmerkung 1 zum Begriff: Er wird angeordnet, um das Schüttgut zu einem Schwerkraftauslass zu leiten.

3.1.12

isotroper konischer Trichter

konischer Trichter, der aus gewalzten Flachblechen geformt wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Diese Bleche können durch Schweißen oder Schrauben verbunden werden.

3.1.13

isotrope Schale

Schalenabschnitt eines Silos, der aus gewalzten Flachblechen geformt wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Diese Bleche können durch Schweißen oder Schrauben verbunden werden.

3.1.14

isotrope Schalen mit Vertikalsteifen

isotroper Schalenabschnitt mit angeschlossenen Vertikalsteifen, der aus gewalzten oder kaltgeformten Abschnitten bestehen und an der Außen- oder Innenseite der Schale liegen kann

3.1.15

Verbindungswirksamkeitsfaktor

Verhältnis zwischen dem Membrankraftwiderstand einer Schweiß- oder Schraubverbindung und dem Membranbruchwiderstand des Trägerblechs

3.1.16

Knotenlinie

Punkt, an dem zwei oder mehr Schalenabschnitte oder ebene Kastenwände zusammentreffen

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Knotenlinie kann eine Ringsteife einschließen oder unversteift sein.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die Anschlusslinie einer Ringsteife an eine Schale oder einen Kasten kann als eine Knotenlinie betrachtet werden.

3.1.17

Meridianrichtung

Tangente an die Silowand in jedem Punkt einer vertikalen Ebene

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Meridianrichtung ändert sich mit dem jeweils betrachteten Tragwerksteil (zylindrisch, konisch oder kugelförmig). Alternativ ist sie die vertikale oder geneigte Richtung auf der Oberfläche des Tragwerks, der ein Regentropfen auf dieser Oberfläche folgen würde.

3.1.18

Mittelfläche

Mittelfläche der Schalenwand an beliebiger Stelle, die unter elastischen Bedingungen spannungsfrei ist, wenn die Schale reiner Biegung in beliebiger Richtung ausgesetzt ist

Anmerkung 1 zum Begriff: Dieser Begriff kann sich auch auf die Mittelebene eines Flachblechs, das Teil eines Kastens ist, beziehen.

3.1.19

pyramidischer Trichter

zum Siloboden zusammenlaufender Siloabschnitt mit der Form einer umgedrehten Pyramide

Anmerkung 1 zum Begriff: In EN 1993-4-1 wird seine Geometrie als einfach aus nur vier ebenen trapezförmigen Wänden gebildet angenommen.

3.1.20

Rippe

lokales Bauteil, das eine primäre Biegelastabtragung längs eines Schalen- oder Plattenmeridians ermöglicht, welcher eine Erzeugende der Rotationsschale oder eine vertikale Steife an einem Kasten darstellt

Anmerkung 1 zum Begriff: Eine Rippe wird vorgesehen, um Querlasten mittels Biegung auf das Tragwerk zu verteilen.

3.1.21

Ringträger oder Ringbalken

Versteifungsbauteil in Umfangsrichtung, das sowohl in der Ebene des kreisförmigen oder rechteckigen Tragwerksquerschnitts als auch rechtwinklig dazu biegesteif und biegefest ist

Anmerkung 1 zum Begriff: Dieser Ringbalken ist ein Haupttragglied zur Verteilung lokaler Lasten in die Schale oder den Kasten.

3.1.22

Ringsteife

lokales Versteifungsbauteil, das an einem Punkt des Meridians längs des Tragwerkumfangs verläuft

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Ringsteife wird ohne wirksame Steifigkeit in der Meridianebene des Tragwerks angenommen. Sie wird vorgesehen, um die Stabilität zu verbessern oder lokale Lasten einzuleiten, nicht als Haupttragglied. Bei einer Rotationsschale ist sie kreisförmig, bei Kastentragwerken nimmt sie jedoch die Rechteckform des Grundrisses an.

3.1.23

Steifenabstand

Achsabstand zweier benachbarter paralleler Steifen

3.1.24

Schale

Tragwerk aus einer gekrümmten dünnen Wandung aus entweder Flach- oder Profilblech

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Schale kann mit diskreten äußeren oder inneren Bauteilen versteift sein. Die Schalenform kann zylindrisch, konisch oder kugelförmig sein.

3.1.25

Schalensegment

Bestandteil eines Schalentragwerks aus einzelnen Teilen, die jeweils aus einer gekrümmten dünnen Wandung bestehen

Anmerkung 1 zum Begriff: Das Segment umfasst den gesamten zylindrischen, konischen oder kugelförmigen Bereich, auch wenn es aus mehreren Blechen zusammengesetzt ist.

3.1.26

Silo

Behälter zur Speicherung körniger Feststoffpartikel

Anmerkung 1 zum Begriff: In dieser Norm wird davon ausgegangen, dass der Silo 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, mitunter auch Behälter, Trichter, Getreidetank oder Bunker.

3.1.27

Grundlastfall des Silos

SFLC, en: silo fundamental loading case

unter allen Bedingungen annähernd symmetrische Belastung infolge des gelagerten Schüttguts, die zu vereinfachten Situationen für die Tragwerksplanung führt

Anmerkung 1 zum Begriff: Diese Lastfälle sind in EN 1991-4 festgelegt.

3.1.28

Silogruppe

SG, en: silo group

Kategorisierung jedes Silos bezüglich der Komplexität der Anforderungen an die Tragwerksplanung auf Grundlage seiner Größe, Form und Nutzung

Anmerkung 1 zum Begriff: Jeder Silo wird entsprechend der Differenziertheit der Anforderungen an die Tragwerksplanung einer der Silogruppen 0, 1, 2 und 3 zugewiesen.

Anmerkung 2 zum Begriff: Diese Norm deckt keine Silos der Versagensfolgeklasse 4 ab, somit ist SG4 nicht definiert. Die Bestimmungen dieser Norm sind nicht erforderlich für SG0. Sämtliche Bestimmungen sind für SG1, SG2 und SG3 vorgesehen, sofern keine spezifischen Ausnahmen für SG1 oder SG2 angegeben werden.

3.1.29

Sonderlastfall des Silos

SSLC, en: silo special load case

Lastbedingung infolge des gelagerten Schüttguts, die unsymmetrisch auf das Tragwerk einwirkt und somit zu komplexeren Bemessungslastfällen für die Tragwerksplanung führt

Anmerkung 1 zum Begriff: Diese Lastfälle sind in prEN 1991-4:2024, 3.1.30, definiert.

Zarge (Standzarge)

Teil der Zylinderschale, der unterhalb der Abzweigung liegt

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Zarge unterscheidet sich vom oberen Teil dadurch, dass sie nicht in Kontakt mit dem gelagerten Schüttgut steht.

3.1.31

Berechnung mit verschmierten Steifen

Berechnung der Schale, bei der Steifen als fester Bestandteil der Wand und die Schalenwandeigenschaften als zusammenhängender Querschnitt behandelt werden

Anmerkung 1 zum Begriff: Eine Schalenbreite gleich einem ganzzahligen Mehrfachen des Steifenabstands wird verwendet, um die Eigenschaften der verschmierten Schale zu definieren. Die Steifigkeitseigenschaften einer verschmierten Schalenwandung sind orthotrop und enthalten Exzentrizitätsterme, die eine Kopplung des Biege- und Dehnverhaltens zur Folge haben.

3.1.32

Einzelschuss

einzelne Reihe von Blechen mit gegebener Dicke

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Zylinderschalenwand eines Silos wird mittels horizontaler Umfangsstöße zwischen einer Reihe kurzer zylindrischer Abschnitte gebildet, die jeweils als Einzelschuss bezeichnet werden, sowie mittels vertikaler Stöße zwischen einzelnen gekrümmten Blechen. Mehrere Einzelschüsse bilden gewöhnlich einen Schuss (siehe 3.1.8).

3.1.33

Längssteife

lokales Versteifungsbauteil, das einem Schalenmeridian folgt, welcher eine Erzeugende der Rotationsschale darstellt

Anmerkung 1 zum Begriff: Sie wird vorgesehen, um die Stabilität zu erhöhen oder bei der Einleitung lokaler Lasten mitzuwirken oder Normallasten aufzunehmen. Sie ist nicht dafür vorgesehen, die Haupttragfähigkeit bei Biegebeanspruchung infolge Querlasten bereitzustellen.

3.1.34

Komplexitätsklasse des Tragwerks

SCC, en: Structural Complexity Class

Klassifizierung eines Silos zur Berücksichtigung der Komplexität einer Tragwerksform, da bei der Festlegung von Einwirkungen eine andere Präzision erforderlich ist, um der Anfälligkeit gegenüber verschiedenen Versagensarten Rechnung zu tragen

3.1.35

Abzweigung

Knotenlinie zwischen der zylindrischen Silowand und einem darunter liegenden Trichter

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Knotenlinie kann sich im unteren Bereich des Zylinders oder an seinem unteren Rand befinden, wenn der Zylinder eine Standzarge einschließt.

3.2 In Teil 4-1 von Eurocode 3 verwendete Symbole

Grundlage der verwendeten Symbole ist ISO 3898.

3.2.1 Lateinische Großbuchstaben

A	Querschnittsfläche;
C	Membrandehnsteifigkeit;
C	Beulkoeffizient;
D	Biegesteifigkeit;
E	Elastizitätsmodul;
E_{red}	abgeminderter Elastizitätsmodul zur Berücksichtigung thermischer Auswirkungen;
F	Kraft;
G	Schubmodul;
H	Höhe des Tragwerks;
I	Flächenträgheitsmoment eines Querschnitts;
I_r	Flächenträgheitsmoment eines Ringquerschnitts;
I_x	Flächenträgheitsmoment eines Querschnitts bei Biegebeanspruchung in Längsrichtung;
I_θ	Flächenträgheitsmoment eines Querschnitts bei Biegebeanspruchung in Umfangsrichtung;
J	St. Venant'sches Torsionsträgheitsmoment;
K	Biegesteifigkeit eines Wandfeldes;
L	Höhe eines Schalensegments oder Länge einer Vertikalsteife;
M	Biegemoment;
N	Normalkraft;
P	Kraft je Umfangslängeneinheit;
Q	Parameter für die Fertigungstoleranz-Qualitätsklasse einer beulgefährdeten Schale;
V	Kraft je Längeneinheit auf einem Zuganker;
W	Vertikalkraft auf einem Trichter.

ANMERKUNG Die Koordinate x wird in EN 1993-1-6 für die Längsrichtung (auch als Meridianrichtung bezeichnet) in Zylinderschalen verwendet. Die Verwendung von x als Meridiankoordinate in allen Fällen führt zu einem Problem bei der Betrachtung von konischen Dächern und Trichtern, da x im Gesamtsystem streng als die axiale Koordinate angesehen wird. Bei Zylindern fallen die Meridiankoordinaten und die axialen Koordinaten zusammen, aber in EN 1993-4-1 ist eine grundlegende Unterscheidung zwischen der Längs- und der Meridianrichtung wichtig, daher wird x ausschließlich für die Längsrichtung verwendet. Bei der Betrachtung von Trichtern und konischen Dächern wird die Meridiankoordinate ϕ entsprechend der Darstellung nach Bild 3.1 und Bild 3.3 verwendet.

3.2.2 Lateinische Kleinbuchstaben

a	Koeffizient;
b	Breite von Blech oder Steife;
d_c	äquivalenter Durchmesser des Silos (siehe EN 1991-4);
d_{cr}	Maß zwischen zwei Wellenbergen einer Profilierung;
d_s	Umfangsabstand zwischen benachbarten Längssteifen;
e	Exzentrizität einer Kraft oder einer Steife;
f_y	Streckgrenze des Stahls;
f_u	Zugfestigkeit des Stahls;
g_r	Steifigkeitsparameter für unsymmetrische Verformung eines Ringbalkens;
g_s	Steifigkeitsparameter für unsymmetrische Verformung einer Schale;
h	Flanschabstand eines Ringträgers;
h_b	Gesamthöhe des Silos (siehe EN 1991-4);
j	Faktor für die Verbindungswirksamkeit von geschweißten Überlappstößen bei Beurteilung anhand der Membranspannungen;
j	Ersatzharmonische der veränderlichen Bemessungsspannung;
ℓ	mittragende Länge einer Schale bei linearer Spannungsberechnung;
ℓ	Halbwellenlänge einer potenziellen Beule (bei der Berechnung zu berücksichtigende Höhe);
l	Wellenlänge (Steigung) einer Profilierung in Profilblechen;
m	Biegemoment je Längeneinheit der Breite;
m_x	Biegemoment in Längs- oder Meridianrichtung in einem Zylinder je Umfangslängeneinheit;
m_ϕ	Meridianbiegemoment in einer Kegelschale je Umfangslängeneinheit;
m_y	Umfangsbiegemoment je Längeneinheit der Kastenhöhe;
m_θ	Umfangsbiegemoment je Längeneinheit der Schalenhöhe;
m_{xy}	Drillschubmoment je Längeneinheit der Blechbreite;
$m_{x\theta}$	Drillschubmoment in einem Zylinder je Längeneinheit der Schalenbreite;
$m_{\phi\theta}$	Drillschubmoment in einer Kegelschale je Längeneinheit der Breite;
n	Membranspannungsresultante;
n	Anzahl diskreter Auflager um den Siloumfang;
n_x	Membranspannungsresultante in Längs- oder Meridianrichtung in einem Zylinder je Umfangslängeneinheit;
n_ϕ	Membranspannungsresultante in Meridianrichtung in einer Kegelschale je Umfangslängeneinheit;

n_y	horizontale Membranspannungresultante je Längeneinheit der Kastenhöhe;
n_θ	Membranspannungresultante in Umfangsrichtung je Längeneinheit der Schalenhöhe;
n_{xy}	Membranschubspannungresultante je Längeneinheit der Flachblechbreite;
$n_{x\theta}$	Membranschubspannungresultante in einem Zylinder je Längeneinheit der Schalenbreite;
$n_{\phi\theta}$	Membranschubspannungresultante in einer Kegelschale je Längeneinheit der Breite;
p	flächenhaft verteilte Belastung (Druck);
p_h	Innendruck rechtwinklig zur Zylinderschale (nach außen gerichtet);
p_n	Innendruck rechtwinklig zum konischen Trichter (nach außen gerichtet);
p_t	Wandreibungslasten tangential zur Trichterschale in Meridianrichtung (abwärts gerichtet);
p_w	Wandreibungslasten tangential zur Zylinderschale in Meridianrichtung (abwärts gerichtet);
p_x	Flächenlast tangential zur Schale in Meridianrichtung (abwärts gerichtet);
p_x	Flächenlast tangential zur Schale in Meridianrichtung (abwärts gerichtet);
p_θ	Flächenlast tangential zur Schale in Umfangsrichtung (im Gegenuhrzeigersinn);
q	Außendruck rechtwinklig zur Schale (nach innen gerichtet);
r	Radialkoordinate in einem Silo mit kreisförmigem Grundriss;
r	Radius der Mittelfläche einer rotationssymmetrischen Schale;
r_ϕ	lokaler Krümmungsradius an Wellenberg bzw. -tal einer Profilierung;
s	Meridiankoordinate;
t	Wanddicke;
t_x, t_y	Ersatzwanddicke eines Profilbleches für die Dehnung in x - bzw. y -Richtung;
w	radiale oder senkrechte Durchbiegung;
x	lokale axiale Koordinate in einem Zylinder;
y	lokale Umfangskoordinate;
z	globale axiale Koordinate;
z	Koordinate längs der vertikalen Achse eines rotationssymmetrischen Silos (Rotationsschale).

3.2.3 Griechische Buchstaben

α	Faktor für elastische Beulimperfection (Knockdown-Faktor);
α	Wärmedehnungskoeffizient;
β	halber Kegelöffnungswinkel eines konischen Trichters;
γ_F	Teilsicherheitsbeiwert für Einwirkungen;
γ_M	Teilsicherheitsbeiwert für den Widerstand;
δ	Imperfektionsamplitude;
Δ	Inkrement;
Δt_a	Wanddickenverlust infolge Abrasion an Punkten in Kontakt mit beweglichem Schüttgut während Entleerung;
ζ	Faktor für die Spannungserhöhung über dem Ringträger an einem Auflager;
ζ_r	verringertes Spannungserhöhungsverhältnis über einem Zwischenring;

θ	Umfangskoordinate;
κ_g	Steifigkeitsverhältnis zwischen Schale und Träger (Quersteifigkeit des Trägers);
κ_r	Steifigkeitsverhältnis zwischen Schale und Ring (Umfangsbiegesteifigkeit des Rings);
λ	halbe Wellenlänge der symmetrischen Schalenbiegung in Meridianrichtung (kurzwellig);
$\bar{\lambda}$	bezogener Schlankheitsgrad einer Schale;
μ	Wandreibungskoeffizient;
μ	halbe Wellenlänge der unsymmetrischen Schalenbiegung in Meridianrichtung (langwellig);
ν	Querkontraktionszahl (Poissonzahl);
θ	Umfangskoordinate einer Schale;
σ	Längsspannung;
σ_{bx}	Biegespannung in Längs- oder Meridianrichtung in einer Zylinderschale;
$\sigma_{b\phi}$	Biegespannung in Meridianrichtung in einer Kegelschale;
σ_{by}	Umfangsbiegespannung in einem Kasten;
$\sigma_{b\theta}$	Umfangsbiegespannung in einer gekrümmten Schale;
τ_{bxy}	Drillschubspannung in einem Kasten;
$\tau_{bx\theta}$	Drillschubspannung in einer Zylinderschale;
$\tau_{b\phi\theta}$	Drillschubspannung in einer Kegelschale;
σ_{mx}	Membranspannung in Längs- oder Meridianrichtung in einer Zylinderschale;
$\sigma_{m\phi}$	Membranspannung in Meridianrichtung einer Kegelschale;
σ_{my}	Umfangsmembranspannung in einem Kasten;
$\sigma_{m\theta}$	Umfangsmembranspannung in einer gekrümmten Schale;
τ_{mxy}	Membranschubspannung in einem Kasten;
$\tau_{mx\theta}$	Membranschubspannung in einer gekrümmten Schale;
σ_{sox}	Oberflächenspannung in Längs- oder Meridianrichtung (außen) in einer Zylinderschale;
$\sigma_{so\phi}$	Oberflächenspannung in Meridianrichtung (außen) in einer Kegelschale;
σ_{soy}	Oberflächenspannung in Umfangsrichtung (außen) in einem Kasten;
$\sigma_{so\theta}$	Oberflächenspannung in Umfangsrichtung (außen) in einer gekrümmten Schale;
τ_{soxy}	Oberflächenschubspannung (außen) in einem Kasten;
$\tau_{sox\theta}$	Oberflächenschubspannung (außen) in einer Zylinderschale;
$\tau_{so\phi\theta}$	Oberflächenschubspannung (außen) in einer Kegelschale;
τ	Schubspannung;
ϕ	lokale Meridiankoordinate in einer Kegelschale;
χ	Abminderungsfaktor für Biegeknicken;
χ	Abminderungsfaktor für Schalenbeulspannung;
ψ	Parameter für ungleichmäßigen Spannungsverlauf;
ω	dimensionsloser Parameter bei Beulberechnung;
ω	vertikale Neigung eines Trichters mit nichtvertikaler Achse.

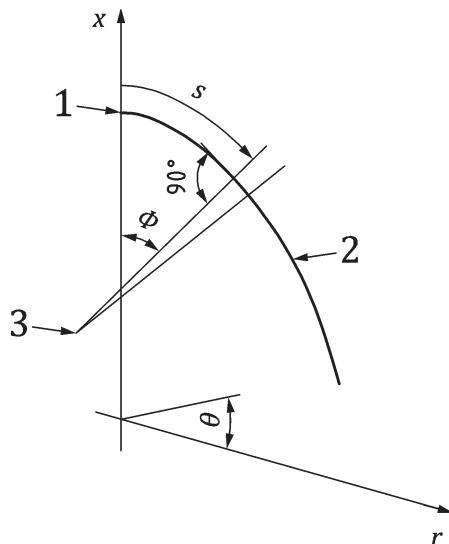
3.2.4 Indizes

E	Wert der Spannung oder Verschiebung (infolge Bemessungseinwirkungen);
F	Einwirkungen;
M	Werkstoff/Material;
R	Widerstand;
S	Wert der Spannungsresultante (infolge Bemessungseinwirkungen);
b	Biegung;
c	Zylinder;
cr	kritischer Beulwert (linearer Eigenwert);
d	Bemessungswert;
eff	effektiv;
eq	äquivalent;
h	Trichter;
m	Membran, Feldmitte;
min	kleinster zulässiger Wert;
n	rechtwinklig zur Wandung;
p	Druck;
r	radial;
s	Zarge, Auflager;
s	Oberflächenspannung (o – Außenseite, i – Innenseite);
u	Traglastwert;
w	parallel zur Wandung in Meridianrichtung (Wandreibung);
x	in Längs- oder Meridianrichtung;
y	in Umfangsrichtung (Kastentragwerke), Fließwert;
z	in Längsrichtung;
θ	in Umfangsrichtung (rotationssymmetrische Schalen);
ϕ	in Meridianrichtung in Kegelschalen.

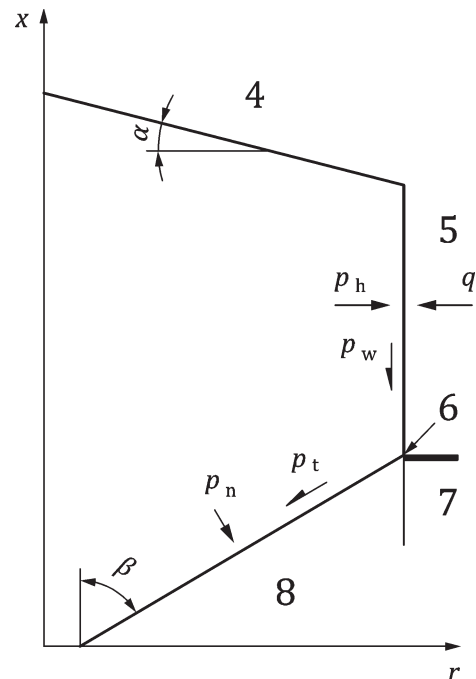
3.3 Vorzeichenvereinbarungen

3.3.1 Vereinbarungen für ein globales Koordinatensystem für das Tragwerk kreisförmiger Silos

(1) Die hier angegebene Vorzeichenvereinbarung gilt für das gesamte Silotragwerk und berücksichtigt, dass der Silo kein Bauteil ist.



a) Globales Koordinatensystem



b) Vertikalschnitt durch die rotationssymmetrische Siloschale

Legende

1	Pol	5	Zylinder
2	Schalenmeridian	6	Abzweigung
3	jeweiliger Mittelpunkt der Meridiankrümmung	7	Zarge
4	konisches Dach	8	konischer Trichter

Bild 3.1 — Globales Koordinatensystem und Belastungen an einem kreisförmigen Silo

ANMERKUNG Die Bezeichnungen für Lasten auf zylindrischen und konischen Wänden eines Silos entsprechen den in EN 1991-4 verwendeten Bezeichnungen für diese spezifischen Lasten. In EN 1993-1-6 werden weitere allgemeine Bezeichnungen verwendet, die abweichen.

(2) Im Allgemeinen werden Zylinderkoordinaten für das globale Koordinatensystem des kreisförmigen Silotragwerks (siehe Bild 3.1) wie folgt vereinbart:

Koordinatensystem

- Koordinate auf der Mittelachse einer Rotationsschale x ;
- Radialkoordinate r ;
- Umfangskoordinate θ ;
- Lokale Winkelkoordinate in Meridianrichtung eines Daches oder Trichters ϕ .

(3) Die Vereinbarung für positive Vorzeichen lautet wie folgt: Nach außen gerichtet positiv (Innendruck positiv, Verschiebungen nach außen positiv, ausgenommen Windlast und positiver Außendruck), Zugspannungen positiv (ausgenommen in Beulgleichungen, in denen Druckbeanspruchung positiv ist, wie im Text angegeben).

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

- Druck rechtwinklig zur Zylinderschale (nach außen gerichtet positiv) p_h ;
- Druck rechtwinklig zur Zylinderschale (nach innen gerichtet positiv) q ;
- Oberflächenlast in Meridianrichtung parallel zur Zylinderschale (abwärtsgerichtet positiv) p_w ;
- Druck rechtwinklig zum Trichter (nach außen gerichtet positiv) p_n ;
- Oberflächenlast in Meridianrichtung parallel zum Trichter (abwärtsgerichtet positiv) p_t ;
- Oberflächenlast in Umfangsrichtung parallel zur Schale (im Gegenuhrzeigersinn positiv) p_θ .

3.3.2 Vereinbarungen für ein globales Koordinatensystem für das Tragwerk rechteckiger Silos

(1) Die hier angegebene Vorzeichenvereinbarung gilt für das gesamte Silotragwerk und berücksichtigt, dass der Silo kein Bauteil ist.

ANMERKUNG 1 Im Allgemeinen werden für das globale Koordinatensystem des Silotragwerks kartesische Koordinaten x, y, z vereinbart, wobei z als vertikale Richtung angesetzt wird, siehe Bild 3.2 a).

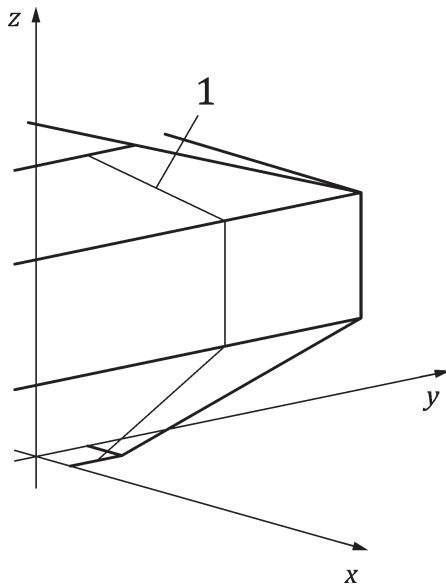
ANMERKUNG 2 Die Winkel α und β in einem rechteckigen Silo werden als die größten Steigungen auf der ebenen Oberfläche definiert, siehe Bild 3.2 b).

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

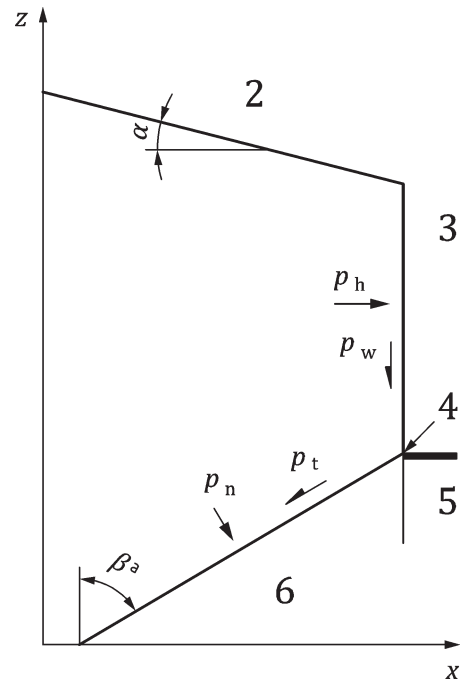
- nach außen gerichtet positiv (Innendruck positiv, Verschiebungen nach außen positiv);
- Zugspannungen positiv (ausgenommen in Beulgleichungen, in denen Druckbeanspruchung positiv ist);
- Biegespannungen unter Zugbeanspruchung auf der Oberfläche (außen).

(3) Die Vereinbarung für flächenhaft verteilte Einwirkungen auf die Silowandoberfläche lautet wie folgt:

- Druck rechtwinklig zur vertikalen Kastenwand (nach außen gerichtet positiv) p_h ;
- Oberflächenlast in Meridianrichtung parallel zur vertikalen Kastenwand (abwärtsgerichtet positiv) p_w ;
- Druck rechtwinklig zum Trichter auf der größten Neigung (nach außen gerichtet positiv) p_n ;
- Oberflächenlast in Meridianrichtung parallel zum Trichter auf der größten Neigung (abwärtsgerichtet positiv) p_t ;
- Oberflächenlast in Umfangsrichtung in der Ebene des Kastenquerschnitts (im Gegenuhrzeigersinn positiv) p_y .



a) Globales Koordinatensystem



b) Silokastenkoordinaten und Belastung:
Querschnitt

Legende

- 1 Kastenmeridian
- 2 pyramidisches Dach
- 3 vertikale Wand
- 4 Abzweigung
- 5 Zarge
- 6 pyramidischer Trichter
- ^a größte Neigung

Bild 3.2 — Globales Koordinatensystem und Belastungen an einem rechteckigen Silo

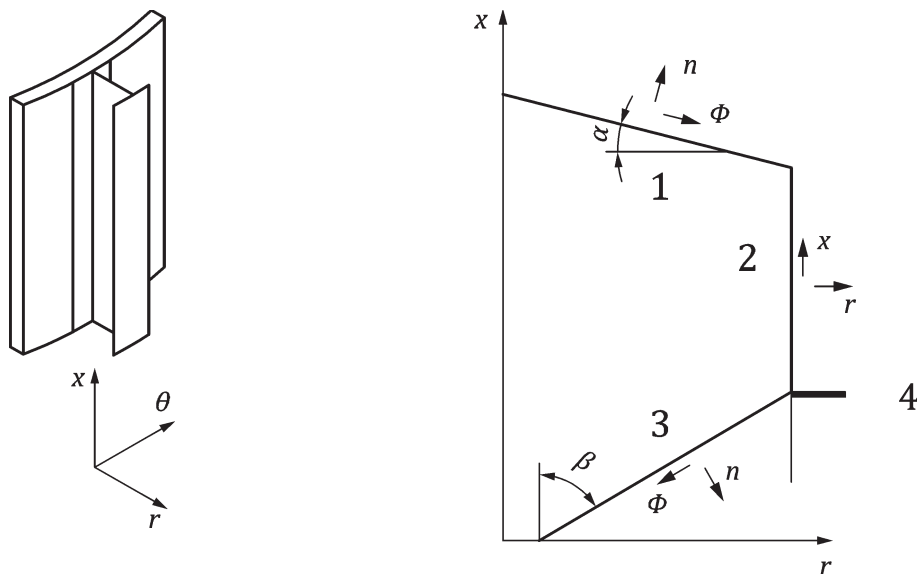
3.3.3 Vereinbarungen für die Koordinaten von Bauteilen in kreisförmigen und rechteckigen Silos

(1) Die Vereinbarung für an die Silowand angeschlossene Bauteile (siehe Bild 3.3 und Bild 3.4) ist für Bauteile in Meridianrichtung oder in Umfangsrichtung unterschiedlich.

(2) Für an die Silowand angeschlossene gerade Bauteile in Meridianrichtung (siehe Bild 3.3a) (Schalen- und Kastensilos) lautet die Vereinbarung:

- axiale oder Meridiankoordinate für Zylinderschale oder vertikale Kastenwand x ;
- axiale Koordinate für vertikale Kastenwand z ;
- senkrechte Koordinate für Zylinderschale r ;
- senkrechte Koordinate für vertikale Kastenwand n ;
- Meridiankoordinate für konischen Trichter und konisches Dach ϕ ;
- senkrechte Koordinate für Trichter und Dach n .

ANMERKUNG 1 Eine Steife in Meridianrichtung, die in Übereinstimmung mit der Meridianbiegung (m_x) des Zylinders um die Achse θ der Steife biegebeansprucht wird, wobei ihr Flächenträgheitsmoment mit I_x bezeichnet wird.



a) lokale Koordinaten und Biegerichtungen der Steife

b) lokale Achsen in verschiedenen Tragwerksegmenten

Legende

- 1 Dach
- 2 vertikale Wand
- 3 Trichter
- 4 Zarge

Bild 3.3 — Lokale Koordinatensysteme für Wände und Meridiansteifen an einer Schale

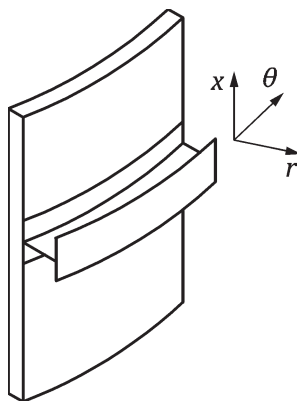
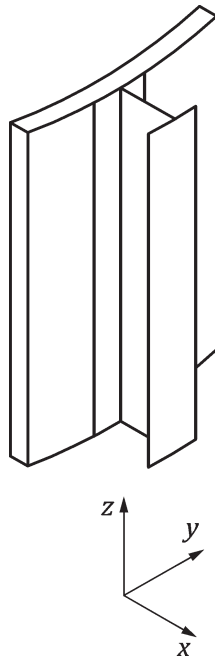
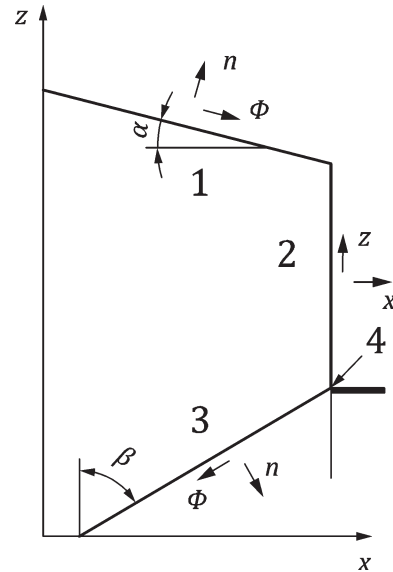


Bild 3.4 — Lokales Koordinatensystem für Ringsteifen in Umfangsrichtung an einer Schale für Biegerichtungen

ANMERKUNG 2 Zur Anpassung der Terminologie für Biegebeanspruchung von Schalenträgwerken werden die vertikalen Spannungen in sowohl Schale als auch vertikalen Steifen mit σ_x bezeichnet. Die Biegemomente, einschließlich Vertikalspannungen in vertikaler Steife, werden mit M_x und das Flächenträgheitsmoment einer Steife unter vertikaler Biegebeanspruchung (Spannungen in vertikaler Richtung) [Bild 3.3 a)] wird mit I_x bezeichnet (nicht mit I_0 , wie es bei einem Bauteil nach EN 1993-1-1 der Fall wäre). Ebenso werden die Umfangsspannungen in sowohl Schale als auch Ringsteifen mit σ_θ bezeichnet. Die Biegemomente, welche Umfangsspannungen in einer Ringsteife verursachen, werden mit M_θ und das Flächenträgheitsmoment eines Rings [Bild 3.4 a)] unter Biegebeanspruchung in der Ringebene (Spannungen in Umfangsrichtung) wird mit I_θ bezeichnet. Diese letztere Bezeichnung ist wichtig für die erforderliche Steifigkeit von Ringsteifen zur Unterstützung des Knickwiderstands unter Beanspruchung durch Außendruck oder Windlast.



a) lokale Koordinaten und Biegerichtungen der Steife



b) lokale Achsen in verschiedenen Tragwerksegmenten

Legende

- 1 Dach
- 2 vertikale Wand
- 3 Trichter
- 4 Zarge

Bild 3.5 — Lokale Koordinatensysteme für Wände und Meridiansteifen an einem Kasten

(3) Für an eine Schalenwand angeschlossene gekrümmte Bauteile in Umfangsrichtung [siehe Bild 3.4 a)] lautet die Vereinbarung:

- Koordinatenachse in Umfangsrichtung (gekrümmt) θ ;
- Radialachse (für Biegung in tangentialer Vertikalebene) r ;
- Index für Umfangsbiegung θ ;
- Index für Längsbiegung x .

ANMERKUNG Ein Ring in Umfangsrichtung unter einem Biegemoment m_θ ist einer Biegebeanspruchung um seine vertikale Achse x ausgesetzt, welche der Biegebeanspruchung in Umfangsrichtung des Zylinders (m_θ) entspricht. Das Flächenträgheitsmoment dieses Rings wird als I_θ definiert, wenn der Ring Biegemomenten (m_r) um seine Radialachse r ausgesetzt ist, wenn er entweder als Ringträger oder Ringbalken wirkt oder radialen Kräften ausgesetzt ist, die exzentrisch zu seinem Schwerpunkt einwirken. Diese Biegemomente verursachen auch Spannungen σ_θ und $\tau_{r\theta}$ im Ring. Das Flächenträgheitsmoment dieses Rings wird als I_r definiert.

(4) Für an einen Kasten angeschlossene gerade Bauteile in Umfangsrichtung lautet die Vereinbarung:

- Achse in Umfangsrichtung y ;
- nach außen gerichtete Achse x ;
- vertikale Achse z .

ANMERKUNG Eine an einen Kasten angeschlossene gerade Steife in Umfangsrichtung ist einer Biegebeanspruchung um ihre vertikale Achse z ausgesetzt, wenn die Biegebeanspruchung aus der Ebene der Kastenwand verläuft, wobei es sich um die übliche Bedingung handelt.

3.3.4 Vereinbarungen für Spannungsresultanten für kreisförmige und rechteckige Silos

(1) Die Vereinbarung für Indizes zur Angabe von Membrankräften lautet wie folgt:

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

Membranspannungsresultanten:

n_x	Membranspannungsresultante in Längsrichtung in einer Zylinderschale
n_ϕ	Membranspannungsresultante in Meridianrichtung in einer konischen oder kugelförmigen Schale
n_θ	Membranspannungsresultante in Umfangsrichtung in einer Schale
n_z	Membranspannungsresultante in Vertikalrichtung in einem rechteckigen Kasten
n_z	Membranspannungsresultante in Umfangsrichtung in einem rechteckigen Kasten
n_{yz} oder $n_{x\theta}$	Membranschubspannungsresultante

Membranspannungen:

σ_{mx}	Membranspannung in Längsrichtung in einer Zylinderschale
$\sigma_{m\phi}$	Membranspannung in Meridianrichtung einer konischen oder kugelförmigen Schale
$\sigma_{m\theta}$	Membranspannung in Umfangsrichtung in einer Schale
σ_{mz}	Membranspannung in Vertikalrichtung in einem rechteckigen Kasten
σ_{my}	Membranspannung in Umfangsrichtung in einem rechteckigen Kasten
τ_{myz} oder $\tau_{mx\theta}$	Membranschubspannung

(2) Die Vereinbarung für Indizes zur Angabe von Momenten lautet wie folgt: Der Index beschreibt die Richtung, in der das Moment Längsspannung erzeugt.

ANMERKUNG Diese Vereinbarung für Bleche und Schalen unterscheidet sich von derjenigen für Träger und Stützen nach EN 1993-1-1 und EN 1993-1-3. Das muss bei der Verwendung jener Dokumente in Zusammenhang mit diesen Regeln beachtet werden.

Biegespannungsresultanten:

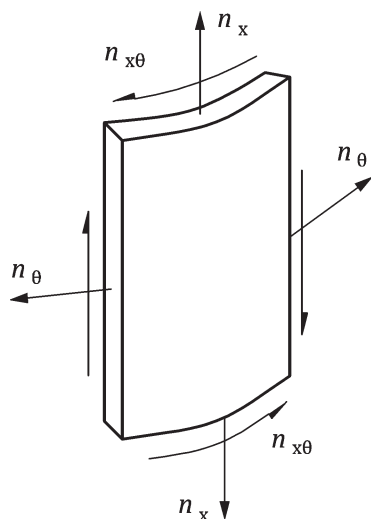
m_x	Biegemoment in Meridian- oder Längsrichtung je Längeneinheit der Breite
m_θ	Biegemoment in Umfangsrichtung je Längeneinheit der Breite in Schalen
m_y	Biegespannungsresultante in Umfangsrichtung in rechteckigen Kästen
m_{xy} oder $m_{x\theta}$	Drillschubmoment je Längeneinheit der Breite

Biegespannungen:

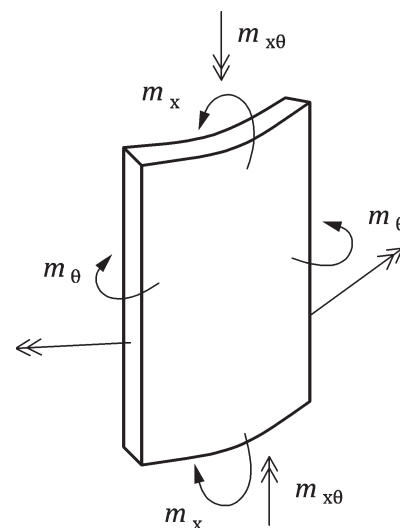
σ_{bx}	Biegespannung in Meridian- oder Längsrichtung
$\sigma_{b\theta}$	Biegespannung in Umfangsrichtung in Schalen
σ_{by}	Biegespannung in Umfangsrichtung in rechteckigen Kästen
τ_{bxy} oder $\tau_{bx\theta}$	Drillschubspannung

Innere und äußere Oberflächenspannungen:

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



a) Membranspannungsergebnisse in einer Zylinderschale



b) Biegespannungsergebnisse in einer Zylinderschale

Bild 3.6 — Spannungsergebnisse in der Siloschalenwand

4 Grundlagen der Bemessung

4.1 Grundlegende Anforderungen

(1) Die Bemessung von Silos muss entsprechend den allgemeinen Regeln nach EN 1990 und EN 1991 (alle Teile) sowie den jeweiligen Bestimmungen für die Bemessung von Stahlbauten nach EN 1993-1 (alle Teile) erfolgen.

(2) Zahlenwerte der spezifischen Einwirkungen auf Stahlsilos müssen EN 1991-4 entnommen werden.

(3) Nach diesem Dokument bemessene Silos müssen nach EN 1090-2 ausgeführt werden, wobei die Baustoffe und Bauprodukte entsprechend den Festlegungen nach den maßgebenden Teilen von EN 1993 oder nach den maßgebenden Baustoff- und Produktspezifikationen verwendet werden.

(4) Wenn der Beulwiderstand kritisch ist, sollten die in EN 1993-1-6 festgelegten Herstelltoleranzen angewendet werden.

(5) Bei der Bemessung des Silotragwerks sollten alle schalen- und plattenförmigen Tragwerksteile, einschließlich Steifen, Rippen, Ringen und Anschlussteilen, berücksichtigt werden.

(6) Die Tragkonstruktion sollte nicht als Teil des Silotragwerks behandelt werden. Die Grenzfläche zwischen dem Silo und seinen Auflagern sollte nach Bild 1.1 angesetzt werden. Ebenso sollten andere Konstruktionen, die ihrerseits vom Silo gestützt werden, als am Endpunkt von Silowand oder das Anschlussteil beginnend angesehen werden.

(7) Silos sollten so entworfen und bemessen werden, dass sie gegebenenfalls im Hinblick auf ihre vorgesehene Verwendung schadenstolerant sind.

(8) Besondere Anforderungen für spezielle Anwendungen können durch die zuständige Behörde festgelegt werden oder, sofern keine Festlegungen getroffen wurden, für ein bestimmtes Bauvorhaben zwischen den beteiligten Parteien vereinbart werden.

(8) Dieses Dokument ist für die Anwendung in Zusammenhang mit EN 1990, mit EN 1991-4, mit den anderen Teilen von EN 1991, mit EN 1993-1-6 und EN 1993-4-2, mit den anderen Teilen von EN 1993, mit EN 1992 sowie mit den anderen Teilen von EN 1994 bis EN 1999 vorgesehen, soweit für die Bemessung von Silos maßgebend. Die in diesen Dokumenten bereits abgedeckten Aspekte werden nicht wiederholt.

(9) Zahlenwerte für Teilsicherheitsbeiwerte und andere Zuverlässigkeitsparameter werden als Grundwerte empfohlen, die ein annehmbares Zuverlässigkeitsniveau bieten. Sie wurden unter der Annahme angemessener handwerklicher Ausführung der Arbeiten und eines geeigneten Qualitätsmanagements gewählt.

(10) Sicherheitsbeiwerte für Silos, die ‚Bauprodukte‘ sind (Werksfertigung), können von den zuständigen Behörden festgelegt werden. Bei Anwendung auf Silos, die ‚Bauprodukte‘ sind, sind die in 4.3 angegebenen Beiwerte nur Richtwerte. Ihre Angabe dient der Darstellung des geeigneten Niveaus, das für eine mit anderen Bemessungen verträgliche Zuverlässigkeit benötigt wird.

4.2 Einheiten

(1) Für die Anwendung dieser Norm werden SI-Einheiten nach ISO 1000 verwendet.

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

Maße 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
Dichte:	t/m ³	t/mm ³
Beschleunigung:	m/s ²	mm/s ²
Membranspannungsresultanten:	kN/m	N/mm
Biegespannungsresultanten:	kNm/m	Nmm/mm
Spannungen und Elastizitätsmoduln:	kPa	MPa (N/mm ²)

4.3 Klassifizierungen von Silos

4.3.1 Versagensfolgeklassen für Silos

(1) Zur Unterscheidung nach Zuverlässigkeit anhand der Versagensfolgeklasse siehe EN 1990:2023, A.4.

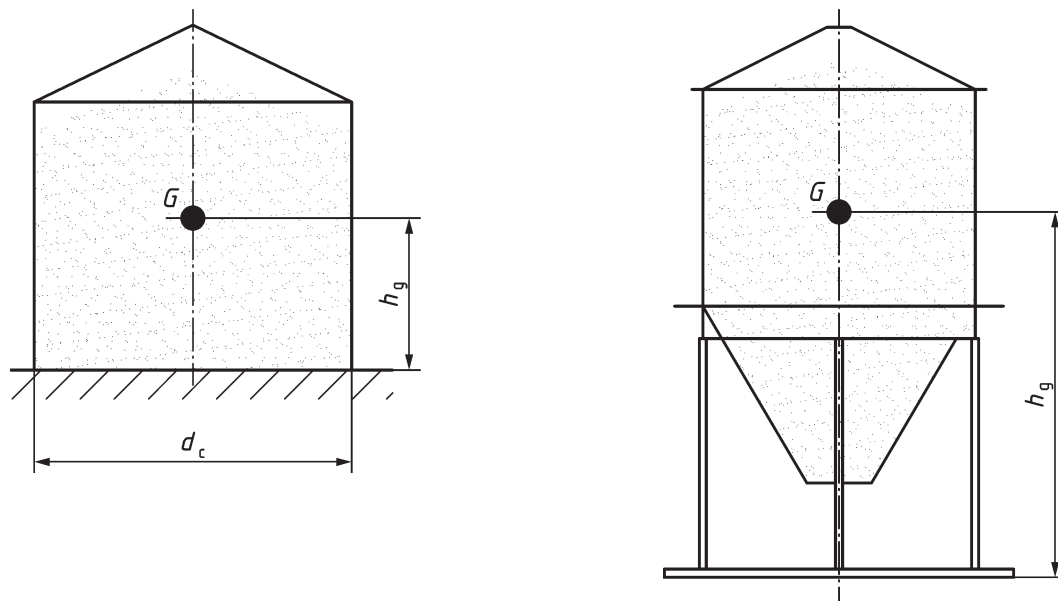
(2) Die Einstufung jedes Silos in eine Versagensfolgeklasse ist in EN 1990:2023, A.4, auf Grundlage der Versagensfolgen angegeben. Die Klassifizierung für Regeln der Tragwerksplanung kombiniert die Versagensfolgeklasse mit der Komplexitätsklasse des Tragwerks zu einer einzelnen Klassifizierung der Silogruppe.

4.3.2 Komplexitätsklassifizierung des Silotragwerks

(1) Die Komplexitätsklasse eines Silotragwerks muss durch die Bedingungen des einzelnen Silos bestimmt werden.

(2) Die Maße des Silos sollten als kritischer Bestandteil der Bewertung der Komplexitätsklasse des Tragwerks verwendet werden.

(3) Die Auswirkung der Silogröße auf die Wahl der Komplexitätsklasse des Tragwerks sollte entsprechend dem Parameter w in Verbindung mit der potenziellen Energie des gelagerten Schüttguts unter Verwendung von Gleichung (4.1) bestimmt werden.



a) Höhe des Massenmittelpunkts des gelagerten Schüttguts in einem bodengelagerten Silo

b) Höhe des Massenmittelpunkts des gelagerten Schüttguts in einem aufgeständerten Silo

Bild 4.1 — Maße für die Festlegung der Komplexitätsklassen des Tragwerks

(4) Die Auswirkung der Silogröße auf die Wahl der Komplexitätsklasse des Tragwerks sollte entsprechend dem nach Gleichung (4.1) berechneten Parameter w bestimmt werden:

$$w = \sqrt{h_g \times \min(h_g, d_c)} \quad (4.1)$$

Dabei ist

d_c das charakteristische Siloquerschnittsmaß (siehe prEN 1991-4:2024, Bild 1.1c);

h_g die Höhe des Massenmittelpunkts des gelagerten Schüttguts über dem Baugrund (siehe Bild 4.1).

ANMERKUNG 1 Der Parameter w bietet ein einfaches verständliches Einzelmaß, das in Zusammenhang mit der potenziellen Energie des gelagerten Schüttguts steht, obwohl das spezifische Gewicht (die Wichte) vernachlässigt wird.

ANMERKUNG 2 Quantifizierte Grenzwerte von Parameter w für jede Komplexitätsklasse von Silotragwerken sind in Tabelle 4.1 (NDP) angegeben, sofern der Nationale Anhang keine abweichenden quantifizierten Grenzwerte angibt.

Tabelle 4.1 (NDP) — Beschreibungen und quantifizierte Grenzwerte für Parameter w für Komplexitätsklassen für Silotragwerke

Komplexitätsklasse des Tragwerks	Beschreibungen und Werte für Parameter w
Komplexitätsklasse 3 des Tragwerks	a) Aufgeständerte Silos auf diskreten Auflagern $w > 20$ m b) Silos, die für Widerstand gegen unsymmetrische Lasten mit $w > 15$ m bemessen sind
Komplexitätsklasse 2 des Tragwerks	Silos mit $10 \text{ m} < w \leq 15 \text{ m}$
Komplexitätsklasse 1 des Tragwerks	Bodengelagerte Silos mit $2 \text{ m} < w \leq 10 \text{ m}$
Komplexitätsklasse 0 des Tragwerks	Silos mit $w \leq 2 \text{ m}$

4.3.3 Kategorisierung in Silogruppen

(1) In Abhängigkeit von der Silogruppe des Silos, der Tragwerksanordnung und der Anfälligkeit für verschiedene Versagensarten sollte bei der Bemessung von Silotragwerken nach unterschiedlichen Schärfeniveaus differenziert werden.

ANMERKUNG Der Nationale Anhang kann die Bedingungen zur Unterscheidung zwischen Silogruppen in Abhängigkeit von Standort, Größe, Tragwerksform und innen liegenden Tragwerken, gelagertem Schüttgut und Belastung sowie Betriebsart unter Berücksichtigung der Definitionen und Klassifizierungen nach EN 1990:2023, A.4, und EN 1991-4 festlegen. Er kann auch zusätzliche Informationen zu anderen Aspekten in Zusammenhang mit der Wahl der Silogruppe enthalten.

(2) Die Einstufung in eine Silogruppe sollte durch die Bedingungen des jeweiligen Silos bestimmt werden.

(3) In dieser Norm werden vier Silogruppen mit Anforderungen verwendet, welche Bemessungen mit im Wesentlichen vergleichbaren Notwendigkeiten hinsichtlich der Bemessungsbeurteilung ergeben sowie den Aufwand und die Verfahren berücksichtigen, die zur Sicherstellung der Sicherheit verschiedener Tragwerke erforderlich sind: Silogruppen 0, 1, 2 und 3 nach Tabelle 4.2.

ANMERKUNG 1 Die Einstufung eines Silos in eine Silogruppe ist in Tabelle 4.2 angegeben, sofern der Nationale Anhang keine abweichende Klassifizierung angibt.

ANMERKUNG 2 Silos, die Silogruppe 4 zugeordnet werden könnten, entsprechen Tragwerken der Versagensfolgeklasse 4 (EN 1990), die nicht in den Anwendungsbereich der Eurocodes fallen, da für ihre Bemessung zusätzliche Informationen erforderlich sind.

Tabelle 4.2 — Silogruppe (SG) (NDP) bestimmt durch die Komplexitätsklasse des Tragwerks (SCC) und die Versagensfolgeklasse (CC)

Komplexitätsklasse des Tragwerks (SCC)	Höher (CC3)	Normal (CC2)	Niedriger (CC1)	Niedrigste (CC0)
Höher (SCC3)	SG3	SG3	SG2	SG1
Normal (SCC2)	SG3	SG2	SG2	SG0
Niedriger (SCC1)	SG3	SG2	SG1	SG0
Niedrigste (SCC0)	SG2	SG2	SG1	SG0

(4) Die Tragwerksplanung sollte entsprechend den in diesem Teil angegebenen Bestimmungen für die maßgebende Silogruppe erfolgen.

(5) Die Bestimmungen für eine höhere als die erforderliche Silogruppe dürfen stets für die Bemessung angewendet werden.

(6) Die Bestimmungen für eine niedrigere als die festgelegte Silogruppe dürfen nicht für die Bemessung angewendet werden.

(7) Für Silos zur Lagerung von Materialien, die Schwingungen und Stöße verursachen können (Silobeben, Hupen, Siloschlagen: siehe prEN 1991-4:2024, D.3 und Tabelle C.2), sind spezielle Lastbeurteilungen und Bemessungsbetrachtungen erforderlich, die nicht in den Anwendungsbereich dieser Norm fallen.

(8) Eine höhere als die in Tabelle 4.2 festgelegte Silogruppe darf angewendet werden. Jeder Bestandteil der Verfahren für eine höhere Silogruppe darf, sofern zutreffend, angewendet werden.

ANMERKUNG Sonstige Anforderungen können im Nationalen Anhang unter Bezugnahme auf jede Silogruppe festgelegt werden. Diese beziehen sich auf:

- Qualifikations- und Erfahrungsstufen für die Planung (DQL, en: design qualification and experience level);
- Stufen zur Kontrolle der Planung (DCL, en: design check level), Bauausführungsklassen (EXC, en: execution classes);
- Überwachungsstufen (IL, en: inspection levels);
- Mindestvalidierung des Schüttgutverhaltens;
- Festlegung der Annahmen bezüglich Setzungsunterschieden;
- Mindestvalidierung der bei der Bemessung verwendeten Berechnungsmodelle.

(9) Silogruppe 3 sollte für alle Sonderlastfälle des Silos (SSLC, en: Special Silo Load Case) verwendet werden, die sich auf einen Schüttgutlastfall in Zusammenhang mit unsymmetrischen Bedingungen auf der Silowand nach EN 1991-4 beziehen.

(10) Für Silos der Silogruppen 0 und 1 dürfen vereinfachte Bestimmungen angewendet werden.

ANMERKUNG Geeignete Bestimmungen für Silos der Silogruppe 1 (und Silogruppe 0) sind in Anhang A angegeben.

4.4 Nachweisverfahren mit Teilsicherheitsbeiwerten

4.4.1.1 Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungen auf Silos

(1) Für ständige, vorübergehende und außergewöhnliche Bemessungssituationen müssen die Teilsicherheitsbeiwerte γ_F EN 1990:2023, A.4, entnommen werden.

(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 in Tabelle 4.4 angegebenen Werte der Teilsicherheitsbeiwerte nur Richtwerte. Ihre Angabe dient der Darstellung der geeigneten Stufen, die für eine mit anderen Bemessungen verträgliche Zuverlässigkeit benötigt werden.

4.4.1.2 Teilsicherheitsbeiwerte für Widerstände

(1) Für die versuchsgestützte Bestimmung von Trageigenschaften sollten die Anforderungen und Verfahrensweisen nach EN 1990 angewendet werden.

(2) Ermüdungsnachweise sollten prEN 1993-1-6:2023, Abschnitt 10, und EN 1993-1-9 entsprechen.

(3) Die Teilsicherheitsbeiwerte γ_{Mi} für verschiedene Grenzzustände müssen Tabelle 4.3 entnommen werden. Die jeweiligen Werte dieser Beiwerte werden entsprechend den Angaben in Tabelle 4.4 empfohlen.

Tabelle 4.3 — Teilsicherheitsbeiwerte für den Widerstand

Widerstand gegen Versagensart	Maßgebend γ
Widerstand geschweißter oder geschraubter Schalen- oder Kastenwandung im Grenzzustand des plastischen Versagens	γ_{M0}
Widerstand der Schalen- oder Kastenwandung gegen Stabilitätsverlust	γ_{M1}
Zugbruchwiderstand geschweißter oder geschraubter Schalen- oder Kastenwandung	γ_{M2}
Widerstand der Schalen- oder Kastenwandung gegen zyklisches Plastizieren	γ_{M4}
Widerstand von Verbindungen	γ_{M5}
Ermüdungswiderstand der Schalen- oder Kastenwandung	γ_{Mf}

ANMERKUNG 1 Die Zahlenwerte in Tabelle 4.4 sind für Silotragwerke angegeben, sofern der Nationale Anhang keine abweichenden Werte angibt.

Tabelle 4.4 (NDP) — Zahlenwerte für Teilsicherheitsbeiwerte für den Widerstand von Silotragwerken

$\gamma_{M0} = 1,00$	$\gamma_{M1} = 1,10$	$\gamma_{M2} = 1,25$
$\gamma_{M4} = 1,00$	γ_{M5} siehe EN 1993-1-8	γ_{Mf} siehe EN 1993-1-9

ANMERKUNG 2 Der erforderliche Teilsicherheitsbeiwert für Schalenbeulen γ_{M1} ist sehr stark von der Tragwerksform, dem Schlankheitsgrad der Schale, dem Lastfall und dem Knickfall abhängig, da die Imperfektionsempfindlichkeit und die daraus folgende Veränderlichkeit des Beulwiderstands wesentlich von diesen Faktoren abhängig sind. In Ermangelung zuverlässiger Daten, die für die praktische Bauausführung maßgebend sind, hat das Entwurfskomitee entschieden, den in der Vergangenheit anerkannten Wert von γ_{M1} beizubehalten.

(4) Bei Verwendung warmgewalzter Stahlquerschnitte als Teil eines Silotragwerks sollten die maßgebenden Teilsicherheitsbeiwerte für deren Widerstand (Beanspruchbarkeit) EN 1993-1-1 entnommen werden.

(5) Bei Verwendung kaltgeformter Stahlquerschnitte als Teil eines Silotragwerks sollten die maßgebenden Teilsicherheitsbeiwerte für deren Widerstand (Beanspruchbarkeit) EN 1993-1-3 entnommen werden.

4.4.2 Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit

(1) Wenn in den maßgebenden Bestimmungen bezüglich charakteristischer Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit vereinfachte Regeln angegeben werden, brauchen keine detaillierten Berechnungen mit Einwirkungskombinationen durchgeführt werden.

(2) Für alle Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit sollten die Werte von γ_{Mser} festgelegt werden.

ANMERKUNG Der Teilsicherheitsbeiwert für die Gebrauchstauglichkeit ist $\gamma_{Mser} = 1,0$, sofern der Nationale Anhang keinen abweichenden Wert angibt.

(3) Die in EN 1993-1-6 und EN 1993-1-7 festgelegten Grenzzustände sollten, sofern zutreffend, angewendet werden.

- Globale Stabilität und statisches Gleichgewicht als starrer Körper;
- LS1: Grenzzustand des plastischen Versagens;
- LS2: Grenzzustand des zyklischen Plastizierens;
- LS3: Grenzzustand des Beulens;
- LS4: Grenzzustand der Ermüdung.

4.5 Einwirkungen und Umweltauswirkungen

4.5.1 Allgemeines

(1) Die allgemeinen Anforderungen nach EN 1990:2023, Abschnitt 4 müssen eingehalten werden.

4.5.2 Windeinwirkung

(1) Für Festlegungen von Windeinwirkungen, die nicht in EN 1991-1-4 für die Bemessung von Silos in Einzel- oder Gruppenaufstellung enthalten sind, sollten geeignete zusätzliche Informationen vereinbart werden.

(2) Da diese großen leichten Tragwerke empfindlich gegenüber der genauen Verteilung des Winddrucks auf der Wand sind, dürfen die in EN 1991-1-4 angegebenen Winddaten 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.

4.5.3 Kombination von Drücken infolge Schüttgut mit anderen Einwirkungen

(1) Die Kombinationsbeiwerte für Einwirkungen in Silos nach EN 1990:2023, A.4, sollten verwendet werden.

ANMERKUNG Der Nationale Anhang kann abweichende Kombinationsbeiwerte für Einwirkungen festlegen.

4.6 Abmessungen

(1) Die in EN 1990:2023, Abschnitt 6, angegebenen Bestimmungen bezüglich Abmessungen müssen eingehalten werden.

(2) Die zusätzlichen spezifischen Angaben zu Schalentragwerken nach EN 1993-1-6 sollten ebenfalls angewendet werden.

(3) Die Schalenwanddicke sollte als Nenndicke angesetzt werden. Bei feuerverzinktem Stahlblech nach EN 10346 sollte die Nenndicke als der Nennwert der Kerndicke angesetzt werden, der sich als Differenz aus äußerer Nenndicke und Gesamt-Zinkschichtdicke auf beiden Oberflächen ergibt.

(4) Die Auswirkungen von Korrosion und Abrasion auf die Silowanddicke sollten nach 6.1.4 bei der Bemessung berücksichtigt werden.

4.7 Modellierung des Silos zur Bestimmung der Auswirkungen von Einwirkungen

(1) Die allgemeinen Anforderungen nach EN 1990 müssen eingehalten werden.

(2) Die in Abschnitt 13 dieses Dokuments für jedes Tragwerkselement festgelegten spezifischen Anforderungen für die Tragwerksberechnung in Bezug auf die Gebrauchstauglichkeit sollten eingehalten werden.

(3) Die in Abschnitt 6 bis Abschnitt 12 dieses Dokuments sowie genauer in EN 1993-1-6 und EN 1993-1-7 festgelegten spezifischen Anforderungen für die statische Berechnung in Bezug auf Grenzzustände der Tragfähigkeit sollten eingehalten werden.

4.8 Versuchsgestützte Bemessung

(1) Die allgemeinen Anforderungen nach EN 1990:2023, Anhang D, sollten eingehalten werden.

(2) Für Silos, die ‚Bauprodukte‘ sind (Werksfertigung) und Vollmaßstabsversuchen unterzogen werden, dürfen als ausreichend erachtete Kriterien für Bemessungszwecke verwendet werden.

4.9 Auswirkungen von Einwirkungen für Grenzzustandsnachweise

(1) Die allgemeinen Anforderungen nach EN 1990 müssen eingehalten werden.

4.10 Dauerhaftigkeit

(1) Die allgemeinen Anforderungen nach EN 1990:2023, 4.6, sollten eingehalten werden.

4.11 Feuerwiderstandsfähigkeit

(1) Die Bestimmungen nach EN 1993-1-2 für Feuerwiderstandsfähigkeit sollten eingehalten werden.

5 Werkstoffeigenschaften

5.1 Allgemeines

(1) Für Silos sollten nur schweißgeeignete Stähle eingesetzt werden, um bei Bedarf nachträgliche Änderungen zu ermöglichen.

(2) Für Silos mit kreisförmigem Grundriss sollten nur Stähle eingesetzt werden, die für das Kaltumformen zu gekrümmten Blechen oder gekrümmten Bauteilen geeignet sind.

(3) Die Werkstoffeigenschaften nach EN 1993-1-1 (siehe EN 1993-1-1:2022, Tabelle 5.1 und Tabelle 5.2) sowie nach EN 1993-1-3 (siehe prEN 1993-1-3:2023, Tabelle 5.2), sofern zutreffend, sollten als Nennwerte behandelt werden, die als charakteristische Werte in Bemessungsberechnungen einzusetzen sind, ausgenommen wie in 5.2 festgelegt.

(4) Weitere Werkstoffeigenschaften sind in den in EN 1993-1-1 festgelegten maßgebenden Bezugsnormen angegeben.

(5) Falls der Silo mit heißen Schüttgütern befüllt werden kann, sollten die Werte der Werkstoffeigenschaften entsprechend den zu erwartenden Höchsttemperaturen auf geeignete Weise verringert werden.

(6) Die Veränderlichkeit der Werkstoffeigenschaften von Baustahl bei Temperaturen über 100 °C sollte EN 1993-1-2 entnommen werden. Bei deren Anwendung darf die abgeminderte Fließspannung konservativ als die temperaturabhängige Proportionalitätsgrenze f_{p0} angesetzt werden. Die mechanischen Eigenschaften von Stahlsorten, die nicht durch EN 1993-1-2 abgedeckt sind, sollten auf zuverlässigen Informationen beruhen.

5.2 Baustähle

(1) Die in diesem Dokument angegebenen rechnerischen Bemessungsverfahren dürfen für Baustähle nach EN 1993-1-1 entsprechend den in EN 1993-1-1:2022, Tabelle 5.1 und Tabelle 5.2, aufgelisteten Europäischen und Internationalen Normen angewendet werden.

(2) Die mechanischen Eigenschaften von Baustählen nach Normenreihe EN 10025 oder Normenreihe EN 10149 sollten, sofern zutreffend, EN 1993-1-1 und EN 1993-1-3 entnommen werden.

(3) Korrosions- und Abrasionszuschläge sind in 6.1.4 angegeben.

(4) Für die durch dieses Dokument abgedeckten Stahlsorten sollte der Bemessungswert der Poissonzahl als $\nu = 0,3$ angesetzt werden. Der charakteristische Wert des Elastizitätsmoduls für Baustahl sollte als $E = 200\,000\text{ N/mm}^2$, entsprechend dem Wert für Stabilitätsberechnungen nach EN 1993-1-14 angesetzt werden.

ANMERKUNG Elastisches Beulen ist in Silotragwerken häufig kritisch, so dass ein konservativer Schätzwert des Elastizitätsmoduls erforderlich ist, daher wurde der Teilsicherheitsbeiwert für Beulen γ_M in allen Teilen von EN 1993 vereinheitlicht.

(5) Ist eine Stabilitätsberechnung Teil der Bemessung, sollten geeignete abgeminderte Eigenschaften entweder entsprechend der Betriebstemperatur (siehe EN 1993-1-2) oder entsprechend den höheren Spannungen der Spannungs-Dehnungs-Kurve (siehe EN 1993-1-6 und EN 1993-1-14) verwendet werden. Für Stabilitätsberechnungen sollte der abgeminderte Elastizitätsmodul E_{red} unter diesen Bedingungen verwendet werden.

5.3 Nichtrostende Stähle

(1) Die mechanischen Eigenschaften von nichtrostenden Stählen sollten entsprechend den Bestimmungen nach prEN 1993-1-6:2023, Abschnitt 5, bestimmt werden.

(2) Hinweise zur Auswahl von nichtrostenden Stählen im Hinblick auf die Korrosions- und Abrasionseinwirkungen des gelagerten Schüttguts dürfen geeigneten Quellen entnommen werden (siehe auch 6.1.4).

(3) Ist eine Beulberechnung Teil der Bemessung, sollten geeignete abgeminderte Eigenschaften verwendet werden (siehe EN 1993-1-6).

5.4 Spezielle legierte Stähle

(1) Für nicht genormte legierte Stähle sollten geeignete Werte für die maßgebenden mechanischen Eigenschaften gewählt werden. Die Eigenschaften von Stählen sollten den allgemeinen Anforderungen nach EN 1993-1-1 entsprechen.

ANMERKUNG Weitere Informationen zur Anwendung nicht genormter legierter Stähle können im Nationalen Anhang angegeben sein.

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

(3) Ist eine Beulberechnung Teil der Bemessung, sollten geeignete abgeminderte Eigenschaften verwendet werden (siehe EN 1993-1-6 und EN 1993-1-14).

5.5 Anforderungen an die Zähigkeit

(1) Die Bestimmungen dieser Norm gelten für Werkstoffe, welche den Bestimmungen zu Sprödbbruch nach EN 1993-1-4, EN 1993-1-10 und EN 1993-1-12 entsprechen.

6 Grundlagen für die statische Berechnung

6.1 Grenzzustände der Tragfähigkeit

6.1.1 Grundlagen

(1) Stahltragwerke und -tragwerksteile sollten so dimensioniert werden, dass die grundlegenden Anforderungen an die Bemessung nach Abschnitt 4 erfüllt sind.

6.1.2 Zu führende Nachweise

(2) Die Bemessung muss für jeden maßgebenden Grenzzustand die folgende Bedingung erfüllen:

$$S_d \leq R_d \quad (6.1)$$

Dabei sind

S und R die jeweils zutreffenden Parameter.

6.1.3 Ermüdung und zyklisches Plastizieren – Kurzzeitermüdung

(1) Für Teile des Tragwerks, die starker lokaler Biegebeanspruchung unterworfen sind, sollten gegebenenfalls Nachweise in den Grenzzuständen der Ermüdung und des zyklischen Plastizierens anhand der Verfahren nach EN 1993-1-6 bzw. EN 1993-1-7 geführt werden.

ANMERKUNG Der Begriff „starke lokale Biegebeanspruchung“ bezieht sich auf Stellen, an denen die lokale Biegespannung das 2-Fache der lokalen Membranspannung übersteigt.

(2) Die Anzahl der Zyklen für einen bestimmten Ermüdungslastfall sollte nach prEN 1991-4:2023, 5.2.3(6), bestimmt werden. Darüber hinaus sollten auch die Bedingungen nach prEN 1991-4:2023, 5.2.3(11), berücksichtigt werden.

(3) Die Anzahl der Zyklen entweder im Grenzzustand des zyklischen Plastizierens oder im Grenzzustand der Ermüdung ist in prEN 1993-1-6:2023, 6.3.2 und 6.3.4, festgelegt.

(4) Nachweise bezüglich des zyklischen Plastizierens oder der Ermüdung sind bei Silos der Silogruppen 0 und 1 nicht erforderlich.

6.1.4 Korrosions- und Abrasionszuschläge

(1) Bei der Bestimmung der effektiven Wanddicke für die Berechnung sollten die Auswirkungen infolge Abrasion der Silowände durch das Schüttgut über die Nutzungsdauer des Tragwerks berücksichtigt werden. Schüttgüter, die potenziell zu Abrasion von Stahl führen, sind in prEN 1991-4:2024, Tabelle C.2, angegeben.

(2) Sind keine spezifischen Informationen verfügbar, sollte für alle Bereiche, die während des Entleerens in Kontakt mit rutschendem Schüttgut stehen können, ein Waddickenverlust von Δt_a infolge Abrasion angenommen werden.

(3) Handelt es sich bei dem gelagerten Schüttgut um Getreidekörner, darf der Wert von Δt_a mit $\Delta t_a = 0$ angesetzt werden.

(4) Bei gelagerten Schüttgütern, die nach EN 1991-4 potenziell zu Abrasion führen, darf der Wert von Δt_a mit $\Delta t_a = 2$ mm angesetzt werden.

ANMERKUNG Alternative Empfehlungen für die Abrasion, die durch unterschiedliche gelagerte Schüttgüter in Kontakt mit unterschiedlichen Oberflächen über unterschiedliche Dauer verursacht wird, können der Fachliteratur entnommen werden.

(5) Bei der Bestimmung der effektiven Wanddicke für die Berechnung sollten die Auswirkungen infolge Korrosion der Wand in Kontakt mit dem Schüttgut über die Nutzungsdauer des Tragwerks berücksichtigt werden.

ANMERKUNG Empfehlungen für die Korrosion, die durch unterschiedliche gelagerte Schüttgüter in Kontakt mit unterschiedlichen Oberflächen über unterschiedliche Dauer verursacht wird, können der Fachliteratur entnommen werden.

(6) Für die Festlegung der jeweiligen Werte für Korrosions- und Abrasionsverluste sollten der vorgesehene Verwendungszweck und die Art der zu lagernden Schüttgüter berücksichtigt werden. Diese Werte sollten in der Ausführungsspezifikation angegeben werden.

ANMERKUNG 1 Im Nationalen Anhang können angemessene Werte für die Korrosions- und Abrasionsverluste für bestimmte Schüttgüter in Reibungskontakt mit bestimmten Silowandwerkstoffen angegeben werden, welche die Fließart und das Abrasions- oder Korrosionspotenzial des Schüttguts nach EN 1991-4 berücksichtigen.

ANMERKUNG 2 Geeignete Inspektionsmaßnahmen sind erforderlich, um die Übereinstimmung mit den Voraussetzungen für die Bemessung während der Nutzung sicherzustellen.

6.1.5 Berücksichtigung von Temperatureinflüssen

(1) Bei Lagerung von heißen Schüttgütern im Silo sollten die Auswirkungen von Temperaturunterschieden zwischen Tragwerksteilen in Kontakt mit dem heißen Material und bereits abgekühlten Tragwerksteilen bei der Bestimmung der Spannungsverteilung in der Wand berücksichtigt werden.

6.2 Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit

(1) Verformungen sollten begrenzt werden, um Folgendes zu vermeiden:

- Verformungssituationen nach Theorie II. Ordnung, wenn diese nicht bei der Berechnung berücksichtigt werden;
- Situationen in Zusammenhang mit dem Anbringen von bzw. der Nähe zu benachbarten Tragwerken (z. B. Förderanlagen, Rutschen, Förderbänder, Rohrleitungen usw.);
- für das jeweilige Bauvorhaben von der zuständigen Behörde oder vom Bauherren geforderte Grenzen.

(2) Wenn zuständige Behörden oder Bauherren keine Grenzen festlegen, siehe Abschnitt 13.

6.3 Berechnung des Schalensilotragwerks

6.3.1 Modellierung der Tragwerksschale

(1) Die Tragwerksschale sollte entsprechend den Anforderungen nach EN 1993-1-6 modelliert werden. Diese dürfen bei Einhaltung der nachstehenden Bestimmungen als erfüllt angesehen werden.

(2) Die Modellierung der Tragwerksschale sollte alle Steifen, großen Öffnungen und Anschlussteile einschließen.

(3) Die Bemessung sollte sicherstellen, dass die angenommenen Randbedingungen bei der Ausführung erreichbar sind.

(4) Eine Schale aus Profilblech (vertikal oder horizontal profiliert) darf als orthotrope gleichförmige Schale behandelt werden, sofern die vollständige Wellenlänge der Profilierung weniger als $0,5\sqrt{rt}$ beträgt, wobei t die lokale Blechdicke ist.

6.3.2 Berechnungsverfahren

6.3.2.1 Allgemeines

(1) Die Berechnung der Siloschale sollte entsprechend den Anforderungen nach EN 1993-1-6 durchgeführt werden.

(2) Eine für eine höhere Silogruppe als die des betreffenden Silos festgelegte Berechnungsart darf stets angewendet werden.

(3) Ist der Silo einer beliebigen unsymmetrischen Belastung aus Schüttgut ausgesetzt (Teilflächenlasten, exzentrisches Entleeren, unsymmetrisches Befüllen usw., siehe EN 1991-4), sollte das Tragwerksmodell für die Erfassung der Übertragung von Membranschubkräften innerhalb der Silowand sowie zwischen Silowand und Ringen bemessen sein.

ANMERKUNG Die Schubübertragung zwischen Teilen der Wand und den Ringen ist besonders wichtig bei Ausführungen mit Schrauben oder anderen diskreten Verbindungsmitteln (z. B. zwischen Silowand und Trichter, zwischen Zylinderwand und Vertikalsteifen oder Auflagern sowie zwischen verschiedenen Schüssen im Zylinder).

(4) Wenn ein Ringträger zur Umverteilung der Silowandkräfte in diskrete Auflager eingesetzt wird und Schrauben oder diskrete Verbindungsmittel zum Verbinden der Bauelemente verwendet werden, sollte die Schubübertragung zwischen den Teilen des Rings infolge Schalen- und Ringträgerbiegung bestimmt werden.

(5) Der Beitrag der Steifigkeit des gelagerten Schüttguts zum Widerstand gegen Wandverformungen oder zur Erhöhung des Beulwiderstands des Schalentragwerks sollte nur dann berücksichtigt werden, wenn eine rationale Berechnung erfolgt und eindeutige Beweise dafür vorliegen, dass sich das an der Wand anliegende Schüttgut an der festgelegten Stelle während der Entleerung nicht bewegt. In derartigen Situationen sollten die maßgebenden Angaben zu Fließprofil, Druck im Schüttgut und Eigenschaften des spezifischen gelagerten Schüttguts nach EN 1991-4 bestimmt werden.

(6) Liegen Massenflussbedingungen in einem Silo mit profilierter Wandung vor (siehe EN 1991-4), sollte das Schüttgut, das nur innerhalb der Profilierungen unbeweglich gehalten wird, bei der Bewertung des Beitrags von Innendruck zum Beulwiderstand nicht als unbeweglich angesehen werden [siehe 7.9.4.3(11)].

6.3.2.2 Silogruppe 3

(1) Für Silos der Silogruppe 3 sollten die Schnittgrößen mittels validierter numerischer Berechnung (z. B. mittels rechnergestützter Schalenberechnung wie in EN 1993-1-6 festgelegt) bestimmt werden. Die Festigkeiten gegen plastisches Versagen in Primärspannungszuständen dürfen in Verbindung mit dem Grenzzustand des plastischen Versagens nach EN 1993-1-6 verwendet werden.

6.3.2.3 Silogruppe 2

(1) Für Silos der Silogruppe 2 unter rotationssymmetrischen Einwirkungen und Lagerungsbedingungen darf alternativ eines der beiden folgenden Berechnungsverfahren angewendet werden:

- Die Primärspannungen dürfen mit Hilfe der Membrantheorie bestimmt werden. Alle lokalen Biegeauswirkungen dürfen unter Verwendung von Gleichungen auf Grundlage der elastischen Biegetheorie beschrieben werden (siehe EN 1993-1-6 zu Definitionen);
- Eine validierte numerische Berechnung (z. B. rechnergestützte Schalenberechnung wie in EN 1993-1-6 festgelegt) darf durchgeführt werden.

(2) Kann die Bemessungsbelastung infolge gelagerter Schüttgüter nicht als rotationssymmetrisch betrachtet werden, sollte eine validierte numerische Berechnung verwendet werden.

(3) Ungeachtet Absatz (2) dürfen die Primärspannungen mit Hilfe der Membrantheorie bestimmt werden, wenn die Belastung um die Schale stetig veränderlich ist und nur globale Biegung erzeugt (d. h. in Form der 1. Harmonischen des Umfangs).

(4) Für Berechnungen von Einwirkungen infolge Windlast und/oder Fundamentsetzungen und/oder stetig veränderlichen Teilflächenlasten (siehe EN 1991-4 zu dünnwandigen Silos) darf die Halbmembrantheorie oder die Membrantheorie bezüglich Schalen angewendet werden.

(5) Bei membrantheoretischer Bestimmung der Primärspannungen in der Schale gilt:

- a) Für diskrete Ringe, die mit einer isotropen Zylindersiloschale unter Innendruck verbunden sind, darf eine effektive Querschnittsfläche angenommen werden, welche eine Schalenlänge oberhalb und unterhalb des Rings von $0,78\sqrt{rt}$ einschließt, es sei denn, der Ring befindet sich an einer Abzweigung;
- b) Die Auswirkung lokaler Biegespannungen an Diskontinuitäten der Schalenoberfläche und Auflager sollte gesondert bewertet werden.

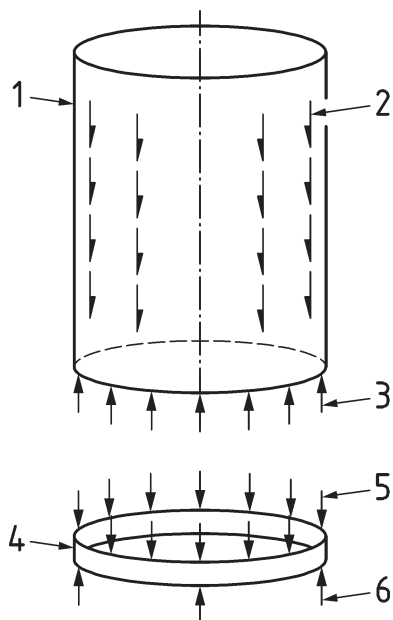
(6) Bei isotropen Schalenwänden mit diskreten Vertikalsteifen in Abständen nicht größer als $5\sqrt{rt}$ dürfen die Spannungen in den Steifen und der Schalenwand berechnet werden, indem die Steifen als verschmiert an der Schalenwand behandelt werden.

(7) Bei verschmierten Steifen an einer isotropen Schale sollte die Spannung in der Steife unter angemessener Berücksichtigung der Kompatibilität zwischen Steife und Wand sowie unter Einbeziehung der Auswirkung von Wandmembranspannung rechtwinklig zur Steifenrichtung bestimmt werden (siehe 7.8.3).

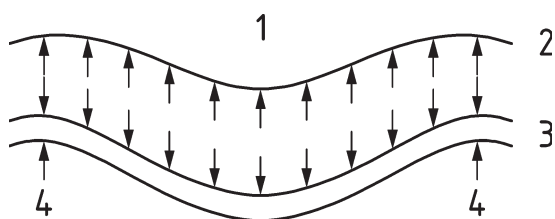
ANMERKUNG Innendruck verursacht Umfangsspannungen, was zu Vertikaldehnungen (Verkürzung) der Schalenwand führt, dies gilt jedoch nicht für Vertikalsteifen. Kompatibilität zwischen Schale und Steifen erhöht dann den Normaldruck in Steifen.

(8) Bei Anordnung eines Ringträgers über diskreten Auflagern dürfen die Primärspannungen mit Hilfe der Membrantheorie bestimmt werden, dabei sollten jedoch die Anforderungen nach 7.8 und 10.1.4 bezüglich der Bewertung zusätzlicher nicht rotationssymmetrischer Primärspannungen sorgfältig erfüllt werden.

(9) Bei Anordnung eines Ringträgers über diskreten Auflagern sollte die Verformungskompatibilität zwischen Ring und anschließenden Schalensegmenten beachtet werden, siehe Bild 6.1. Das betrifft besonders die Kompatibilität der Längsverformungen, da die eingetragenen Spannungen weit hinauf in die Schale wirken. Bei Verwendung eines solchen Ringträgers sollte die Exzentrizität von dessen Schwerpunkt und Schubmittelpunkt bezogen auf die Schalenwand und die Auflagermittellinie berücksichtigt werden, siehe 10.1.4 und 10.2.3.



a) Traditionelles Bemessungsmodell für stützengelagerte Silos



b) Verformungsbedingung für den Zylinder infolge Kompatibilität mit Balkenverformung

Legende

- | | |
|---|---|
| a) | b) |
| 1 Zylinderschale | 1 Schalenwand |
| 2 rotationssymmetrische Wandbelastung und Bodendrücke | 2 vertikale Durchbiegungen in der Ebene |
| 3 gleichmäßige Lagerung des Zylinders durch den Ringträger | 3 Ringträgerform unter Durchbiegung |
| 4 Ringträger (verschiedene Querschnittsgeometrien) | 4 diskretes Auflager |
| 5 gleichmäßige Belastung des Ringträgers durch den Zylinder | |
| 6 diskrete lokale Auflager | |

Bild 6.1 — Längsverformungskompatibilität zwischen Ringträger und Schale

6.3.2.4 Silogruppe 1

(1) Für Silos der Silogruppe 1 dürfen die Primärspannungen anhand der Membrantheorie unter Verwendung von Faktoren und vereinfachten Gleichungen zur Beschreibung der Auswirkungen lokaler Biegung und unsymmetrischer Einwirkungen bestimmt werden.

6.3.2.5 Silogruppe 0

(1) Silos der Silogruppe 0 dürfen entsprechend den Bestimmungen für Silogruppe 1 bemessen werden, liegen jedoch streng außerhalb des Anwendungsbereichs dieses Dokuments.

6.3.3 Geometrische Imperfektionen

- (1) Geometrische Imperfektionen in der Schale sollten den in EN 1993-1-6 festgelegten Toleranzanforderungen entsprechen.
- (2) Für Silos der Silogruppen 2 und 3 sollten die geometrischen Imperfektionen weitestmöglich nach der Bauausführung gemessen werden, um das Erreichen der angenommenen Herstelltoleranz-Qualitätsklasse sicherzustellen.
- (3) Die explizite Berücksichtigung geometrischer Imperfektionen in der Schale bei der Bestimmung der Schnittgrößen ist nicht erforderlich, sofern nicht eine GNIA- oder GMNIA-Berechnung nach EN 1993-1-6 durchgeführt wird.

6.4 Berechnung des Kastentragwerks eines Silos aus Platteneinheiten

6.4.1 Modellierung des Kastentragwerks aus einer Platteneinheit

- (1) Die Modellierung des Kastentragwerks sollte entsprechend den Anforderungen nach EN 1993-1-7 erfolgen, die jedoch bei Einhaltung der nachstehenden Bestimmungen als erfüllt angesehen werden dürfen.
- (2) Die Modellierung des Kastentragwerks sollte alle Steifen, großen Öffnungen und Anschlusssteile einschließen.
- (3) Die Bemessung sollte sicherstellen, dass die angenommenen Randbedingungen eingehalten werden.
- (4) Die Verbindungen zwischen den Kastensegmenten sollten den Modellierungsannahmen hinsichtlich Festigkeit und Steifigkeit entsprechen.
- (5) Jedes Wandfeld des Kastens darf als einzelnes Plattensegment behandelt werden, sofern die beiden folgenden Bedingungen eingehalten werden:
- a) die von Nachbarfeldern in jedes Wandfeld eingeleiteten Schnittgrößen werden erfasst;
 - b) die Biegesteifigkeit benachbarter Felder wird erfasst.
- (6) Bei Verwendung profilierter Wandfelder dürfen die Biegespannungen in jedem Wandfeld oder Plattensegment berechnet werden, indem die Platte als unter einseitiger Biegung einwirkend behandelt wird.
- (7) Bei isotropen Plattenwandfeldern mit diskreten Horizontalsteifen in Abständen nicht größer als $30t$ dürfen die Spannungen in den Steifen und der Kastenwand berechnet werden, indem die Steifen als verschmiert an der Schalenwand behandelt werden, um eine orthotrope Platte zu erhalten.

ANMERKUNG Zu weiteren Informationen siehe EN 1993-1-7.

- (8) Bei Annahme einer verschmierten Steife sollte die Spannung in der Steife unter angemessener Berücksichtigung der Exzentrizität zwischen Steife und Wandblech sowie der Wandspannung rechtwinklig zur Steifenachse bestimmt werden.
- (9) Die mittragende Breite des Wandblechs zu beiden Seiten einer Steife darf als $15 \varepsilon_t$ angesetzt werden, wobei $\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$ und f_y in N/mm² angegeben werden. Zu weiterführenden Informationen siehe EN 1993-1-5 und EN 1993-1-7.

ANMERKUNG Der einfache Wert von $15 \varepsilon_t$ wird als sicherer Wert gewählt.

6.4.2 Geometrische Imperfektionen

(1) Sind geometrische Imperfektionen in den Kastenwänden maßgebend für Grenzzustände der Tragfähigkeit bei Beulen, sollten ihre Amplituden den in EN 1993-1-7 festgelegten Grenzen entsprechen.

(2) Bei der Bestimmung der Schnittgrößen brauchen die geometrischen Imperfektionen der Kastenwände nicht explizit berücksichtigt zu werden.

6.4.3 Berechnungsverfahren

(1) Die Schnittgrößen in den Plattensegmenten der Kastenwände dürfen nach einem der folgenden Verfahren bestimmt werden:

- a) statisches Gleichgewicht für Membrankräfte und Balkentheorie für Biegebeanspruchung (siehe prEN 1993-1-7:2023, Anhang A);
- b) eine Berechnung auf Grundlage linearer Plattenbiegungs- und -dehnungstheorie (siehe prEN 1993-1-7:2023, Anhang B);
- c) eine Berechnung auf Grundlage nichtlinearer Plattenbiegungs- und -dehnungstheorie.

(2) Für Silos der Silogruppe 1 darf Verfahren a) nach (1) angewendet werden.

(3) Für Silos der Silogruppe 2 mit der Bemessungsbedingung einer in Bezug auf jedes Plattensegment symmetrischen Belastung darf Verfahren a) nach (1) angewendet werden.

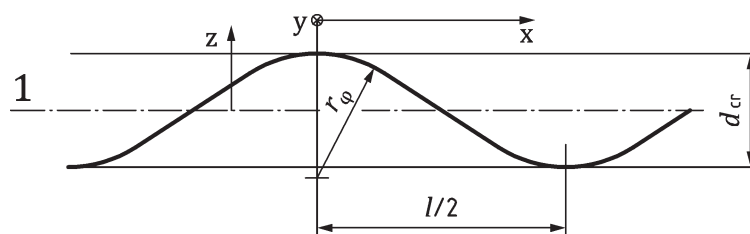
(4) Für Silos der Silogruppe 2 mit der Bemessungsbedingung einer unsymmetrischen Belastung sollte entweder Verfahren b) oder Verfahren c) nach (1) angewendet werden.

(5) Bei Silos der Silogruppe 3 sollten die Schnittgrößen entweder nach Verfahren b) oder Verfahren c) nach (1) (wie in EN 1993-1-7 festgelegt) bestimmt werden.

6.5 Berechnungsansatz für Profilbleche

(1) Profilbleche als Teile des Silotragwerks dürfen bei der Berechnung als äquivalente gleichförmige orthotrope Wände behandelt werden.

(2) Die folgenden Eigenschaften dürfen bei Spannungs- und Beulberechnungen des Tragwerks verwendet werden, sofern das Profilblech entweder ein Bogen-Tangenten-Profil oder ein Sinusprofil (Wellblech) aufweist. Bei Verwendung anderer Profilierungen sollten die jeweiligen Eigenschaften entsprechend den mechanischen Grundsätzen berechnet werden.



Legende

- 1 effektive Mittelfläche der profilierten Schalenwand

Bild 6.2 — Profilierung und geometrische Parameter

(3) Die Eigenschaften des Profilblechs 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 (Wellentäler und -berge). Die Profilgeometrie sollte, unabhängig von der tatsächlichen Wellenprofilierung, durch folgende Parameter beschrieben werden, siehe Bild 6.2:

Dabei ist

d_{cr} das Maß zwischen zwei Wellenbergen in Querrichtung;

L die Wellenlänge (Steigung) der Profilierung;

r_{ϕ} der lokale Krümmungsradius an Wellenberg bzw. -tal.

(4) Die äquivalenten Eigenschaften des Blechs in jeder der beiden Hauptrichtungen dürfen als unabhängig behandelt werden, so dass die Dehnungen in einer Richtung keine Spannungen in der rechtwinkligen Richtung (d. h. keine Poisson-Effekte) erzeugen.

(5) Die äquivalenten Membraneigenschaften (Dehnsteifigkeiten) dürfen wie folgt angesetzt werden:

$$C_1 = Et_1 \quad (6.2)$$

$$C_2 = Et_2 \quad (6.3)$$

$$C_{12} = Gt_{12} \quad (6.4)$$

Dabei ist

t_1 die äquivalente Dicke für die verschmierte Membransteifigkeit parallel zur Profilierung, angegeben als:

$$t_1 = t \left(1 + \frac{\pi^2 d_{cr}^2}{4L^2} \right) \quad (6.5)$$

t_2 die äquivalente Dicke für die verschmierte Membransteifigkeit rechtwinklig zur Profilierung, angegeben als:

$$t_2 = \frac{2t^3}{3d_{cr}^2} \quad (6.6)$$

t_{12} die äquivalente Dicke für die verschmierte Membranschubsteifigkeit, angegeben als:

$$t_{12} = \frac{t}{\left(1 + \frac{\pi^2 d_{cr}^2}{4L^2} \right)} \quad (6.7)$$

ANMERKUNG Die Länge der Oberfläche einer Profilierungswelle ist gegeben durch $l(t_1/t)$.

(6) Die äquivalenten Biegeeigenschaften (Biegesteifigkeiten) werden in Bezug auf die Biegesteifigkeit für Momente festgelegt, die Biegespannungen in dieser Richtung erzeugen, und dürfen wie folgt angesetzt werden:

$$D_1 = EI_1 \quad (6.8)$$

$$D_2 = EI_2 \quad (6.9)$$

$$D_{12} = GI_{12} \quad (6.10)$$

Dabei ist

- I_1 das äquivalente Flächenträgheitsmoment je Längeneinheit der Breite für die verschmierte Biegesteifigkeit parallel zur Profilierung. Bei den in (2) beschriebenen Profilierungen darf der Wert wie folgt angesetzt werden:

$$I_1 = \frac{t d_{cr}^2}{8} \left(1 + \frac{\pi^2 d_{cr}^2}{8 l^2} \right) \quad (6.11)$$

- I_2 das äquivalente Flächenträgheitsmoment je Längeneinheit der Breite für die verschmierte Biegesteifigkeit rechtwinklig zur Profilierung, angegeben als:

$$I_2 = \frac{t^3}{12(1 - \nu^2)} \frac{1}{\left(1 + \frac{\pi^2 d_{cr}^2}{4 l^2} \right)} \quad (6.12)$$

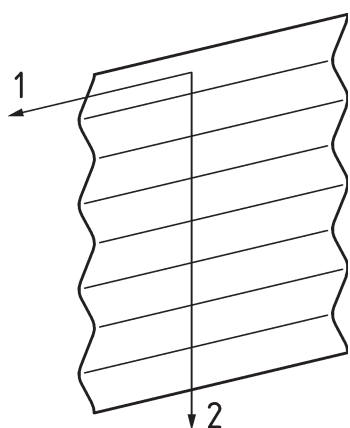
- I_{12} das äquivalente Flächenträgheitsmoment je Längeneinheit der Breite für die verschmierte Drillsteifigkeit:

$$I_{12} = \frac{t^3}{12} \left(1 + \frac{\pi^2 d_{cr}^2}{4 l^2} \right) \quad (6.13)$$

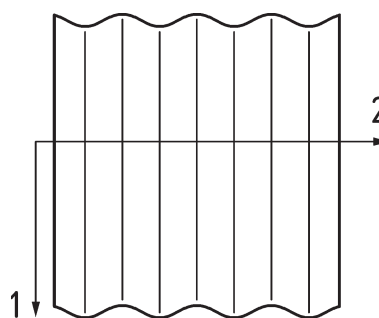
ANMERKUNG Die Vereinbarung für Biegemomente in Platten bezieht sich auf die Krümmungsrichtung der Platte und ist damit der für Balken geltenden Vereinbarung entgegengesetzt. Biegung parallel zur Profilierung aktiviert die Biegesteifigkeit der Profilierung, verursacht Spannungen parallel zur Profilierung und ist der Hauptgrund für die Verwendung von Profilblechen in der Bauausführung.

(7) In kreisförmigen Silos sind die Profilierungen üblicherweise in Umfangsrichtung verlaufend angeordnet. Bei dieser Anordnung sollten die Richtungen 1 und 2 in den vorstehenden Gleichungen als Umfangsrichtung θ bzw. Vertikalrichtung x angesetzt werden, siehe Bild 3.1a und Bild 6.3a. Bei der weniger gebräuchlichen Anordnung mit vertikal verlaufenden Profilierungen sollten die Richtungen 1 und 2 in den vorstehenden Gleichungen als Vertikalrichtung x bzw. Umfangsrichtung θ angesetzt werden, siehe Bild 3.1a und Bild 6.3b.

ANMERKUNG Für kreisförmige Silos liefern die vorstehenden Gleichungen Werte für C_x , C_θ , $C_{x\theta}$, D_x , D_θ und $D_{x\theta}$. Diese Werte können bei der Behandlung profilierter Zylinderwände als orthotrope Wände verwendet werden (siehe 7.9).



a) Horizontal verlaufende Profilierungen



b) Vertikal verlaufende Profilierungen

Bild 6.3 — Ausrichtungen von Profilblech (Wellblech) und Silowand

(8) Die Schubeigenschaften sollten als unabhängig von der Profilierungsausrichtung angenommen werden. Der Wert von G darf als $E/\{2(1+\nu)\} = 80\,800\text{ MPa}$ angesetzt werden.

(9) In rechteckigen Silos sind die Profilierungen üblicherweise horizontal verlaufend angeordnet. Bei dieser Anordnung sollten die Richtungen 1 und 2 in den vorstehenden Gleichungen als Horizontalrichtung y bzw. Vertikalrichtung z angesetzt werden, siehe Bild 3.2a und Bild 6.3a. Bei der weniger gebräuchlichen Anordnung mit vertikal verlaufenden Profilierungen sollten die Richtungen 1 und 2 in den vorstehenden Gleichungen im tatsächlichen Tragwerk vertauscht werden und als Vertikalrichtung z bzw. Horizontalrichtung y angesetzt werden, siehe Bild 3.2a und Bild 6.3b.

7 Bemessung von Zylinderschalenwänden im Grenzzustand der Tragfähigkeit

7.1 Grundlagen

7.1.1 Allgemeines

(1) Zylindrische Stahlsilowände sollten so dimensioniert werden, dass die grundlegenden Bemessungsanforderungen für die Grenzzustände der Tragfähigkeit nach 7.1.2 erfüllt sind.

(2) Die Sicherheitsbeurteilung isotroper Zylinderschalenwände sollte entsprechend den Bestimmungen nach EN 1993-1-6 erfolgen, die bei Einhaltung der Bestimmungen nach diesem Abschnitt als erfüllt angesehen werden dürfen.

(3) Bei Silos mit entweder profilierten oder versteiften Wänden sollten, sofern zutreffend, die Bestimmungen nach 7.4, 7.5 oder 7.6 angewendet werden.

7.1.2 Bemessung der Silowand

(1) Für die zylindrische Silowand sollte ein Nachweis in den in EN 1993-1-6 festgelegten Grenzzuständen bezüglich Folgendem geführt werden:

— globale Stabilität und statisches Gleichgewicht.

LS1: Grenzzustand des plastischen Versagens, einschließlich:

— Widerstand gegen Bersten oder Zugbruch oder plastisches Versagen (übermäßiges Fließen) unter Innendrücken oder sonstigen Einwirkungen;

— Widerstand von Anschlüssen (Verbindungen).

LS2: Grenzzustand des zyklischen Plastizierens, einschließlich:

— Widerstand gegen lokales Biegefließen;

— lokale Auswirkungen.

LS3: Grenzzustand des Beulens, einschließlich:

— Beulwiderstand unter Normaldruckbeanspruchung (Meridiandruckbeanspruchung);

— Beulwiderstand unter Außendruck (Windlast oder Teilvakuum);

— Beulwiderstand unter Schubbeanspruchung infolge unsymmetrischer Einwirkungen;

— Beulwiderstand unter Schubbeanspruchung im Bereich eingebundener Stützen;

- Widerstand gegen lokales Versagen über Auflagern;
- Widerstand gegen lokales Krüppeln im Bereich von Öffnungen;
- Widerstand gegen lokales Beulen unter unsymmetrischen Einwirkungen.

LS4: Grenzzustand der Ermüdung, einschließlich:

- Widerstand gegen Langzeitermüdungsversagen an Stellen unter häufig wiederkehrenden hochelastischen Spannungen.

(2) Die Schalenwand sollte den Bestimmungen nach EN 1993-1-6 entsprechen, sofern nicht 7.3 bis 7.6 Bedingungen enthalten, bei deren Einhaltung die Bestimmungen jener Norm als erfüllt angesehen werden.

(3) Für Silos der Silogruppen 0 und 1 dürfen die Grenzzustände des zyklischen Plastizierens und der Ermüdung vernachlässigt werden.

7.2 Unterscheidung zwischen verschiedenen Formen zylindrischer Schalen

(1) Die Widerstände für eine aus flach gewalzten Stahlblechen gefertigte Schalenwand – als ‚isotrop‘ bezeichnet (siehe Bild 7.1a) – sollten nach 7.3 bestimmt werden.

(2) Die Widerstände für eine isotrope Schalenwand mit Überlappstößen, in denen zusammentreffende Blechsegmente überlappend miteinander verbunden werden – als ‚überlappt gestoßen‘ bezeichnet (siehe Bild 7.1b) – sollten nach 7.3.6 bestimmt werden.

(3) Die Widerstände für eine isotrope Schalenwand mit an der Außenfläche angebrachten Vertikalsteifen – als ‚außen versteift‘ bezeichnet (siehe Bild 7.1c) – sollten unabhängig vom Steifenabstand nach 7.4 bestimmt werden.

ANMERKUNG Die Verwendung von innen liegenden Steifen in Silos wird nicht empfohlen, da die Kontaktfläche mit dem gelagerten Schüttgut dadurch vergrößert wird, wodurch die Vertikalkräfte in der Wand erhöht werden und das Fangen gelagerten Schüttguts ermöglicht wird, und da innen liegende Steifen zu einem geringeren Beulwiderstand in einer Zylinderschale unter Normaldruckbeanspruchung führen als außen liegende Steifen.

(4) Die Widerstände für eine Schalenwand aus profilierten Stahlblechen (Wellblech), bei der die Profilierung in Umfangsrichtung um den Silo verläuft – als ‚horizontal profiliert‘ bezeichnet (siehe Bild 7.1d) – sollten nach 7.5 bestimmt werden. Die Widerstände für eine Schalenwand mit Profilierung in Meridianrichtung – als ‚vertikal profiliert‘ bezeichnet – sollten nach 7.6 bestimmt werden.