



Hochschule
Augsburg University of
Applied Sciences

ARBEITSBERICHT / TAGEBUCH

REPORT / SCRAP LOG

Wintersemester 2012/13

Stehende Tanks unter Berücksichtigung von Erdbeben und Schalenstabilität

Tanks with consideration of seismic design and shell stability

Structural Engineers:

Michael Endres, BEng

Stephan Leis, BEng

Thomas Mader, BEng

Daniel Schäfer, Dipl.-Ing. (FH)

Matthias Schmid, BEng

Supervisor/Editor:

Peter Knoedel, Dr.-Ing., Professor

Textprocessing:

Daniel Schäfer Dipl.-Ing. (FH)

Foreword

This scrap log reports on a postgraduate course on steel construction to be held during winter semester 2012/13. The course is part of the master's program Civil Engineering at the Augsburg University of Applied Sciences.

Within the frame of module 876.5 Selected Chapters of Steel Construction the group agreed on „Stehende Tanks unter Berücksichtigung von Erdbeben und Schalenstabilität“ i.e. „Tanks with consideration of seismic design and shell stability“ to be this term's headline. Although this is a german-language module, parts of the documentation will be given in english in order to allow easier access for those abroad who might be interested in this theme.

Each of the group will contribute to this scrap log, so by the end of the term this document will represent a summary of the work done. As this will be used as a discussion platform, more emphasis will be on „which way did we go“, „which problems did we encounter“, „which question was difficult to tackle“ and „which answers will remain ambiguous“ rather than on a listing of nice results.

Keep in mind that it takes much of courage to work on this difficult matter and being given a reward of 2 CPs only. We are looking forward to a tough and fruitful term.

P. Knoedel (Oct 2012)

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	II
Abkürzungsverzeichnis	V
I. Grundlagen / Theorie	1
1. Begriffe und Definitionen	2
2. Die verschiedenen Berechnungsmethoden nach DIN EN 1998-4	3
3. Vorgehensweise zur Ermittlung der Erdbebenlasten nach Eurocode 8	11
4. Stabilitätsproblematik (Schalenbeulen)	23
5. Tankberechnung unter Berücksichtigung von Störgrößen	40
5.1. Tank unter Innendruck - Membrandehnung	40
5.2. Störgrößen am Rand	42
5.3. Schnittgrößen und Spannungen	45
5.3.1. Schnittgrößen	45
5.3.2. Spannungen	47
5.3.3. Vergleichsspannungen	48
6. Auslegung und Herstellung von stehenden Behältern nach DIN EN 14015	50
II. Tankberechnung	81
7. Definition des Beispieltanks	82
8. Berechnung der Erdbebenlasten nach Eurocode 8	83
9. Berechnung nach DIN EN 14015	89

10. Berechnung des Tanks nach Störgrößen	96
Anhang	99
Literaturverzeichnis	100

Abkürzungsverzeichnis

Teil I.

Grundlagen / Theorie

1. Begriffe und Definitionen

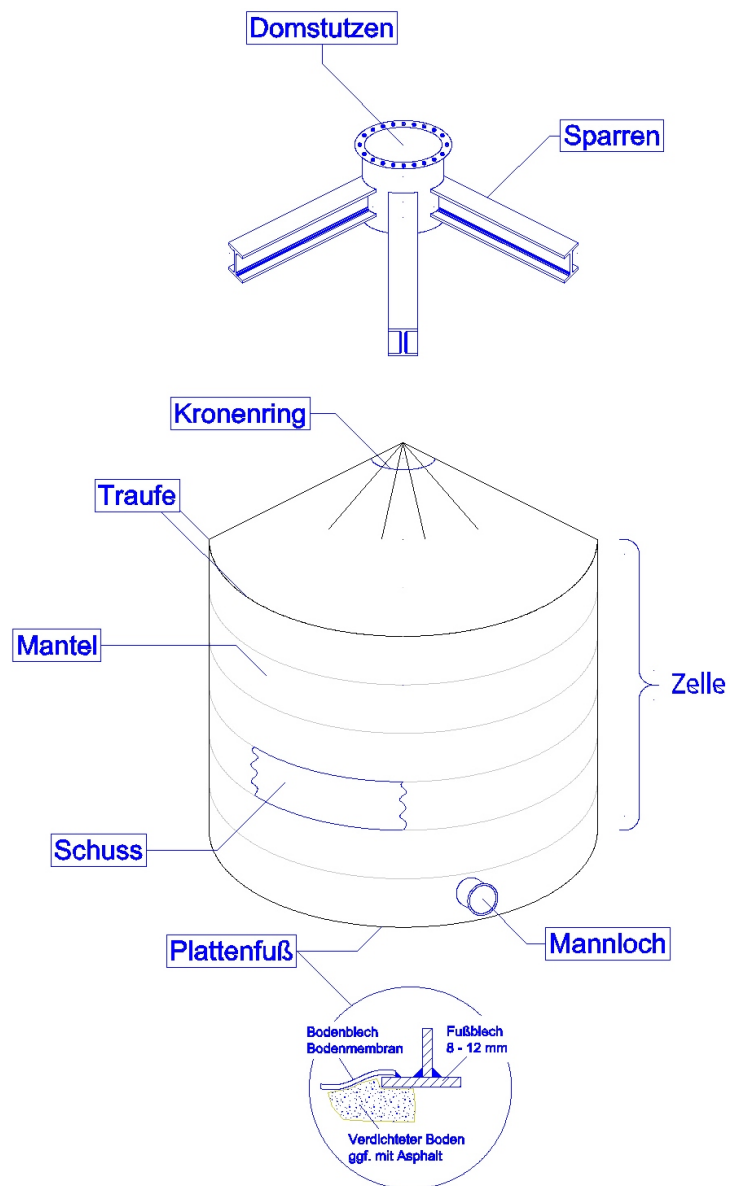


Abbildung 1.1: Begriffsdefinitionen an einem Behälter

2. Die verschiedenen Berechnungsmethoden nach DIN EN 1998-4

Nach DIN EN 1998-4 können folgende Berechnungsmethoden verwendet werden:

1. Ersatzkraftmethode der (linear-elastischen) Berechnung 2. modale Antwortspektrenmethode (linear elastisch) 3. nichtlineare statische (Pushover-) Berechnung 4. nichtlineare (dynamische) Zeitverlaufsberechnung

Eine qualifizierte Erdbebenberechnung findet mit einer Zeitverlaufsberechnung statt. Diese ist jedoch generell aufwändig und beinhaltet rechentechnische Unwägbarkeiten.

Vereinfachend wird das Antwortspektrenverfahren verwendet. Hierbei ist Kenntnis über die Eigenfrequenzen der Eigenformen und die Dämpfung des zu Bauwerks nötig. Eine händische Berechnung ist ohne weiteres möglich.

Weiter vereinfachend kann das Ersatzkraftverfahren angewendet werden. Eine Kenntnis von Frequenzen und Eigenformen ist hier nicht weiter erforderlich.

In der Praxis wird hauptsächlich das Antwortspektrenverfahren und die Zeitverlaufsberechnung angewandt. Nachfolgende Tabelle zeigt, in Bezug auf die Erdbebenbemessung von Tanks, die Modellierungsgenauigkeit bei Zeitverlaufsrechnung und Antwortspektrenverfahren im Vergleich.

Besonderheiten beim Antwortspektrenverfahren Der Verhaltensbeiwert q Beim Antwortspektrenverfahren handelt es sich zunächst um eine lineare Berechnung. Der Verhaltensbeiwert q wird verwendet die nichtlineare Antwort des Tragwerks zu berücksichtigen. Die ermittelten Kräfte werden in Abhängigkeit des Baustoffs und des Tragsystems reduziert. Es handelt sich um das Nutzbarmachen plastischer Reserven im Stahlbau die ohne den Verhaltensbeiwert nicht berücksichtigt werden würden. Die Festlegung der Duktilitätsklasse für das Tragwerk bestimmt den Verhaltensbeiwert q . $q = 1,0$ bedeutet, dass das Tragwerkverhalten vollständig elastisch bleibt

Für Tanks gelten weiterhin folgende Vorgaben: Schwappanteil $q = 1,0$ vorgegeben Für Nicht-Schwappanteil bis zu 1,5, jedoch bei $q > 1,0$ rechnerisch nachzuweisen

Schwingungen Im folgenden Abschnitt soll versucht werden eine kurze Einführung in Schwingungen zu geben. Dies beinhaltet die Anregung eines Schwingers (Tragwerk) durch eine äußere Anregung(-sfrequenz – z.B. Erdbeben). Die allgemein gültige Differentialgleichung

2. Die verschiedenen Berechnungsmethoden nach DIN EN 1998-4

	Zeitverlaufsrechnung	Antwortspektrenverfahren
Struktur	relativ genau erfasst	stark vereinfacht
Steifigkeiten	relativ genau erfasst	nur überschlägig
Massen der Tragstruktur	relativ genau erfasst	geschätzt
Massen der Füllung	Parameterstudie mit unterschiedlichen Füllzuständen	z. B. 80 % des Nennvolumens
mechanisches Modell	relativ genau erfasst	eingespannter Kragarm: bei schlanken Tanks brauchbar, bei gedrunghenen Tanks falsch
geometrische Nichtlinearität	erfasst	vernachlässigt
materielle Nichtlinearität	erfasst	ggfs. im Bauteilwiderstand berücksichtigt
Materialdämpfung	ggfs. zufriedenstellend erfasst	grob und konservativ geschätzt
effektive Dämpfung aus nichtlinearen Effekten („Duffing“) [39], [36]	relativ genau erfasst	vernachlässigt
Dissipation durch Plastizieren z. B. in den Biegestörungen	relativ genau erfasst	indirekt und nur grob durch den Verhaltensbeiwert erfasst
Schnittgrößen	relativ genau erfasst	FALSCH
Bodenverhältnisse/Bodeneigenschaften	genügend genau erfasst	grob geschätzt nach Zonen- und Bodenkarte
Horizontalbeschleunigung	genügend viele gemessene oder synthetische Beschleunigungs-Zeit-Verläufe nachgerechnet	statistisch vermutlich richtiger Maximalwert für eine mittlere Wiederkehr von 475 Jahren
Antwortspektrum	relativ genau erfasst	für linearen EMS theoretisch richtig
mögliches Abheben bei unverankerten Tanks	relativ genau erfasst	aufgrund der falschen Schnittgrößen vermutlich nicht richtig erfasst
Verformungen des Tankfußes auf der Zugseite bei verankerten Tanks	relativ genau erfasst (vgl. [22])	Auswirkung auf die Schnittgrößen durch Aktivierung höherer Fourier-Umfangsharmonischer nicht erfasst
Tatsächlicher Ausnutzungsgrad der Schweißnähte am Tankfuß im Hinblick auf DIN EN 1090 [40]	beliebig genau erfasst	nur grob und sehr konservativ zu ermitteln

Abbildung 2.1: Modellierungsgenauigkeit bei Zeitverlaufsrechnung und Antwortspektrenverfahren [12]

chung lautet:

$$m \cdot \ddot{x}(t) + D \cdot \dot{x}(t) + c \cdot x(t) = p(t) \quad (2.1)$$

mit

m Masse;

D Dämpfung;

c Federsteifigkeit;

2. Die verschiedenen Berechnungsmethoden nach DIN EN 1998-4

p eingeprägte Last.

Lösungen der DGL Ungedämpfte, freie Schwingung

Die ungedämpfte, freie Schwingung ergibt sich aus der einfachsten Lösung der Differentialgleichung. Hierbei wird die Dämpfung D sowie die eingeprägte Last zu Null gesetzt.

$$m \cdot \ddot{x}(t) + c \cdot \dot{x}(t) = 0 \quad (2.2)$$

Nach einer Anregung des Schwingers schwingt dieser frei. Dies bedeutet, dass dieser nach Anregung durch die fehlende Dämpfung mit gleichbleibender Amplitude unendlich lange weiterschwingen wird. Die Lösung hat die Form:

$$x(t) = A \cdot \sin \omega \cdot t \quad (2.3)$$

mit

A Amplitude;

ω Eigen-Kreisfrequenz.

Der Weg-Zeit-Verlauf zeigt eine Sinusfunktion. Die zur Schwingung nötige erste Auslenkung von der Ausgangslage um die Amplitude A muss hierbei einmal erzwungen werden, danach schwingt das System frei.

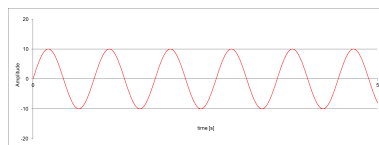


Abbildung 2.2: Ungedämpfte, freie Schwingung (eigene Darstellung)

Gedämpfte, freie Schwingung

Als Dämpfung bezeichnet man die Erscheinung, dass bei einem schwingfähigen System die Amplitude einer Schwingung mit der Zeit abnimmt oder je nach Umständen überhaupt keine Schwingung auftreten kann.

Schwingungen beruhen nach einmalig zugeführter Energie auf der Wechselbeziehung zweier Energieformen. Bei einer mechanischen Welle werden kinetische und potentielle Energie

2. Die verschiedenen Berechnungsmethoden nach DIN EN 1998-4

ineinander umgewandelt. Wird dabei Energie in eine dritte Energieform abgezweigt, oft als Wärme durch Reibungskräfte, so ist dieses die Ursache der Dämpfung.

DGL gedämpfte freie Schwingung:

$$m \cdot x''t + D \cdot x't + c \cdot xt = 0 \quad (2.4)$$

Die Lösung der DGL beinhaltet die Lösung der ungedämpften Schwingung multipliziert mit einer e-Funktion mit negativem Exponenten. Zeichnet man diese so erhält man eine einhüllende „Trompetenkurve“ um die bereits bekannte Sinusfunktion. Diese reduziert die Amplitude von Zyklus zu Zyklus um das gleiche Verhältnis.

$$xt = A \cdot e^{-D \cdot \omega \cdot t} \cdot \sin \omega D \cdot t \quad (2.5)$$

mit

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot \pi \cdot 1T;$$

$$\omega D = \omega_0^2 - \delta^2.$$

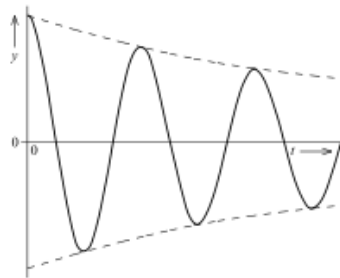


Abbildung 2.3: Schwach gedämpfte Schwingung mit exponentiell abnehmender Begrenzung [6]

Das logarithmische Dekrement ist ein anschauliches Maß für das Abklingen der Amplituden. Es beschreibt das Verhältnis zweier aufeinanderfolgender lokaler Maxima der Kurve.

$$\delta = \ln x(t) \cdot (t + \Delta t) \quad (2.6)$$

2. Die verschiedenen Berechnungsmethoden nach DIN EN 1998-4

Beispiel: Klingt die Amplitude nach einem Zyklus auf 80% ab so beträgt das logarithmische Dekrement:

$$\delta = \ln 100\%80\% = 0,223$$

Dämpfung(-sgrad) D (auch Lehrsches Dämpfungsmaß) und Zusammenhang mit δ (Formelzeichen ξ (xi) in EC 8)

$$\delta = 2 \cdot \pi \cdot \xi$$

Abklingkurven für verschiedene Dämpfungen

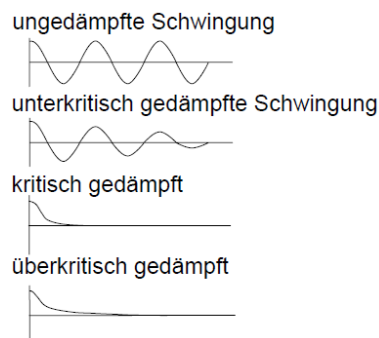


Abbildung 2.4: $D = 0$; Dauerschwingung

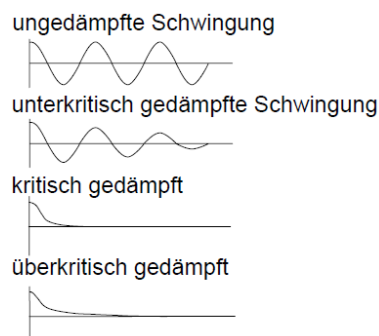


Abbildung 2.5: $0 < D < 1,0$

2. Die verschiedenen Berechnungsmethoden nach DIN EN 1998-4

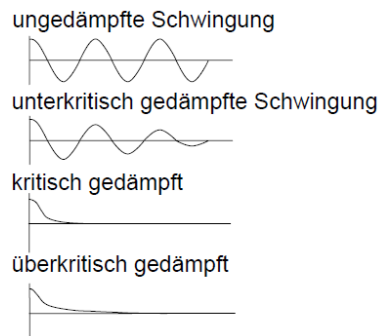


Abbildung 2.6: $D = 1,0$; gerade kein Überschwingen (aperiodischer Grenzfall)

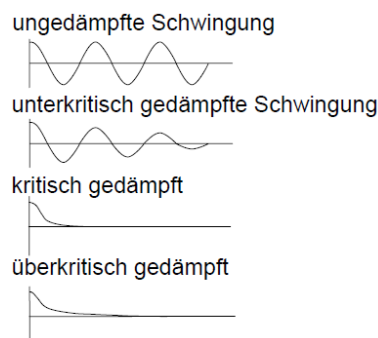


Abbildung 2.7: $D > 1,0$; nicht schwingend (Kriechfall)

Verschiedene Dämpfungsgrade bei der Bemessung unter Erdbebeneinwirkung (aus EC nachschauen): Strukturdämpfung Dämpfungsgrad $D = \xi = 5\%$ (falls nicht anders aus speziellen Informationen abgeleitet werden kann) Abnahme der Schwingung von Zyklus zu Zyklus um etwa 27,0%

Flüssigkeit Falls nicht anders festgelegt Dämpfungsgrad $D = \xi = 0,5\%$ Abnahme der Schwingung von Zyklus zu Zyklus um etwa 3,1%

Körniges Material Falls keine konkreten Informationen Dämpfungsgrad $D = \xi = 10\%$ Abnahme der Schwingung von Zyklus zu Zyklus um etwa 46,6%

Gedämpfte, erzwungene Schwingung Bei Gebäude unter Erdbebenlast handelt es sich um eine gedämpfte erzwungene Schwingung. Die Differentialgleichung lautet:

$$m \cdot x''t + D \cdot x't + c \cdot xt = Fmax \cdot \sin(\Omega \cdot t) \quad (2.7)$$

Auf die Herleitung der entsprechenden Bewegungsgleichung wird verzichtet. Sie kann un-

2. Die verschiedenen Berechnungsmethoden nach DIN EN 1998-4

ter <http://www.tm-mathe.de/Themen/html/gewdglerschwing.html>

Bewegungsgleichung:

$$x(t) = e^{-D \cdot \omega \cdot t} \cdot (A_1 \cdot \cos \omega D \cdot t) + A_2 \sin \omega D \cdot t + A \cdot \cos(\Omega \cdot t - \varphi) \quad (2.8)$$

Beispiel:



Abbildung 2.8: Schwingungsverlauf [7]

Ausgehend von den oben gewonnenen Erkenntnissen kann ein Antwortspektrum für einen Schwinger konstruiert werden.

Antwortspektrum [8, 9, 10] Bei bekanntem Verlauf einer Bodenbeschleunigung kann mittels einer Zeitverlaufsrechnung die Antwort eines Systems bestimmt werden. Hierzu wird ein Einmassenschwinger mit definierter Masse, Steifigkeit und Dämpfung vorgegeben (dadurch ist auch die Eigenfrequenz des Systems festgelegt) und einer Fußbeschleunigung unterworfen. Da der genaue Verlauf eines künftigen Bebens natürlich nicht bekannt sein kann, behilft man sich mit einer Anzahl typischer Verläufe für gegebene Untergrundsituationen. Durch eine Änderung der Systemparameter des Schwingers ergibt sich eine Vielzahl unterschiedlicher Antworten. Die jeweiligen Maximalwerte der Antwort (Beschleunigung, Geschwindigkeit oder Verschiebung) werden aus dem Zeitverlauf abgegriffen und zusammengefasst. Über die Schwingzeit aufgetragen ergibt sich das Antwortspektrum. Durch die Zufälligkeiten der Eingabewerte, insbesondere des Beschleunigungsverlaufs, weist das Antwortspektrum noch einen sehr rauhen Verlauf mit Spitzen und Tälern auf. Durch die Überlagerung verschiedener Antwortspektren wird dieser Effekt reduziert. Trotzdem muss für eine weitere Anwendung das Sepktrum weiter geglättet werden. Der Einmassenschwinger stellt hierbei bereits ein dynamisches System eines Tragwerks dar. Aufgrund dessen kann bei bekannter Frequenz und Dämpfung die auf ein Tragwerk einwirkende Erdbebenbeschleunigung angegeben werden.

In Normenwerken wird das Antwortspektrum weiterhin vereinfacht. Der Abfall des Antwortspektrums im niederfrequenten Bereich wird, auf sicherer Seite liegend, nicht ausgenutzt.

2. Die verschiedenen Berechnungsmethoden nach DIN EN 1998-4

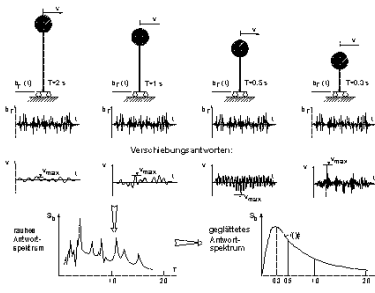


Abbildung 2.9: Vorgehensweise beim Antwortspektrenverfahren

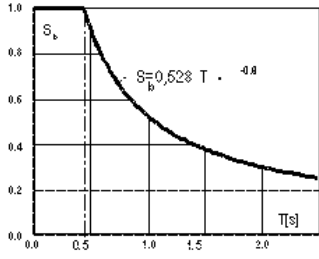


Abbildung 2.10: Antwortspektrum der DIN 4119 []

3. Vorgehensweise zur Ermittlung der Erdbebenlasten nach Eurocode 8

Das folgende Kapitel beschäftigt sich mit der Vorgehensweise zur Ermittlung von Erdbebenlasten in Deutschland. Hierzu wird der Eurocode 8 und der entsprechende Nationaleanhang beleuchtet. Es werden alle aufeinanderfolgende Schritte, zur Ermittlung der Erdbebenlast erläutert. Hierbei ist darauf geachtet, dass an den entsprechenden Stellen auf die Norm oder dem Nationalenanhang verwiesen wird. [2, 5, 3]

3. *Vorgehensweise zur Bestimmung der Erdbebenlasten für Deutschland*

Inhalt

3	Vorgehensweise zur Bestimmung der Erdbebenlasten für Deutschland	3-1
3.1	Festlegen der Erdbebenzone nach Erdbebenkarte	3-2
3.2	Referenz- Spitzenwert der Bodenbeschleunigung	3-3
3.3	Baugrandklasse – Geologische Untergrundklasse.....	3-3
3.4	Bedeutungsbeiwert	3-6
3.5	Elastisches Antwortspektrum	3-7
3.6	Verhaltensbeiwert q	3-8
3.7	Gesamterdbebenkraft	3-9
3.8	Torsionseinwirkung	3-10
3.9	Verteilung der Stockwerklasten.....	3-10
3.10	Abbildungen	3-11

3. Vorgehensweise zur Bestimmung der Erdbebenlasen für Deutschland

3.1 Festlegen der Erdbebenzone nach Erdbebenkarte

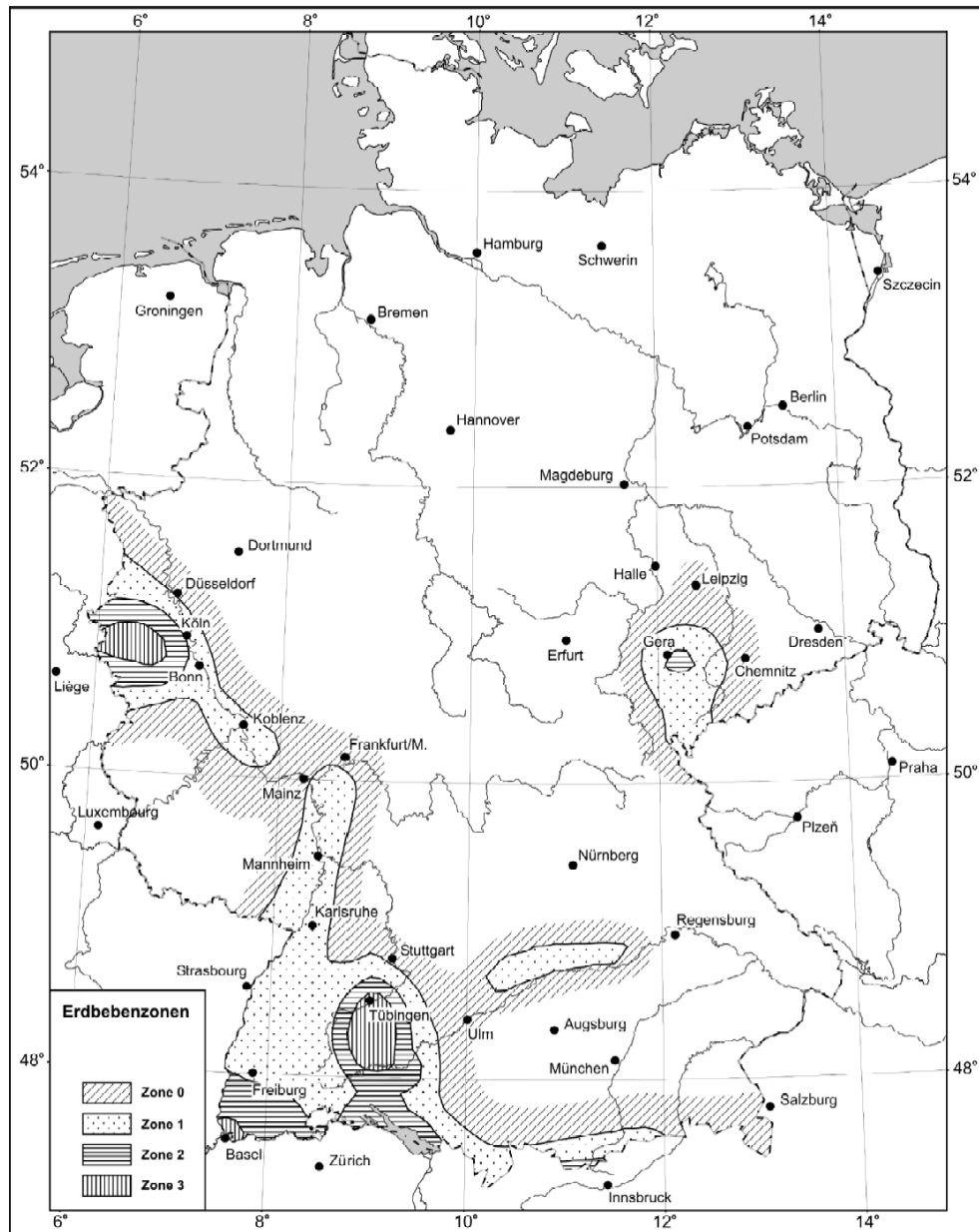


Abbildung 3.1 Schematische Darstellung der Erdbebenzonen der Bundesrepublik Deutschland
DIN EN 1998-1 NA Abs. 3.2.1 Bild NA.1

3. Vorgehensweise zur Bestimmung der Erdbebenlasten für Deutschland

3.2 Referenz- Spitzenwert der Bodenbeschleunigung

Erdbebenzone	Intensitätsintervall	Referenz-Spitzenwert der Bodenbeschleunigung a_{gR} m/s ²
0	$6 \leq I < 6,5$	—
1	$6,5 \leq I < 7$	0,4
2	$7 \leq I < 7,5$	0,6
3	$7,5 \leq I$	0,8

Abbildung 3.2 Zuordnung von Intensitätsintervallen und Referenz-Spitzenwerten der Bodenbeschleunigung zu den Erdbebenzonen DIN EN 1998-1 NA Abs. 3.2.1 Tabelle NA.3

3.3 Baugrandklasse – Geologische Untergrundklasse

Baugrund- klasse	Beschreibung des stratigraphischen Profils	Parameter		
		$v_{s,30}$ (m/s)	N_{SPT} (Schläge/30 cm)	c_u (kPa)
A	Fels oder andere felsähnliche geologische Formation, mit höchstens 5 m weicherem Material an der Oberfläche	> 800	—	—
B	Ablagerungen von sehr dichtem Sand, Kies oder sehr steifem Ton, mit einer Dicke von mindestens einigen zehn Metern, gekennzeichnet durch einen allmählichen Anstieg der mechanischen Eigenschaften mit der Tiefe	360–800	> 50	> 250
C	Tiefe Ablagerungen von dichtem oder mitteldichtem Sand, Kies oder steifem Ton, mit Dicken von einigen zehn bis mehreren hundert Metern	180–360	15–50	70–250
D	Ablagerungen von lockerem bis mitteldichtem kohäsionslosem Boden (mit oder ohne einige weiche kohäsive Schichten), oder von vorwiegend weichem bis steifem kohäsivem Boden	< 180	< 15	< 70
E	Ein Bodenprofil, bestehend aus einer Oberflächen-Alluvialschicht mit v_s -Werten nach C oder D und veränderlicher Dicke zwischen etwa 5 m und 20 m über steiferem Bodenmaterial mit $v_s > 800$ m/s			
S ₁	Ablagerungen, bestehend aus (oder enthaltend) eine(r) mindestens 10 m dicke(n) Schicht weicher Tone oder Schluffe mit hohem Plastizitätsindex (PI > 40) und hohem Wassergehalt	< 100 (indikativ)	—	10–20
S ₂	Ablagerungen von verflüssigbaren Böden, empfindlichen Tonen oder jedes andere Bodenprofil, das nicht in den Klassen A bis E oder S ₁ enthalten ist			

Abbildung 3.3 Baugrandklassen DIN EN 1998-1 Abs. 3.1.2 Tabelle 3.1

3. Vorgehensweise zur Bestimmung der Erdbebenlasen für Deutschland

In Deutschland wird die Baugrundklasse zusammen mit der Untergrundklasse berücksichtigt

Im deutschen Nationalen Anhang werden Baugrundklassen folgendermaßen unterschieden:

- Baugrundklasse A
Unverwitterte (bergfrische) Festgesteine mit hoher Festigkeit.

Dominierende Scherwellengeschwindigkeiten liegen höher als etwa 800 m/s.

- Baugrundklasse B
Mäßig verwitterte Festgesteine bzw. Festgesteine mit geringerer Festigkeit.
oder
grobkörnige (rollige) bzw. gemischtkörnige Lockergesteine mit hohen Reibungseigenschaften in dichter Lagerung bzw. in fester Konsistenz (z. B. glazial vorbelastete Lockergesteine).

Dominierende Scherwellengeschwindigkeiten liegen etwa zwischen 350 m/s und 800 m/s.

- Baugrundklasse C
Stark bis völlig verwitterte Festgesteine.
oder
grobkörnige (rollige) bzw. gemischtkörnige Lockergesteine in mitteldichter Lagerung bzw. in mindestens steifer Konsistenz.
oder
feinkörnige (bindige) Lockergesteine in mindestens steifer Konsistenz.

Dominierende Scherwellengeschwindigkeiten liegen etwa zwischen 150 m/s und 350 m/s.

(iv) Die Einstufung eines Standortes in eine Baugrundklasse ist im Zweifelsfall durch weitergehende Untersuchungen zu bestimmen. Diese dürfen entfallen, wenn ungünstige Baugrundverhältnisse nach Absatz (ii) ausgeschlossen werden können und die Erdbebeneinwirkung unter der Annahme der **Baugrundklasse C** bestimmt wird.

Im deutschen Nationalen Anhang werden Untergrundklassen folgendermaßen unterschieden:

- Untergrundklasse R
Gebiete mit felsartigem Gesteinsuntergrund.

- Untergrundklasse T
Übergangsbereiche zwischen den Gebieten der Untergrundklasse R und der Untergrundklasse S, sowie Gebiete relativ flachgründiger Sedimentbecken.

- Untergrundklasse S
Gebiete tiefer Beckenstrukturen mit mächtiger Sedimentfüllung

3. Vorgehensweise zur Bestimmung der Erdbebenzonen für Deutschland

Untergrundverhältnisse	S	T_B s	T_C s	T_D s
A-R	1,00	0,05	0,20	2,0
B-R	1,25	0,05	0,25	2,0
C-R	1,50	0,05	0,30	2,0
B-T	1,00	0,1	0,30	2,0
C-T	1,25	0,1	0,40	2,0
C-S	0,75	0,1	0,50	2,0

Abbildung 3.4 Werte der Parameter zur Beschreibung des elastischen horizontalen Antwortspektrums
DIN EN 1998-1 NA Abs. 3.2.2.1 Tabelle NA.4

Die Untergrundklasse wird aus dem Bild NA.2 des Nationalen Anhangs abgelesen.

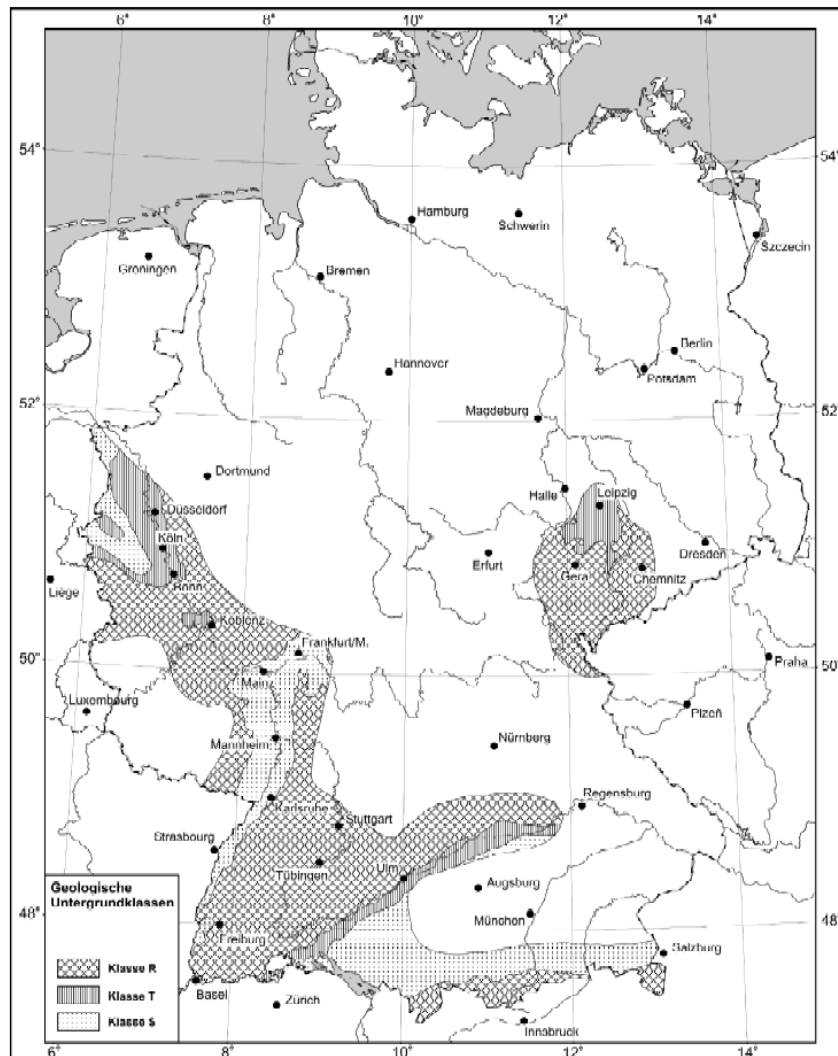


Abbildung 3.5 Schematische Darstellung der geologischen Untergrundklassen in den Erdbebenzonen der Bundesrepublik Deutschland DIN EN 1998-1 NA Abs. 3.2.1 Bild NA.2

3. Vorgehensweise zur Bestimmung der Erdbebenlasten für Deutschland

3.4 Bedeutungsbeiwert

Die Bedeutungsbeiwerte sind von der Bedeutungskategorie Abhängig. Diese können im EC in Tabelle 4.3 im Abs. 4.2.5 abgelesen werden.

Bedeutungs-kategorie	Bauwerke
I	Bauwerke von geringer Bedeutung für die öffentliche Sicherheit, z. B. landwirtschaftliche Bauten usw.
II	Gewöhnliche Bauwerke, die nicht unter die anderen Kategorien fallen
III	Bauwerke, deren Widerstand gegen Erdbeben wichtig ist im Hinblick auf die mit einem Einsturz verbundenen Folgen, z. B. Schulen, Versammlungsräume, kulturelle Einrichtungen usw.
IV	Bauwerke, deren Unversehrtheit während Erdbeben von höchster Wichtigkeit für den Schutz der Bevölkerung ist, z. B. Krankenhäuser, Feuerwachen, Kraftwerke usw.

Abbildung 3.6 Bedeutungskategorien für Hochbauten DIN EN 1998-1 Abs. 4.2.5 Tabelle 4.3

Die Bedeutungskategorien können den Schadensfolgeklasse aus der DIN EN 1990 Anh. B zugeordnet werden.

Schadens-folgeklassen	Merkmale	Beispiele im Hochbau oder bei sonstigen Ingenieurbauwerken
CC 3	Hohe Folgen für Menschenleben <u>oder</u> sehr große wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	Tribünen, öffentliche Gebäude mit hohen Versagensfolgen (z. B. eine Konzerthalle)
CC 2	Mittlere Folgen für Menschenleben, beeinträchtliche wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	Wohn- und Bürogebäude, öffentliche Gebäude mit mittleren Versagensfolgen (z. B. ein Bürogebäude)
CC 1	Niedrige Folgen für Menschenleben <u>und</u> kleine oder vernachlässigbare wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	Landwirtschaftliche Gebäude ohne regelmäßigen Personenverkehr (z. B. Scheunen, Gewächshäuser)

Abbildung 3.7 Klassen für Schadensfolgen DIN EN 1990 Tabelle B.1

Die Bedeutungsbeiwerte nach Abs. 4.2.5 (5) „Anmerkung“ werden folgendermaßen den Bedeutungskategorien zugeordnet.

$$I = \gamma_I = 0,8$$

$$II = \gamma_I = 1,0$$

$$III = \gamma_I = 1,2$$

$$IV = \gamma_I = 1,4$$

3. Vorgehensweise zur Bestimmung der Erdbebenlasten für Deutschland

Im deutschen Nationalen Anhang ist der Bedeutungsbeiwert in der Tabelle NA.6 den Bedeutungskategorien zugeordnet.

Bedeutungskategorie	Bauwerke	Bedeutungsbeiwert γ_i
I	Bauwerke ohne Bedeutung für den Schutz der Allgemeinheit, mit geringem Personenverkehr (z. B. Scheunen, Kulturgewächshäuser, usw.).	0,8
II	Bauwerke, die nicht zu den anderen Kategorien gehören (z. B. kleinere Wohn- und Bürogebäude, Werkstätten, usw.).	1,0
III	Bauwerke, von deren Versagen bei Erdbeben eine große Zahl von Personen betroffen ist (z. B. große Wohnanlagen, Schulen, Versammlungsräume, Kaufhäuser, usw.).	1,2
IV	Bauwerke, deren Unversehrtheit im Erdbebenfall von hoher Bedeutung für den Schutz der Allgemeinheit ist (z. B. Krankenhäuser, wichtige Einrichtungen des Katastrophenschutzes, der Feuerwehr und der Sicherheitskräfte, usw.).	1,4

Abbildung 3.8 Bedeutungskategorien und Bedeutungsbeiwerte DIN EN 1998-1 NA Abs. 4.2.5 Tabelle NA 6

3.5 Elastisches Antwortspektrum

Im Bild NA.3 des Nationalen Anhangs wird der Graph des Elastischen Antwortspektrums dargestellt.

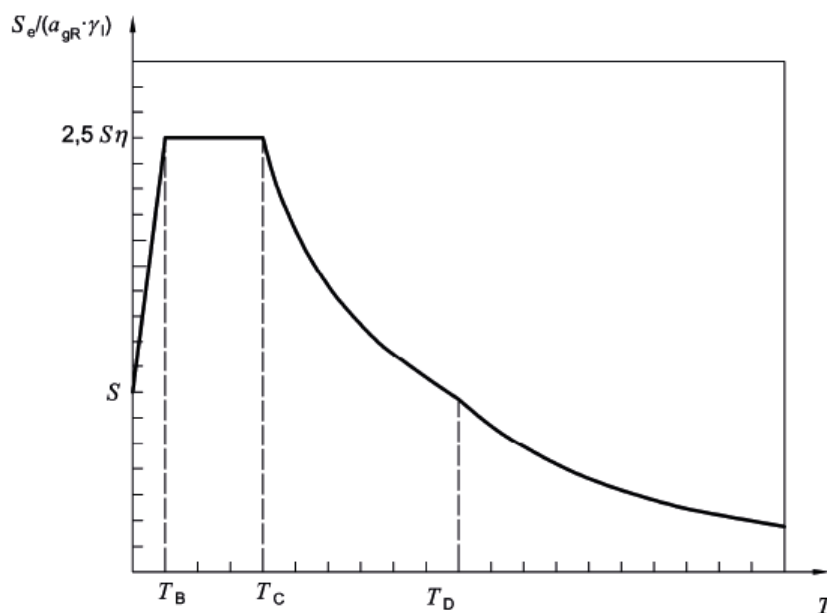


Abbildung 3.9 Elastisches Antwortspektrum_DIN EN 1998-1 NA Abs. 3.2.2.1 Bild NA.3

3. Vorgehensweise zur Bestimmung der Erdbebenlasten für Deutschland

Bemessungsspektrum für die Horizontalkomponente der Erdbebeneinwirkung $S_d(T)$ wird durch die folgenden Ausdrücke bestimmt.

$$T_A \leq T \leq T_B: \quad S_d(T) = a_{gR} \cdot \gamma_I \cdot S \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot \left(\frac{2,5}{q} - 1 \right) \right] \quad (\text{Gl. NA.10})$$

$$T_B \leq T \leq T_C: \quad S_d(T) = a_{gR} \cdot \gamma_I \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \quad (\text{Gl. NA.11})$$

$$T_C \leq T \leq T_D: \quad S_d(T) = a_{gR} \cdot \gamma_I \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot \frac{T_C}{T} \quad (\text{Gl. NA.12})$$

$$T_D \leq T: \quad S_d(T) = a_{gR} \cdot \gamma_I \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot \frac{T_C T_D}{T^2} \quad (\text{Gl. NA.13})$$

Zur Festlegung des Bemessungsspektrums sollte $T_B = 0,01$ s angesetzt werden (NA.4.4)

T = Schwingungsdauer eines linearen Einmassenschwingers

a_g = Bemessungs- Bodenbeschleunigung für Baugrundklassen A ($a_g = \gamma_I \cdot a_{gR}$)

T_B = untere Grenze des Bereichs konstanter Spektralbeschleunigung

T_C = obere Grenze des Bereichs konstanter Spektralbeschleunigung

T_D = Wert, der den Beginn des Bereichs konstanter Verschiebungen des Spektrums definiert

$S_d(T)$ = die Ordinate des Bemessungsspektrums

3.6 Verhaltensbeiwert q

Auslegungskonzept	Duktilitätsklasse des Tragwerks	Bereich der Referenzwerte der Verhaltensbeiwerte q
Konzept a) Niedrig-dissipatives Tragwerksverhalten	DCL (Niedrig)	$\leq 1,5$ bis 2
Konzept b) Dissipatives Tragwerksverhalten	DCM (Mittel)	≤ 4 auch durch Werte in Tabelle 6.2 begrenzt
	DCH (Hoch)	nur durch Werte in Tabelle 6.2 begrenzt

Abbildung 3.10 Auslegungskonzepte, Duktilitätsklassen der Tragwerke und Höchstbeträge für Referenzwerte der Verhaltensbeiwerte *DIN EN 1998-1 Abs. 6.1.2 Tabelle 6.1*

Nach Abs. 6.1.2 (2) darf bei „Konzept a)“ auch bei Unregelmäßigkeit im Aufriss $q_{hor} = 1,5$ gewählt werden.

Nach Abs. 3.2.2.5 (6) ist $q_{ver,max} = 1,5$

3. Vorgehensweise zur Bestimmung der Erdbebenlasten für Deutschland

3.7 Gesamterdbebenkraft

Folgende Berechnungen müssen für beide Richtungen der Erdbebeneinwirkungen bestimmt werden.

$$F_b = S_d(T_1) \cdot M \cdot \lambda \quad (\text{Gl. NA.D.1})$$

mit

$S_d(T_1)$ als Ordinate des Bemessungsspektrums (siehe 3.2.2.5) bei der Periode T_1 ;

T_1 als Eigenschwingungsdauer des Bauwerks für horizontale Bewegungen in der betrachteten Richtung;

M Die Gesamtmasse des Bauwerks M wird unter Berücksichtigung aller ständigen Einwirkungen und 30% der Nutzlasten (80 % bei Lagerräumen, Bibliotheken, Warenhäusern, Parkhäusern, Werkstätten und Fabriken) ermittelt. Schneelasten werden zu 50 % berücksichtigt.

λ als Korrekturbeiwert, mit $\lambda = 0,85$, wenn $T_1 \leq 2 T_c$ ist und das Bauwerk mehr als zwei Stockwerke hat, sonst $\lambda = 1,0$.

Eigenschwingdauer T_1 für Hochbauten bis 40m Höhe:

$$T_1 = C_t \cdot H^{3/4} \quad (\text{Gl. 4.6})$$

mit

C_t gleich 0,085 für biegesteife räumliche Stahlrahmen, 0,075 für biegesteife räumliche Stahlbetonrahmen und für ausmittig ausgesteifte Stahlrahmen und 0,050 für alle anderen Tragwerke;

H als Bauwerkshöhe, in m, ab Fundamentoberkante oder der Oberkante eines starren Kellergeschosses.

Alternativ: Berechnung nach Rayleigh/Morleight¹

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{g}{u}}$$

$$T_1 = \frac{1}{f}$$

u größte Durchbiegung einer Struktur unter den mitschwingenden Massen

g Erdbeschleunigung 9,81 m/s²

¹ Knödel, Peter (26.10.2011): Lineare Baudynamik – Grundlagen; Skript

3. Vorgehensweise zur Bestimmung der Erdbebenlasten für Deutschland

3.8 Torsionseinwirkung

$$\delta = 1 + 0,6 \cdot \frac{0,5 \cdot L}{L_e} \quad (\text{Gl. 4.12})$$

L_e als Abstand zwischen den beiden äußersten Bauteilen, die horizontale Lasten abtragen, gemessen senkrecht zur Richtung der betrachteten Erdbebenwirkung.

L Abstand der Betrachteten Bauteile

δ Erhöhungsfaktor für unplanmäßige Torsion

Ersatzlasten inkl. Torsionseinwirkung

$$F_{b,T} = F_b \cdot \delta$$

3.9 Verteilung der Stockwerklasten

$$F_i = F_b \cdot \frac{s_i \cdot m_i}{\sum s_j \cdot m_j} \quad (\text{Gl. 4.11})$$

mit

F_i als am Stockwerk i angreifende Horizontalkraft;

F_b als Gesamterdbebenkraft nach Gleichung (4.5);

s_i, s_j als Verschiebungen der Massen m_i, m_j in der Grundeigenform;

m_i, m_j als Stockwerksmassen, berechnet nach 3.2.4(2).

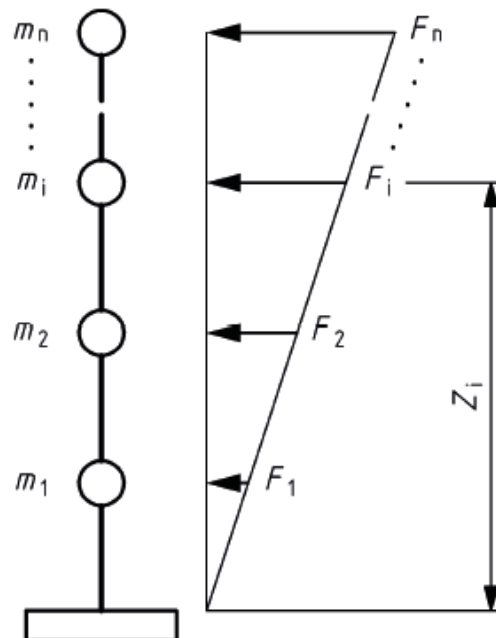


Abbildung 3.11 Höhenproportionale Verteilung der Erdbebenkräfte DIN EN 1998-1 Abs. NA.d.3 Bild NA.D.1

3. Vorgehensweise zur Bestimmung der Erdbebenlasten für Deutschland

3.10 Abbildungen

Abbildung 3.1 <i>DIN EN 1998-1 NA Abs. 3.2.1 Bild NA.1</i>	3-2
Abbildung 3.2 <i>DIN EN 1998-1 NA Abs. 3.2.1 Tabelle NA.3</i>	3-3
Abbildung 3.3 <i>DIN EN 1998-1 Abs. 3.1.2 Tabelle 3.1</i>	3-3
Abbildung 3.4 <i>DIN EN 1998-1 NA Abs. 3.2.2.1 Tabelle NA.4</i>	3-5
Abbildung 3.5 <i>DIN EN 1998-1 NA Abs. 3.2.1 Bild NA.2</i>	3-5
Abbildung 3.6 <i>DIN EN 1998-1 Abs. 4.2.5 Tabelle 4.3</i>	3-6
Abbildung 3.7 <i>DIN EN 1990 Tabelle B.1</i>	3-6
Abbildung 3.8 <i>DIN EN 1998-1 NA Abs. 4.2.5 Tabelle NA 6</i>	3-7
Abbildung 3.9 <i>DIN EN 1998-1 NA Abs. 3.2.2.1 Bild NA.3</i>	3-7
Abbildung 3.10 <i>DIN EN 1998-1 Abs. 6.1.2 Tabelle 6.1</i>	3-8
Abbildung 3.11 <i>DIN EN 1998-1 Abs. NA.d.3 Bild NA.D.1</i>	3-10

4. Stabilitätsproblematik (Schalenbeulen)

Im nachfolgenden Kapitel wird auf die Problematik der Tankstabilität eingegangen. Hierbei liegt das Augenmerk auf dem axialen und meridianen Beulen der Tankwand. Die theoretischen Darstellung der Problematik ist zugleich mit einem Zahlenbeispiel unterfüttert. Die angewandten Werte entsprechen denen, welche der Tanke im zweiten Teil, 7. Kapitel, der Dokumentation besitzt. [1, 4]

4. Stabilität

4.1 Inhaltsverzeichnis

4.	Stabilität:	4-1
4.1	Inhaltsverzeichnis	4-1
4.2	Unterscheidung der Beulnachweise:.....	4-2
4.2.1	Umfangsbeulspannung.....	4-2
4.2.2	Meridianbeulspannungen	4-2
4.2.3	Schubbeulspannung	4-2
4.3	Ablauf	4-3
4.4	Geometrie:	4-3
4.5	Umfangsbeulen:	4-3
4.5.1	Ersatzzylinder	4-3
4.5.2	Ideale Umfangsbeulspannung.....	4-5
4.5.3	Parameter für Umfangsbeulen.....	4-6
4.5.4	Muss ein Beulsicherheitsnachweis gegen Umfangsbeulen geführt werden	4-6
4.5.5	Windbelastung	4-7
4.5.6	Bemessungswert der Umfangsdruckspannung.....	4-7
4.5.7	Beulwiderstand.....	4-7
4.5.8	Beulsicherheitsnachweis	4-8
4.6	Meridian Beulspannung	4-9
4.6.1	Längenparameter	4-9
4.6.2	Elastische Imperfektions- Abminderungsfaktor	4-10
4.6.3	Ideale Meridianbeulspannung.....	4-11
4.6.4	Parameter für Meridianbeulen	4-11
4.6.5	Beulwiderstand.....	4-11
4.6.6	Beulsicherheitsnachweis	4-13
4.7	Übersicht Beulsicherheitsnachweis.....	4-14
4.7.1	Einzeln	4-14
4.7.2	Interaktionsnachweis	4-14
4.8	Versagensgrafiken	4-15
4.8.1	Umfangsbeulen	4-15
4.8.2	Meridianbeulen	4-16
4.9	Bild und Tabellenverzeichnis	4-16

4. Stabilität

4.2 Unterscheidung der Beulnachweise:

- Umfangsbeulspannung
- Meridianbeulspannung (Axialbeulspannung)
- Schubbeulspannung

4.2.1 Umfangsbeulspannung

Schnittgrößen und Spannungen:

$n_{\theta,Ed}$, $\sigma_{\theta,ED}$ Membrannormalkraft und –Spannungen (Druck positiv)

Widerstandsgrößen

$\sigma_{\theta,Rcr}$ ideale elastische Umfangsbeulspannung
 $\sigma_{\theta,Rk}$ charakteristische Umfangsbeulspannung
 $\sigma_{\theta,Rd}$ Bemessungs- Umfangsbeulspannung

4.2.2 Meridianbeulspannungen

Schnittgrößen und Spannungen:

$n_{x,Ed}$, $\sigma_{x,ED}$ Membrannormalkraft und –Spannungen (Druck positiv)

Widerstandsgrößen

$\sigma_{x,Rcr}$ ideale elastische Meridianbeulspannung
 $\sigma_{x,Rk}$ charakteristische Meridianbeulspannung
 $\sigma_{x,Rd}$ Bemessungs- Meridianbeulspannung

4.2.3 Schubbeulspannung

Schnittgrößen und Spannungen:

$n_{x\theta,Ed}$, $\tau_{x\theta,ED}$ Membranschubkräfte und –Spannungen (Druck positiv)

Widerstandsgrößen

$\tau_{x\theta,Rcr}$ ideale elastische Schubbeulspannung
 $\tau_{x\theta,Rk}$ charakteristische Schubbeulspannung
 $\tau_{x\theta,Rd}$ Bemessungs- Schubbeulspannung

4. Stabilität

4.3 Ablauf

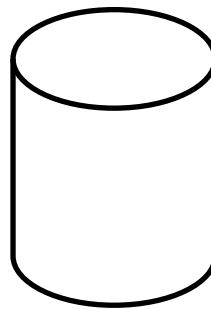
- Geometrie festhalten
- Ersatzzylinder auswählen
- Verhältnisse bestimmen (RT , LR , ω)
- Zylinderlänge bestimmen (kurz, mittel lang oder lang)
- Anhand der bestimmten Zylinderlänge die jeweiligen NW durchführen

4.4 Geometrie:

$$R = 20 / 2 = 10,0 \text{ m}$$

$$T = 3,0 - 12,0 \text{ mm}$$

$$L = 10,0 \text{ m}$$



4.5 Umfangsbeulen:

4.5.1 Ersatzzylinder

Vorhandener Zylinder

→ Ersatzzylinder nach EC 3-6 D.2.3.1

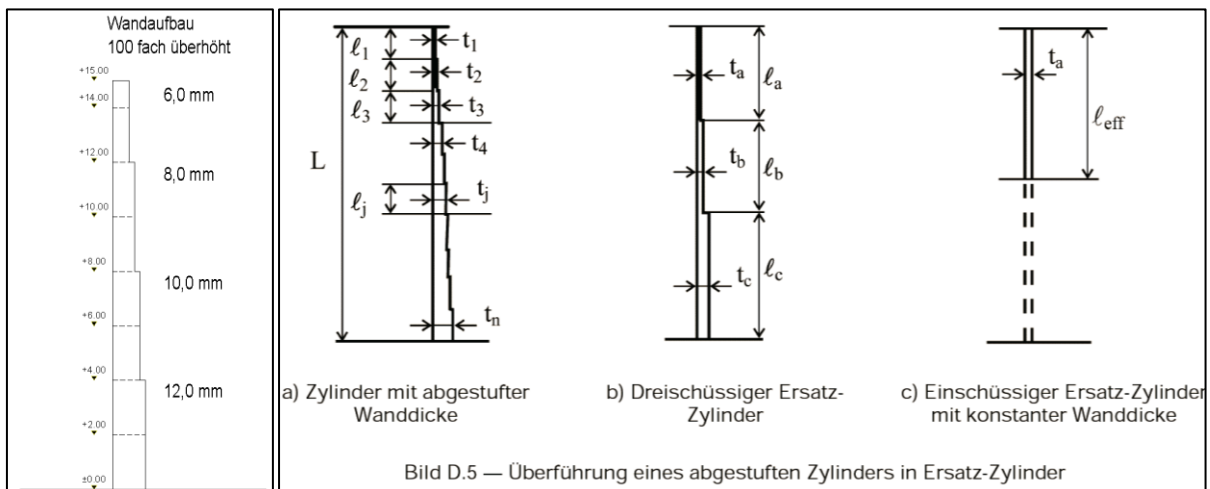


Bild 4-1 Wandaufbau

Bild 4-2 Ersatzzylinder aus EC 3-6 D.2.3.1 (Bild D.5)

4. Stabilität

Bestimmung des dreischüssigen Ersatzzylinders

Bestimmung ℓ_a : $6,0 \text{ mm} \cdot 1,5 = 9 \text{ mm} \rightarrow 10 \text{ mm}$ bei Höhenkote 8,00m

$$\ell_a = 15,0 - 8,0 = \mathbf{7,00 \text{ m}} < 15,0 / 2 = 7,50 \text{ m} \quad \checkmark \quad (D.57)$$

Bestimmung ℓ_b und ℓ_c : $\ell_b = \ell_c = 0,5 \cdot (15,0 - 7,0) = 4,00 \text{ m}$

$$(D.57)$$

Bestimmung t : $t_c = \frac{1}{l_c} \cdot \sum l_j \cdot t_j = \frac{1}{4,0} \cdot (4,0 \cdot 0,012) = 0,012$

$$(D.58)$$

$$t_b = \frac{1}{l_b} \cdot \sum l_j \cdot t_j = \frac{1}{4,0} \cdot (4,0 \cdot 0,01) = 0,010$$

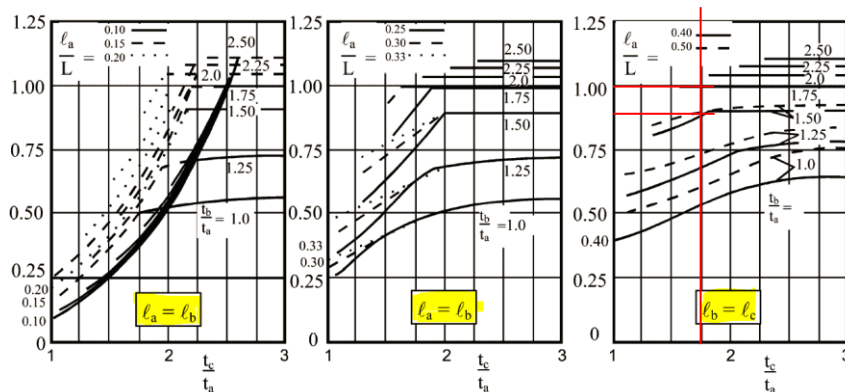
$$(D.59)$$

$$t_a = \frac{1}{l_a} \cdot \sum l_j \cdot t_j = \frac{1}{7,0} \cdot (4,0 \cdot 0,008 + 3,0 \cdot 0,006) = 0,007$$

$$(D.60)$$

$$t = t_a = 7,00 \text{ mm}$$

Bestimmung des einschüssigen Ersatzzylinders ℓ_{eff} und t



$$\ell_a / L = 7,0 / 15,0$$

$$= \mathbf{0,46}$$

$$t_b / t_a = 0,010 / 0,007$$

$$= \mathbf{1,43}$$

$$t_c / t_a = 0,012 / 0,007$$

$$= \mathbf{1,71}$$

Bild D.6 — Faktor κ zur Ermittlung der Ersatzlänge ℓ_{eff}

Bild 4-3 Faktor κ aus EC3-1-6 Bild D.6

$\kappa \Rightarrow t_c / t_a$ bei 1,50 = 0,9

t_c / t_a bei 1,75 = 1,0 t_c / t_a bei 1,71 = **0,98 = κ**

$$\ell_{\text{eff}} = \ell_a / \kappa = 7,00 / 0,98 = 7,14 \text{ m}$$

Geometrische Schlankheit:

$$RT = 10,0 / 0,007 = 1428,6$$

Längenverhältnis:

$$LR = 7,14 / 10,0 = 0,714$$

4. Stabilität

Längenparameter:

Für den Ersatzzylinder

$$\omega = \frac{l_{\text{eff}}}{r} \cdot \sqrt{\frac{r}{t}} = \frac{7,14}{10,0} \cdot \sqrt{\frac{10,0}{0,007}} = 26,99 \quad (D.1)$$

$$C_{\theta} = 1,0 \quad (D.2.3.1 (7))$$

$$\rightarrow \text{mittellanger Zylinder } 1,7 \leq \omega/C_{\theta} \leq 0,5 \cdot R/T = 714 \quad (D.20)$$

4.5.2 Ideale Umfangsbeulspannung

Folgende Randbedingungen sind einzuhalten

Tabelle D.3 — Umfangsbeulfaktoren C_{θ} für mittellange Zylinder

Fall	Zylinderende	Randbedingung	Wert von C_{θ}
1	Ende 1 Ende 2	BC1 BC1	1,5
2	Ende 1 Ende 2	BC1 BC2	1,25
3	Ende 1 Ende 2	BC2 BC2	1,0
4	Ende 1 Ende 2	BC1 BC3	0,6
5	Ende 1 Ende 2	BC2 BC3	0
6	Ende 1 Ende 2	BC3 BC3	0

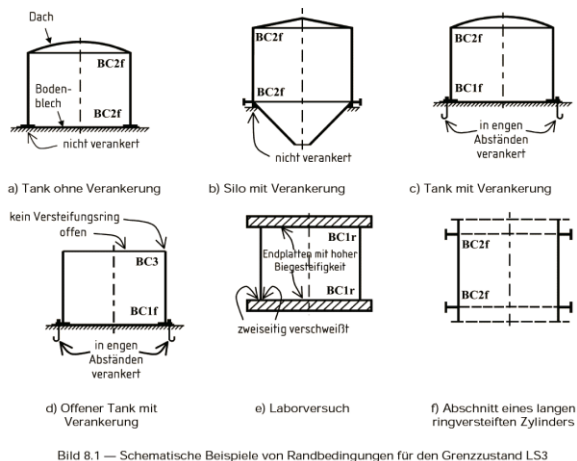


Bild 8.1 — Schematische Beispiele von Randbedingungen für den Grenzzustand LS3

Tabelle 4-1 aus EC3 -1 -6 (Tabelle D.3)

$$C_{\theta} = 1,0 \quad \omega_{\text{eff}} / C_{\theta} = 26,99 / 1,0 = 26,99$$

$$20 \leq \omega / C_{\theta} \leq 1,63 \cdot R/T \quad \checkmark$$

→ Bedingung eingehalten

$$\sigma_{\theta, \text{Rcr, eff}} = 0,92 \cdot E \cdot \left(\frac{C_{\theta}}{\omega_{\text{eff}}} \right) \cdot \left(\frac{T}{R} \right)$$

$$\sigma_{\theta, \text{Rcr, eff}} = 0,92 \cdot 210000 \cdot \left(\frac{1,00}{26,99} \right) \cdot \left(\frac{7}{10000} \right) = 5,01 \text{ N/mm}^2 \quad (D.21)$$

$$\sigma_{\theta, \text{Rcr, j}} = \left(\frac{t_a}{t_j} \right) \cdot \sigma_{\theta, \text{Rcr, eff}} \quad (D.62)$$

$$\sigma_{\theta, \text{Rcr, 1}} = \left(\frac{7}{6} \right) \cdot 5,01 = 5,85 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{\theta, \text{Rcr, 2}} = \left(\frac{7}{8} \right) \cdot 5,01 = 4,38 \text{ N/mm}^2$$

Bild 4-4 aus EC 3 -1 -6 (Bild 8.1)

$$1,63 \cdot R/T = 2329$$

(D.20)

4. Stabilität

$$\sigma_{\theta, Rcr,3} = \left(\frac{7}{10}\right) \cdot 5,01 = 3,51 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{\theta, Rcr,4} = \left(\frac{7}{12}\right) \cdot 5,01 = 2,92 \text{ N/mm}^2$$

4.5.3 Parameter für Umfangsbeulen

Abminderungsfaktor α_{θ} in Abhängigkeit der Herstellqualität:

Tabelle D.5 — Elastischer Imperfektions-Abminderungsfaktor α_{θ} in Abhängigkeit von der Herstellqualität

Herstelltoleranz- Qualitätsklasse	Beschreibung	α_{θ}
Klasse A	exzellent	0,75
Klasse B	hoch	0,65
Klasse C	normal	0,50

Tabelle 4-5 aus EC3 -1 -6 (Tabelle D.5)

$$\alpha_{\theta} = 0,65$$

$$\text{Weiter Faktoren: } \lambda_{\theta 0} = 0,40 \quad \beta = 0,60 \quad \eta = 1,0 \quad (D.26)$$

4.5.4 Muss ein Beulsicherheitsnachweis gegen Umfangsbeulen geführt werden

$$\frac{R}{T} \leq 0,21 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_{yk}}} = 1429 \leq 0,21 \cdot \sqrt{\frac{210000}{235}} = 6,28 \quad (D.27)$$

→ Nachweis nötig

4. Stabilität

4.5.5 Windbelastung

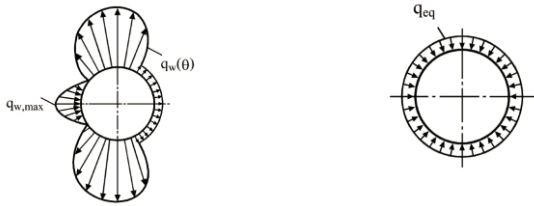


Bild 4-6 aus EC3 -1 -6 (Bild D.2)

Die ungleichmäßige Winddruckverteilung q_w darf durch einen äquivalenten konstanten Außendruck q_{eq} ersetzt werden.

$$q_{w,max} = 0,80 \text{ kN/m}^2 \rightarrow \text{angenommen}$$

$$k_w = 0,46 \cdot \left(1 + 0,1 \cdot \sqrt{\frac{C_\theta \cdot r}{\omega \cdot t}} \right) = 0,46 \cdot \left(1 + 0,1 \cdot \sqrt{\frac{1,25}{63,25} \cdot 1000} \right) = 0,66 \quad (D.29)$$

$$q_{eq} = k_w \cdot q_{w,max} = 0,66 \cdot 0,80 = \mathbf{0,528 \text{ kN/m}^2} \quad (D.28)$$

4.5.6 Bemessungswert der Umfangsdruckspannung

$$\sigma_{\theta,Ed} = \left(1,5 \cdot q_{eq} + 1,5 \cdot q_s \right) \cdot \frac{R}{T} = (1,5 \cdot 0,525 + 1,5 \cdot 0,0) \cdot 1000 = 787,5 \text{ kN/m}^2 \rightarrow \mathbf{0,788 \text{ N/mm}^2}$$

4.5.7 Beulwiderstand

$$\alpha_\theta = 0,65$$

$$\lambda_\theta = 0,40$$

$$\beta = 0,60$$

$$\eta = 1,0$$

Grenzschlankheitsgrad

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha}{1-\beta}} = \sqrt{\frac{0,65}{1-0,60}} = 1,36 \quad (8.16)$$

4. Stabilität

Schlankheitsgrade (8.17)

$$\begin{aligned}\bar{\lambda}_x &= \sqrt{f_{yk} / \sigma_{x,Rcr}} \\ \bar{\lambda}_\theta &= \sqrt{f_{yk} / \sigma_{\theta,Rcr}} \quad \rightarrow \quad \bar{\lambda}_\theta = \sqrt{235 / 2,92} = 8,97 \\ \bar{\lambda}_T &= \sqrt{(f_{yk} / \sqrt{3}) / \tau_{x\theta,Rcr}}\end{aligned}$$

Beulabminderungsfaktoren χ_x χ_θ und χ_τ

$$\text{wenn } \bar{\lambda}_i \leq \bar{\lambda}_0 \quad \rightarrow \quad \chi_i = 1 \quad (8.13)$$

$$\text{wenn } \bar{\lambda}_0 \leq \bar{\lambda}_i \leq \bar{\lambda}_p \quad \rightarrow \quad \chi_i = 1 - \beta \cdot \left(\frac{\bar{\lambda}_i - \bar{\lambda}_0}{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_0} \right)^\eta \quad (8.14)$$

$$\text{wenn } \bar{\lambda}_p \leq \bar{\lambda}_i \quad \rightarrow \quad \chi_i = \frac{\alpha}{\bar{\lambda}_i^2} \quad (8.15)$$

$$\rightarrow \quad 1,36 \leq 8,97 \quad \rightarrow \quad \chi_i = \frac{\alpha}{\bar{\lambda}_i^2} = \frac{0,65}{8,97^2} = 0,0106$$

Charakteristische Beulspannung

$$\sigma_{\theta,Rk} = \chi_\theta \cdot f_{yk} \quad \sigma_{\theta,Rk} = 0,0106 \cdot 235 = 2,49 \text{ N/mm}^2 \quad (8.12)$$

Beulwiderstand

$$\sigma_{\theta,Rd} = \sigma_{\theta,Rk} / \gamma_{M1} \quad \sigma_{\theta,Rd} = 2,49 / 1,1 = 2,26 \text{ N/mm}^2 \quad (8.11)$$

4.5.8 Beulsicherheitsnachweis

$$\sigma_{\theta,Ed} = \sigma_{\theta,Rd} \quad 0,788 / 2,26 = 0,35 < 1,0 \quad \checkmark \quad (8.18)$$

4. Stabilität

4.6 Meridian Beulspannung

4.6.1 Längenparameter

Jeder Zylinderschuss j der Länge l_j ist als gedachter Ersatz-Zylinder mit der Gesamtlänge $l = L$ und der konstanten Wanddicke $t = t_j$ nach D.1.2 zu behandeln. (D.2.3 (1))

$$R / T = 833 \text{ bis } 1667$$

Schuss 1

$$\omega_1 = \frac{l}{r} \cdot \sqrt{\frac{r}{t}} = \frac{1000}{10000} \cdot \sqrt{\frac{10000}{6}} = 4,08 \quad \rightarrow \text{mittellanger Zylinder} \quad (D.1)$$

Schuss 2

$$\omega_2 = \frac{l}{r} \cdot \sqrt{\frac{r}{t}} = \frac{2000}{10000} \cdot \sqrt{\frac{10000}{8,0}} = 7,07 \quad \rightarrow \text{mittellanger Zylinder}$$

Schuss 3

$$\omega_3 = \frac{l}{r} \cdot \sqrt{\frac{r}{t}} = \frac{2000}{10000} \cdot \sqrt{\frac{10000}{10}} = 6,32 \quad \rightarrow \text{mittellanger Zylinder}$$

Schuss 4

$$\omega_4 = \frac{l}{r} \cdot \sqrt{\frac{r}{t}} = \frac{2000}{10000} \cdot \sqrt{\frac{10000}{12}} = 5,77 \quad \rightarrow \text{mittellanger Zylinder}$$

$$\rightarrow C_x = 1,0$$

4. Stabilität

4.6.2 Elastische Imperfektions- Abminderungsfaktor

$$\alpha_x = \frac{0,62}{1 + 1,91 \cdot (\Delta w_k / t)^{1,44}} \quad (D.14)$$

Charakteristische Imperfektionsamplitude

$$\Delta w_k = \frac{1}{Q} \sqrt{\frac{r}{t}} \cdot t \quad (D.15)$$

Q = 25 → Hersteller Qualifikation Klasse B (hoch) (Tabelle D.2)

$$\Delta w_{k,1} = \frac{1}{25} \sqrt{\frac{10000}{6}} \cdot 6 = 9,80$$

$$\Delta w_{k,2} = \frac{1}{25} \sqrt{\frac{10000}{8}} \cdot 8 = 11,31$$

$$\Delta w_{k,3} = \frac{1}{25} \sqrt{\frac{10000}{10}} \cdot 10 = 12,65$$

$$\Delta w_{k,4} = \frac{1}{25} \sqrt{\frac{10000}{12}} \cdot 12 = 13,86$$

$$\alpha_{x,1} = \frac{0,62}{1 + 1,91 \cdot (9,8/6)^{1,44}} = 0,13$$

$$\alpha_{x,2} = \frac{0,62}{1 + 1,91 \cdot (11,31/8)^{1,44}} = 0,15$$

$$\alpha_{x,3} = \frac{0,62}{1 + 1,91 \cdot (12,65/10)^{1,44}} = 0,17$$

$$\alpha_{x,4} = \frac{0,62}{1 + 1,91 \cdot (13,86/12)^{1,44}} = 0,19$$

4. Stabilität

4.6.3 Ideale Meridianbeulspannung

$$\sigma_{x,Rcr} = 0,605 \cdot E \cdot C_x \cdot \frac{t}{r}$$

$$\sigma_{x,Rcr,1} = 0,605 \cdot 210000 \cdot 1,0 \cdot \frac{6}{10000} = 76,23 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{x,Rcr,2} = 0,605 \cdot 210000 \cdot 1,0 \cdot \frac{8}{10000} = 101,64 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{x,Rcr,3} = 0,605 \cdot 210000 \cdot 1,0 \cdot \frac{10}{10000} = 127,05 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{x,Rcr,4} = 0,605 \cdot 210000 \cdot 1,0 \cdot \frac{12}{10000} = 152,46 \text{ N/mm}^2$$

4.6.4 Parameter für Meridianbeulen

Weiter Faktoren: $\lambda_{x0} = 0,20$ $\beta = 0,60$ $\eta = 1,0$

4.6.5 Beulwiderstand

Grenzschlankheitsgrad

$$\bar{\lambda}_{p,1} = \sqrt{\frac{\alpha}{1-\beta}} = \sqrt{\frac{0,13}{1-0,60}} = 0,57 \quad (8.16)$$

$$\bar{\lambda}_{p,2} = \sqrt{\frac{\alpha}{1-\beta}} = \sqrt{\frac{0,15}{1-0,60}} = 0,61$$

$$\bar{\lambda}_{p,3} = \sqrt{\frac{\alpha}{1-\beta}} = \sqrt{\frac{0,17}{1-0,60}} = 0,65$$

$$\bar{\lambda}_{p,4} = \sqrt{\frac{\alpha}{1-\beta}} = \sqrt{\frac{0,19}{1-0,60}} = 0,69$$

4. Stabilität

Schlankheitsgrade

$$\bar{\lambda}_x = \sqrt{f_{yk} / \sigma_{x,Rcr}} \quad (8.17)$$

$$\bar{\lambda}_{x,1} = \sqrt{235 / 76,23} = 1,79$$

$$\bar{\lambda}_{x,2} = \sqrt{235 / 101,64} = 1,52$$

$$\bar{\lambda}_{x,3} = \sqrt{235 / 127,05} = 1,36$$

$$\bar{\lambda}_{x,4} = \sqrt{235 / 152,46} = 1,24$$

Beulabminderungsfaktor

$$\text{wenn } \bar{\lambda}_i \leq \bar{\lambda}_0 \quad \rightarrow \quad \chi_i = 1 \quad (8.13)$$

$$\text{wenn } \bar{\lambda}_0 \leq \bar{\lambda}_i \leq \bar{\lambda}_p \quad \rightarrow \quad \chi_i = 1 - \beta \cdot \left(\frac{\bar{\lambda}_i - \bar{\lambda}_0}{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_0} \right)^\eta \quad (8.14)$$

$$\text{wenn } \bar{\lambda}_p \leq \bar{\lambda}_i \quad \rightarrow \quad \chi_i = \frac{\alpha}{\bar{\lambda}_i^2} \quad (8.15)$$

$\rightarrow \quad \bar{\lambda}_p \leq \bar{\lambda}_i$ gilt für alle vier Schüsse

$$\chi_{x,1} = \frac{\alpha}{\bar{\lambda}_i^2} = \frac{0,13}{1,79^2} = 0,041$$

$$\chi_{x,2} = \frac{\alpha}{\bar{\lambda}_i^2} = \frac{0,13}{1,52^2} = 0,065$$

$$\chi_{x,3} = \frac{\alpha}{\bar{\lambda}_i^2} = \frac{0,17}{1,36^2} = 0,092$$

$$\chi_{x,4} = \frac{\alpha}{\bar{\lambda}_i^2} = \frac{0,19}{1,24^2} = 0,124$$

4. Stabilität

Charakteristische Beulspannung

$$\sigma_{x,Rk} = \chi_x \cdot f_{yk} \quad (8.12)$$

$$\sigma_{x,Rk,1} = 0,041 \cdot 235 = 9,64 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{x,Rk,2} = 0,065 \cdot 235 = 15,28 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{x,Rk,3} = 0,092 \cdot 235 = 21,62 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{x,Rk,4} = 0,124 \cdot 235 = 29,14 \text{ N/mm}^2$$

Beulwiderstand

$$\sigma_{x,Rd} = \sigma_{x,Rk} / \gamma_{M1} \quad (8.11)$$

$$\sigma_{x,Rd,1} = 9,64 / 1,1 = 8,76 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{x,Rd,2} = 15,28 / 1,1 = 13,89 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{x,Rd,3} = 21,62 / 1,1 = 19,65 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{x,Rd,4} = 29,14 / 1,1 = 26,49 \text{ N/mm}^2$$

4.6.6 Beulsicherheitsnachweis

Belastung

Aus Dachtragwerk und Schneebelastung → 16,8 N/mm

→ 16,8 N/mm / 6,0mm = 2,80 N/mm²

Der Innendruck wird auf der sicheren Seite vernachlässigt, um auch den Lastfall:
„entleerter Tank“ zu berücksichtigen.

Der Verfasser weist darauf hin, dass dies nur selten und kurzfristig der Fall sein wird.

Nachweis

$$\sigma_{x,Ed} = \sigma_{x,Rd} \quad 2,80 / 8,76 = 0,32 < 1,0 \quad \checkmark \quad (8.18)$$

4. Stabilität

4.7 Übersicht Beulsicherheitsnachweis

4.7.1 Einzel

$$\sigma_{x,Ed} = \sigma_{x,Rd} \quad 2,80 / 9,64 = 0,32 < 1,0 \quad \checkmark \quad (8.18)$$

$$\sigma_{\theta,Ed} = \sigma_{\theta,Rd} \quad 0,788 / 2,26 = 0,35 < 1,0 \quad \checkmark$$

$$\tau_{x\theta,Ed} = \tau_{x\theta,Rd}$$

4.7.2 Interaktionsnachweis

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}} \right)^{k_x} - k_i \cdot \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{\theta,Ed}}{\sigma_{\theta,Rd}} \right) + \left(\frac{\sigma_{\theta,Ed}}{\sigma_{\theta,Rd}} \right)^{k_\theta} + \left(\frac{\tau_{x\theta,Ed}}{\tau_{x\theta,Rd}} \right)^{k_\tau} \leq 1,0 \quad (8.19)$$

Beulinteraktionsparameter

$$k_x = 1,25 + 0,75 \cdot \chi_x = 1,25 + 0,75 \cdot 0,041 = 1,28 \quad (D.46)$$

$$k_\theta = 1,25 + 0,75 \cdot \chi_\theta = 1,25 + 0,75 \cdot 0,0106 = 1,26 \quad (D.47)$$

$$k_\tau = 1,75 + 0,25 \cdot \chi_\tau \quad (D.48)$$

$$k_i = (\chi_x \cdot \chi_\theta)^2 = (0,041 \cdot 0,0106)^2 = 1,88 \cdot 10^{-7} \quad (D.49)$$

$$(0,32)^{1,28} - 1,88 \cdot 10^{-7} \cdot (0,32) \cdot (0,35) + (0,35)^{1,26} + 0 = 0,49 < 1,0 \quad \checkmark \quad (8.19)$$

4. Stabilität

4.8 Versagensgrafiken

4.8.1 Umfangsbeulen

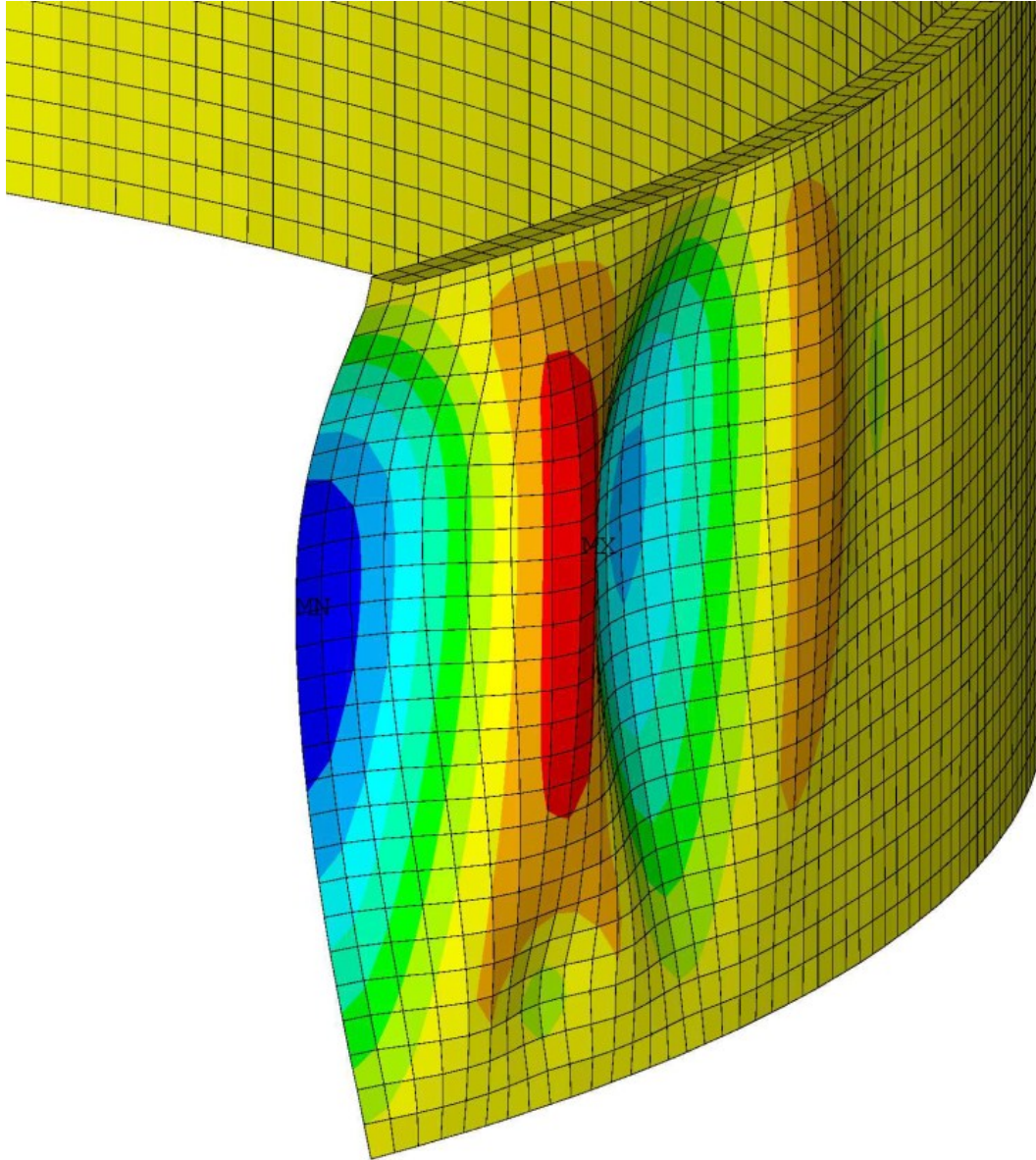


Bild 4-7 FEM- Model Umfangsbeulen, Knoedel, P., Ummenhofer, Th.: Design of Squat Steel Tanks with $R/T > 5000$, fig. 8.TP056 in Motro, R. (ed.): Proc., IASS Symposium: Shell and Spatial Structures from Models to Realization, Montpellier, 20-24 September 2004.

4. Stabilität

4.8.2 Meridianbeulen



Bild 4-8 Versagensfigur Meridianbeulen, Knödel, P.: Stabilitätsuntersuchungen an kreiszylindrischen stählernen Siloschüssen. Dissertation, Universität Karlsruhe 1995.

4.9 Bild und Tabellenverzeichnis

Bild 4-1 Wandaufbau	Bild 4-2 Ersatzzylinder aus EC 3-6 D.2.3.1 (Bild D.5).....	4-3
Bild 4-3 Faktor κ aus EC3-1-6	Bild D.6.....	4-4
Tabelle 4-1 aus EC3 -1 -6 (Tabelle D.3)	.....	4-5
Bild 4-4 aus EC 3 -1 -6 (Bild 8.1)	.....	4-5
Tabelle 4-5 aus EC3 -1 -6 (Tabelle D.5)	.....	4-6
Bild 4-6 aus EC3 -1 -6 (Bild D.2)	.....	4-7
Bild 4-7 FEM- Model Umfangsbeulen, Knoedel, P.	.....	4-15
Bild 4-8 Versagensfigur Meridianbeulen, Knödel, P.	.....	4-16

5. Tankberechnung unter Berücksichtigung von Störgrößen

5.1. Tank unter Innendruck - Membrandehnung

(vgl. [14])

Eine Zylinderschale die unter einem bestimmten Innendruck steht, weitet sich hierdurch auf. Mithilfe des theoretischen Ansatzes, der Kesselformel, lässt sich diese Mantelaufweitung bestimmen.

$$2 \cdot R \cdot L \cdot p_i = 2 \cdot n_\varphi \cdot L$$

Aus dem Kräftegleichgewicht am freigeschnittenen Ende:

$$n_\varphi = p_i \cdot R \tag{5.1}$$

Über die Umfangskraft n_φ errechnet sich die Umfangsspannung σ_φ

$$\sigma_\varphi = \frac{n_\varphi}{t} \tag{5.2}$$

mit

t Manteldicke

Mit der vorhandenen Umfangsspannung σ_φ und der vorhandenen Umfangsdehnung ε_φ bestimmt sich die Radiuszunahme:

$$\Delta R = R \cdot \varepsilon_\varphi \tag{5.3}$$

5. Tankberechnung unter Berücksichtigung von Störgrößen

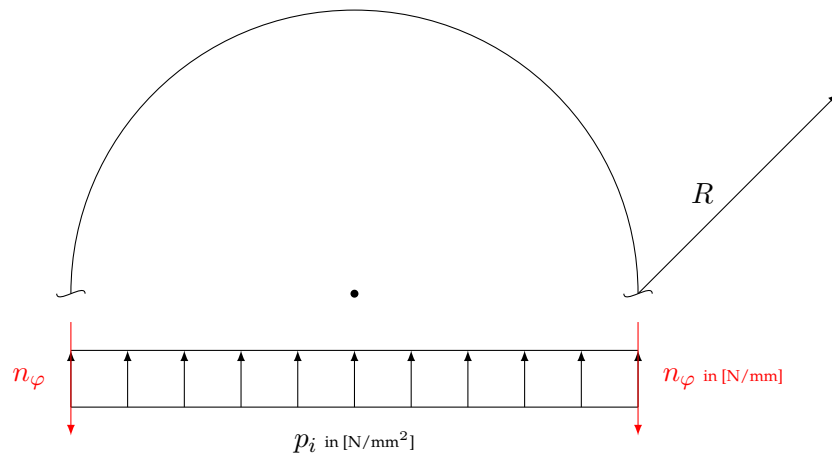


Abbildung 5.1: Herleitung der Kesselformel

mit

$$\varepsilon_\varphi = \frac{\sigma_\varphi}{E}$$

E Elastizitätsmodul

5. Tankberechnung unter Berücksichtigung von Störgrößen

5.2. Störgrößen am Rand

(vgl. [13, 11])

Steht eine Zylinderschale unter einem Innendruck, hervorgerufen durch ein Medium wie z.B. Wasser, weitet sich die Zylinderschale nach unten hin auf. Im vorangegangenen Punkt wurde die Radiusaufweitung am unteren Ende der Schale bestimmt siehe **Abbildung: 5.2**.

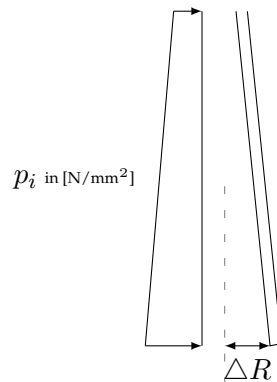


Abbildung 5.2: Freigeschnittenes Schalenende

Dies geschieht aber nur im freigeschnittenen Zustand der Schale. In der Praxis ist die Schale durch ein Bodenblech oder einen darunterliegenden Schuss gehalten. Durch den gehaltenen Zustand der Schale entstehen sogenannte Randstörgrößen. Zum einen ein „Ringlast“ R , die eine horizontal Verformung ω_0 zurückhält und zum anderen das „Kreppelmoment“ M , das eine entstehende radiale Verdrehung χ_0 zurückstellt, siehe **Abbildung: 5.3**.

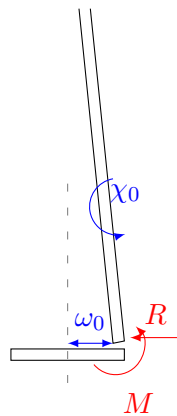


Abbildung 5.3: Störgrößen am Schalenende

5. Tankberechnung unter Berücksichtigung von Störgrößen

Durch die Gleichgewichtsbedingungen am Rand,

$$\omega = \omega R + \omega M + \omega_0 = 0$$

$$\chi = \chi R + \chi M + \chi_0 = 0$$

können die beiden Störgrößen R und M bestimmt werden. Die maximalen Verformungen, Verdrehungen lassen sich durch die aufzuwendende Kraft geteilt durch die „Plattensteifigkeit“ K und einen „Wellenlängenparameter“ λ errechnen. Es ergeben sich folgenden Gleichungen:

$$\begin{aligned}\omega R &= \frac{R}{2 \cdot K \cdot \lambda^3} \\ \omega M &= \frac{M}{2 \cdot K \cdot \lambda^2} \\ \chi R &= \frac{-R}{2 \cdot K \cdot \lambda^2} \\ \chi M &= \frac{-M}{K \cdot \lambda}\end{aligned}$$

Setzt man diese Gleichungen in die zuvor aufgestellten Gleichgewichtsbedingungen ein, erhält man Gleichung I und II:

$$\text{Gleichung I: } \omega = \frac{R}{2 \cdot K \cdot \lambda^3} + \frac{M}{2 \cdot K \cdot \lambda^2} + \omega_0 = 0$$

$$\text{Gleichung II: } \chi = \frac{-R}{2 \cdot K \cdot \lambda^2} + \frac{-M}{K \cdot \lambda} + \chi_0 = 0$$

5. Tankberechnung unter Berücksichtigung von Störgrößen

Durch umformen und ineinander einsetzen erhält man die beiden Störgrößen R und M :

$$\begin{aligned}
 \text{II: } \chi &= \frac{-R}{2 \cdot K \cdot \lambda^2} + \frac{-M}{K \cdot \lambda} + \chi_0 = 0 && / \cdot \frac{1}{\lambda} \\
 \text{II: } \chi &= \frac{-R}{2 \cdot K \cdot \lambda^3} + \frac{-M}{K \cdot \lambda^2} + \frac{\chi_0}{\lambda} = 0 && / \text{ I + II = III} \\
 \text{III: } \chi + \omega &= 0 + \frac{M}{2 \cdot K \cdot \lambda^2} + \frac{-M}{K \cdot \lambda^2} + \omega_0 + \frac{\chi_0}{\lambda} = 0 && / \text{ erweitert mit Hauptnenner} \\
 \text{III: } \chi + \omega &= 0 + \frac{-M}{2 \cdot K \cdot \lambda^2} + \omega_0 + \frac{\chi_0}{\lambda} = 0 && / \text{ auflösen nach M} \\
 \text{III: } M &= \left(\omega_0 + \frac{\chi_0}{\lambda} \right) \cdot 2 \cdot K \cdot \lambda^2 && / \text{ M in II} \\
 \text{II: } \chi &= \frac{-R}{2 \cdot K \cdot \lambda^2} - \frac{\left(\omega_0 + \frac{\chi_0}{\lambda} \right) \cdot 2 \cdot K \cdot \lambda^2}{K \cdot \lambda} + \chi_0 = 0 && / \text{ kürzen} \\
 \text{II: } \chi &= \frac{-R}{2 \cdot K \cdot \lambda^2} - \left(\omega_0 + \frac{\chi_0}{\lambda} \right) \cdot 2 \cdot \lambda + \chi_0 = 0 && / \text{ auflösen nach R} \\
 \text{II: } R &= \left[\chi_0 - \left(\omega_0 + \frac{\chi_0}{\lambda} \right) \cdot 2 \cdot \lambda \right] \cdot 2 \cdot K \cdot \lambda^2
 \end{aligned}$$

Ergebniss für das Krepelmoment:

$$M = \left(\omega_0 + \frac{\chi_0}{\lambda} \right) \cdot 2 \cdot K \cdot \lambda^2 \quad (5.4)$$

Ergebniss für die radiale Ringlast:

$$R = \left[\chi_0 - \left(\omega_0 + \frac{\chi_0}{\lambda} \right) \cdot 2 \cdot \lambda \right] \cdot 2 \cdot K \cdot \lambda^2 \quad (5.5)$$

mit

$$K = \frac{E \cdot t^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \quad (5.6)$$

und

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{a \cdot t}} \cdot \sqrt[4]{3 \cdot (1 - \mu^2)} \quad (5.7)$$

5. Tankberechnung unter Berücksichtigung von Störgrößen

5.3. Schnittgrößen und Spannungen

5.3.1. Schnittgrößen

Aus den beiden, im voran gegangenen Abschnitt, ermittelten Kräften ergeben sich Schnittgrößen im Mantel. Dies berechnen sich, nach folgenden Gleichungen: (vgl. [15, 11])

Biegemomente (Meridian)

$$mxR_i = \frac{R}{\lambda} \cdot e^{-\lambda \cdot x_i} \cdot \sin(\lambda \cdot x_i) \quad (5.8)$$

$$mxM_i = M \cdot e^{-\lambda \cdot x_i} \cdot [\cos(\lambda \cdot x_i) + \sin(\lambda \cdot x_i)] \quad (5.9)$$

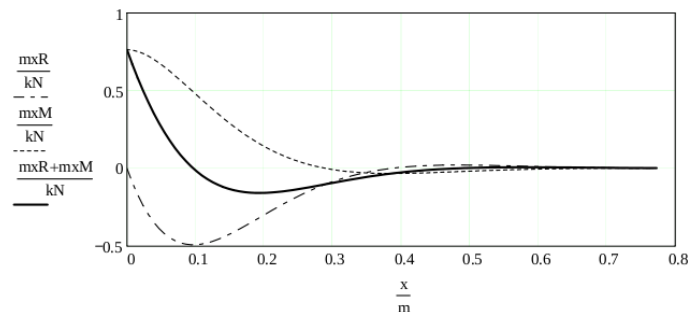


Abbildung 5.4: Biegemomente (Meridian) [15]

Querkraft (Meridianrichtung)

$$qxR_i = R \cdot e^{-\lambda \cdot x_i} \cdot [\cos(\lambda \cdot x_i) - \sin(\lambda \cdot x_i)] \quad (5.10)$$

$$qxM_i = 2 \cdot \lambda \cdot M \cdot e^{-\lambda \cdot x_i} \cdot \sin(\lambda \cdot x_i) \quad (5.11)$$

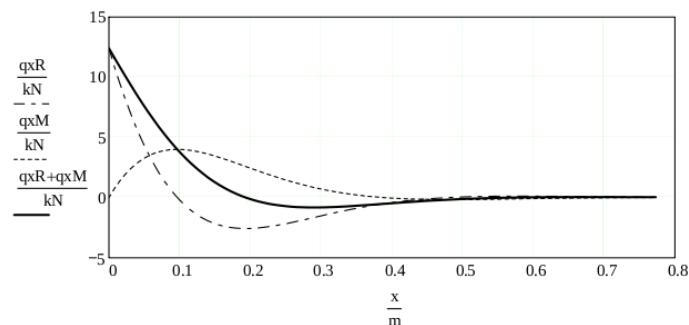


Abbildung 5.5: Querkräfte (Meridianrichtung) [15]

5. Tankberechnung unter Berücksichtigung von Störgrößen

Umfangskraft

$$n_{\varphi} R_i = \frac{R}{2 \cdot a \cdot \lambda^3} \cdot \frac{E \cdot t}{K} \cdot e^{-\lambda \cdot x_i} \cdot \cos(\lambda \cdot x_i) \quad (5.12)$$

$$n_{\varphi} M_i = \frac{M}{2 \cdot a \cdot \lambda^2} \cdot \frac{E \cdot t}{K} \cdot e^{-\lambda \cdot x_i} \cdot [\cos(\lambda \cdot x_i) - \sin(\lambda \cdot x_i)] \quad (5.13)$$

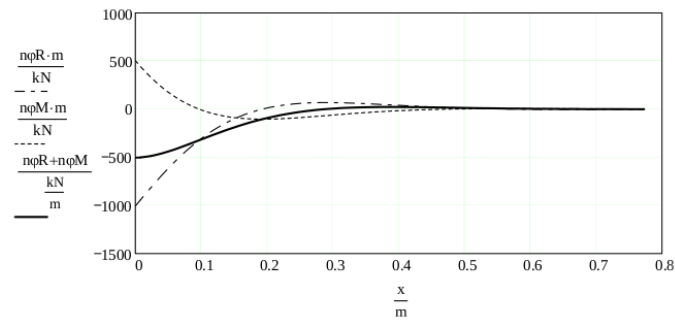


Abbildung 5.6: Umfangskräfte aus den Störgrößen [15]

5. Tankberechnung unter Berücksichtigung von Störgrößen

5.3.2. Spannungen

Aus den verschiedenen Schnittgrößen im Mantel werden mit der Blechdicke die Spannungen bestimmt. Dies berechnen sich, nach folgenden Gleichungen:

Meridianspannungen aus (Meridian-)Biegemomente (Innenseite)

$$\sigma_{x,R_i} = \frac{mxR_i \cdot 6}{t^2} \quad (5.14)$$

$$\sigma_{x,M_i} = \frac{mxM_i \cdot 6}{t^2} \quad (5.15)$$

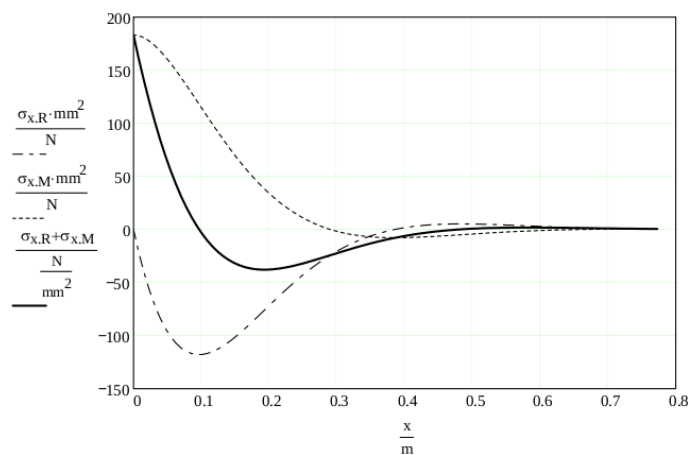


Abbildung 5.7: Meridianspannungen [15]

Schubspannungen aus Querkraft entlang des Meridians

$$\tau_{x,R_i} = \frac{qxR_i}{t} \cdot \frac{3}{2} \quad (5.16)$$

$$\tau_{x,M_i} = \frac{qxM_i}{t} \cdot \frac{3}{2} \quad (5.17)$$

Umfangsspannungen

$$\sigma_{\varphi,R_i} = \frac{n\varphi R_i}{t} \quad (5.18)$$

$$\sigma_{\varphi,M_i} = \frac{n\varphi M_i}{t} \quad (5.19)$$

5. Tankberechnung unter Berücksichtigung von Störgrößen

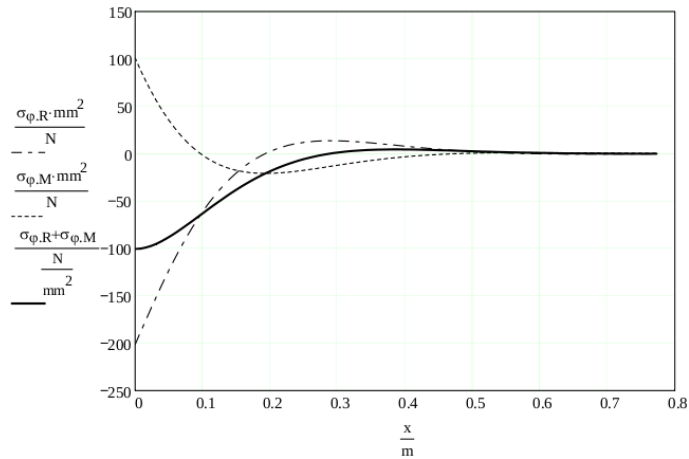


Abbildung 5.8: Querkräfte (Schubspannungen) [15]

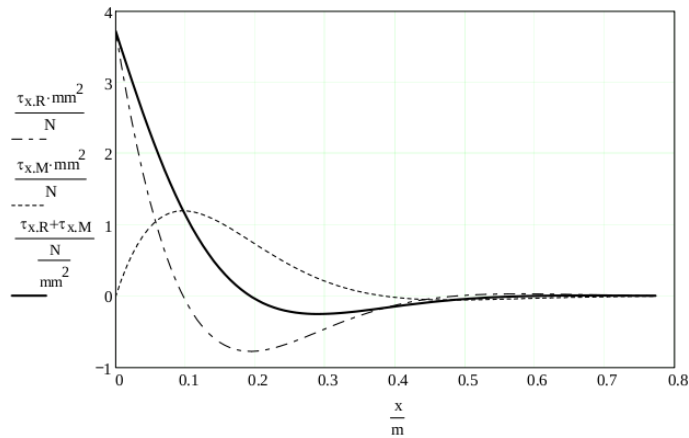


Abbildung 5.9: Umfangsspannungen [15]

5.3.3. Vergleichsspannungen

Die einzelnen Spannungen werden in Vergleichsspannungen an der Innen- und Außenseite und in der Mittelfläche des Mantels zusammengefasst. Die Vergleichsspannungen werden nach folgenden Gleichungen bestimmt:

Vergleichsspannung - Innenseite:

$$\sigma_{1v_i} = \sqrt{(\sigma_{1x_i})^2 - \sigma_{1x_i} \cdot \sigma_{\varphi_i} + (\sigma_{\varphi_i})^2} \quad (5.20)$$

5. Tankberechnung unter Berücksichtigung von Störgrößen

Vergleichsspannung - Mittelfläche:

$$\sigma_{2v_i} = \sqrt{(\sigma_{\varphi_i})^2} \quad (5.21)$$

Vergleichsspannung - Außenseite:

$$\sigma_{3v_i} = \sqrt{(\sigma_{3x_i})^2 - \sigma_{3x_i} \cdot \sigma_{\varphi_i} + (\sigma_{\varphi_i})^2} \quad (5.22)$$

mit

$$\sigma_{1x_i} = \sigma_{x,R_i} + \sigma_{x,M_i}$$

$$\sigma_{3x_i} = (-\sigma_{x,R})_i + (-\sigma_{x,M})_i$$

$$\sigma_{\varphi_i} = \sigma_{\varphi,R_i} + \sigma_{\varphi,M_i}$$

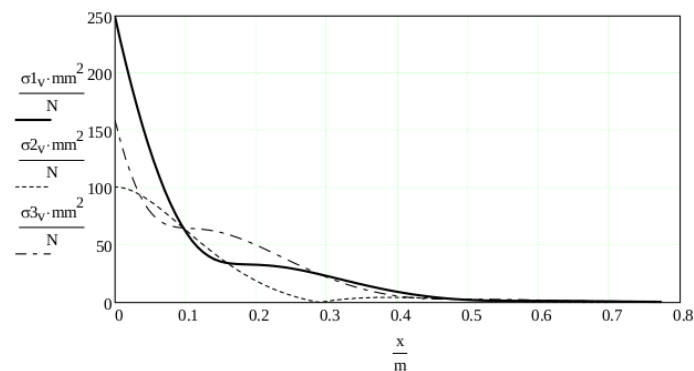


Abbildung 5.10: Vergleichsspannungen [15]

6. Auslegung und Herstellung von stehenden Behältern nach DIN EN 14015

6. *Auslegung und Herstellung von stehenden Behältern nach DIN EN 14015*

6.1 *Inhaltsverzeichnis*

Inhalt

6.	Auslegung und Herstellung von stehenden Behältern nach DIN EN 14015.....	6-1
6.1	Inhaltsverzeichnis.....	6-1
6.2	Abbildungsverzeichnis.....	6-2
6.3	8.3 Auslegung von Tankböden.....	6-2
6.4	9 Auslegung von Tankmänteln.....	6-4
6.4.1	9.1 Auslegungs- und Prüfspannung.....	6-4
6.4.2	9.2 Last durch Lagergut.....	6-7
6.4.3	9.3 Wind- und Unterdrucklasten.....	6-8
6.4.4	9.4 Anordnung der Mantelbleche.....	6-11
6.5	10 Auslegung von Festdächern.....	6-12
6.5.1	10.1 Lasten.....	6-12
6.5.2	10.2 Dacharten.....	6-12
6.5.3	10.3 Dachbleche mit Tragkonstruktion.....	6-13
6.5.4	10.4 Dachbleche ohne Tragkonstruktion (Membrandächer).....	6-14
6.5.5	10.5 Druckbeanspruchte Fläche der Mantel-Dach-Verbindung.....	6-15
6.6	Vorkehrungen zur Erdbebensicherheit von Lagertanks.....	6-16
6.6.1	G.3 Widerstand gegen Kippen.....	6-16
6.6.2	G.4 Druckbelastung des Mantels.....	6-17
6.6.3	G.5 Tankverankerung.....	6-20
6.7	Auslegung von Tanks mit Dächern mit Reißnaht.....	6-25
6.7.1	K.1 Allgemeines.....	6-25
6.7.2	K.2 Konstruktion.....	6-26
6.7.3	K.4 Auslegungsregeln.....	6-26

6.2 *Abbildungsverzeichnis*

Abbildung 1: Mit Bodenblech bis zum Rand	6-3
Abbildung 2: Mit Bodenrandblech am Umfang	6-3
Abbildung 3: Schnitt D-D, Bodenrandbleche.....	6-4
Abbildung 4: Festgelegte Mindestnenndicke der Mantelbleche	6-6
Abbildung 5: Mindestabmessungen der Winkel	6-10
Abbildung 6: Anordnung von Mantelblechen	6-12
Abbildung 7: Typische druckbeanspruchte Flächen an der Mantel-Dach-Verbindung	6-16
Abbildung 8: Druckkraft W_b	6-19
Abbildung 9: Typische Ausführung eines Ankerbandes	6-22
Abbildung 10: Typische Ausführung einer Ankerschraube mit Einzelstütze.....	6-23
Abbildung 11: Typische Ausführung einer Ankerschraube mit durchgehendem Stützring.....	6-24
Abbildung 12: Merkmale von Kegel- oder Kugeldächern	6-25
Abbildung 13: Kegel und Kugeldach.....	6-25
Abbildung 14: Verbindungen zwischen Dach und oberem Mantelschuss: Dach am Dacheckring angeschweißt	6-28
Abbildung 15: Verbindungen zwischen Dach und oberem Mantelschuss: Dach am oberem Mantelschuss angeschweißt	6-29

Anmerkung: Die zweite Kapitelnummerierung zeigt den Abschnitt der Norm DIN EN 14015, aus welchem die Inhalte entnommen wurden

6.3 *8.3 Auslegung von Tankböden*

Böden von Tanks mit einem Durchmesser von mehr als 12,5 m sind mit Bodenrandblechen (siehe Abb. 2) auszuführen, deren Nenndicke e_a ohne Korrosionszuschlag nicht kleiner sein darf als:

a) der nach der folgenden Gleichung berechnete Wert:

$$e_a = 3,0 + e_1/3 \quad (1)$$

e_1 : Dicke des unteren Mantelschusses ohne Korrosionszuschlag, in mm;

b) 6 mm,

je nachdem, welcher Wert größer ist.

6. Auslegung und Herstellung von stehenden Behältern nach DIN EN 14015

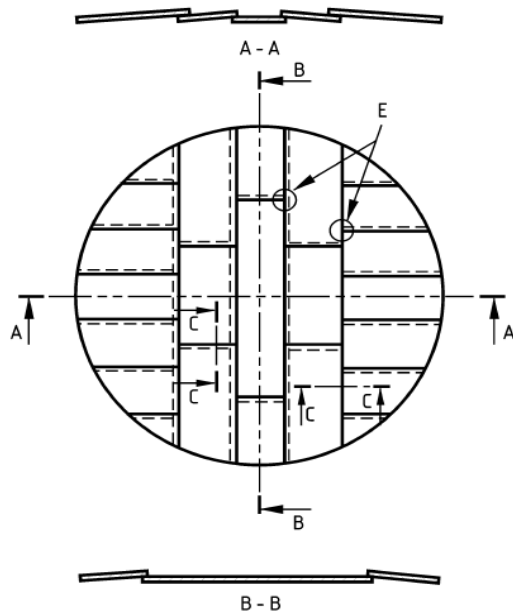


Abbildung 1: Mit Bodenblech bis zum Rand

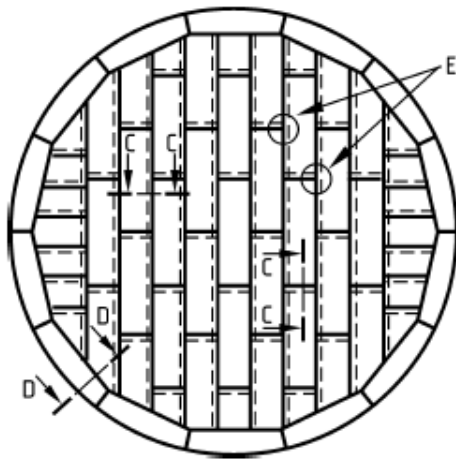


Abbildung 2: Mit Bodenrandblech am Umfang

Der Mindestabstand l_a (siehe Abb. 3) muss dem größeren der nachstehenden Werte entsprechen: nach der folgenden Gleichung:

$$l_a > \frac{240}{\sqrt{H}} e_a \quad (2)$$

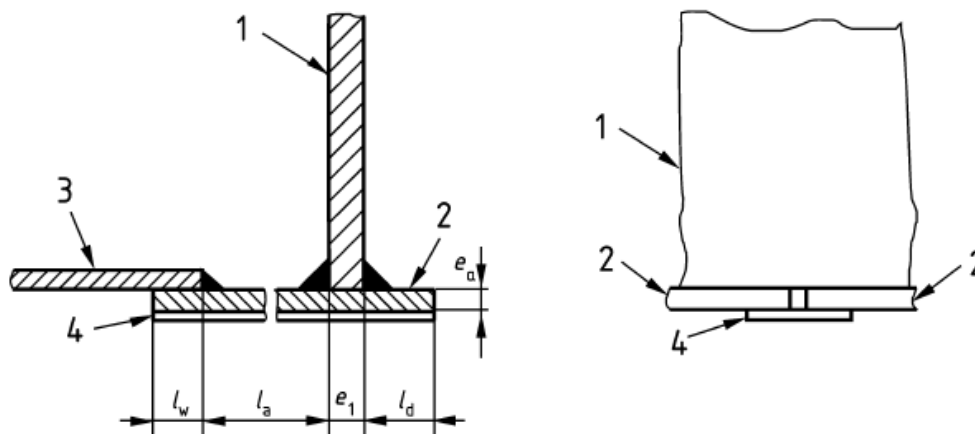
6. Auslegung und Herstellung von stehenden Behältern nach DIN EN 14015

e_a : Dicke des Bodenrandblechs, in mm;

H : maximale Auslegungsfüllhöhe des Lagerguts, in m

b) 500 mm.

Der Abstand zwischen Außenseite des Mantelblechs und Außenkante der Boden- oder Bodenrandbleche, l_d , darf 50 mm nicht unterschreiten und 100 mm nicht überschreiten (siehe Abb. 3).



- 1 Mantelblech
- 2 Bodenrandblech
- 3 Bodenblech
- 4 Unterlage

Abbildung 3: Schnitt D-D, Bodenrandbleche

Der Mindestabstand zwischen den Vertikalstößen im untersten Schuss und den Verbindungsstößen der Bodenrandbleche muss zehnmal größer sein als die Dicke des untersten Schussbleches.

6.4 9 Auslegung von Tankmänteln

6.4.1 9.1 Auslegungs- und Prüfspannung

6. Auslegung und Herstellung von stehenden Behältern nach DIN EN 14015

Bei der Berechnung von Tanks mit einer höchsten Auslegungswandtemperatur ≤ 100 °C sind die zutreffenden Werte aus a) und b) für die Spannungen zu verwenden:

a) Bei Werkstoffen mit einer maximalen Auslegungsspannung von 260 N/mm^2 muss die höchstzulässige Auslegungsspannung in den Mantelblechen zwei Drittel der Streckgrenze betragen.

b) Bei Werkstoffen mit einer maximalen Auslegungsspannung von 260 N/mm^2 muss die höchstzulässige Prüfspannung in den Mantelblechen 75 % der Streckgrenze betragen.

Wenn die höchste Auslegungswandtemperatur von unlegierten Stählen über 100 °C liegt, muss die Auslegungsspannung zwei Drittel des bescheinigten Wertes der Streckgrenze (0,2-%-Dehngrenze) des Stahls bei der höchsten Auslegungswandtemperatur betragen.

In den Berechnungen der erforderlichen Mantelblechdicke ist ein Schweißnahtfaktor von 1,0 zu berücksichtigen.

Der Schweißnahtfaktor bestimmt, welche Berechnungsspannung angewendet werden kann. Z. B. bei einem Faktor 1,0 geht man davon aus, dass die Schweißnaht vollwertig ist, d. h. wie der Grundwerkstoff berechnet werden kann. Das setzt natürlich voraus, dass die Schweißnaht nicht durch irgendwelche negativen Einflüsse geschwächt wird (z. B. innere und äußere Schweißnahtfehler, innere Spannungen).

Die festgelegte Mantelblechdicke darf die in Abb. 4 festgelegten Nenndicken nicht unterschreiten.

6. Auslegung und Herstellung von stehenden Behältern nach DIN EN 14015

Tankdurchmesser D m	Festgelegte Mindestnenndicke der Mantelbleche e	
	Unlegierte Stähle mm	Nichtrostende Stähle mm
$D < 4$	5	2
$4 \leq D < 10$	5	3
$10 \leq D < 15$	5	4
$15 \leq D < 30$	6	5
$30 \leq D < 45$	8	6
$45 \leq D < 60$	8	—
$60 \leq D < 90$	10	—
$90 \leq D$	12	—

Bei Tanks aus nichtrostendem Stahl mit einem Durchmesser von ≥ 45 m muss die Mindestmanteldicke vereinbart werden (siehe A.2).

ANMERKUNG 1 Diese festgelegten Anforderungen an die Dicke sind für die bauliche Ausführung erforderlich und können daher Korrosionszuschläge enthalten, vorausgesetzt, die Berechnung zeigt, dass der Mantel im korrodierten Zustand standsicher nach 9.2 ist.

ANMERKUNG 2 Bei Tanks mit großem Durchmesser und geringer Höhe kann der unterste Mantelschuss verhältnismäßig dünnwandig sein, sodass die Stabilität unter Berücksichtigung der vertikalen Lasten und möglicher ungleichmäßiger Setzung der Gründung überprüft werden sollte.

Abbildung 4: Festgelegte Mindestnenndicke der Mantelbleche

Die festgelegte Dicke eines Mantel- oder Verstärkungsblechs darf 40 mm in keinem Fall überschreiten.

Unabhängig vom verwendeten Werkstoff darf in keinem Fall die Dicke eines Mantelschusses die des jeweils darüber liegenden Schusses unterschreiten; ausgenommen hiervon ist der Bereich des Dacheckrings.

Die Mindestabmessung eines Mantelblechs in Umfangsrichtung muss 1 m betragen.

6.4.2 9.2 Last durch Lagergut

Berechnung der Manteldicke : Annahme bis zur Manteloberkante gefüllt

Der Berechnung müssen die Auslegungsdichte des Lagerguts und des Prüfmediums zugrunde liegen.

Größerer Wert maßgebend:

$$e_c = \frac{D}{20S} \{98W(H_c - 0,3) + p\} + c \quad (3)$$

$$e_t = \frac{D}{20S_t} \{98W_t(H_c - 0,3) + p_t\} \quad (4)$$

Dabei ist

c	Korrosionszuschlag, in mm,
D	Tankdurchmesser, in m;
e_c	erforderliche Manteldicke für Auslegungsbedingungen, in mm;
e_t	erforderliche Manteldicke unter Prüfbedingungen, in mm;
H_c	Abstand von der Unterkante des betrachteten Schusses zu der in 9.2.1 definierten Höhe, in m;
p	Auslegungsdruck (bei Tanks mit einem Auslegungsdruck ≤ 10 mbar vernachlässigbar), in mbar;
p_t	Prüfdruck (gleich dem Auslegungsdruck; bei Auslegungsdrücken > 10 mbar gleich dem 1,1fachen des Auslegungsdrucks), in mbar;
S	zulässige Auslegungsspannung (siehe 9.1.1.1), in N/mm^2 ;
S_t	zulässige Prüfspannung (siehe 9.1.1.2), in N/mm^2 ;
W	maximale Auslegungsdichte des Lagerguts unter Lagerbedingungen, in kg/l ;
W_t	maximale Auslegungsdichte des Prüfmediums, in kg/l .

Umfangsspannung jedes Mantelschusses ist 0,3 m über der Mittellinie der horizontalen Schweißnaht zu berechnen.

6. Auslegung und Herstellung von stehenden Behältern nach DIN EN 14015

Unter der Voraussetzung, dass die Mantelschüsse über und unter der betrachteten Naht aus Werkstoffen mit unterschiedlichen festgelegten Mindeststreckgrenzen und Mindestzugfestigkeiten bestehen und:

$$\frac{H_U - 0,3}{S_U} \geq \frac{H_L - 0,3}{S_L} \quad (5)$$

wobei

H_L Abstand der Unterkante des unteren Schusses zu der in 9.2.1 definierten Höhe, in m;

H_U Abstand der Unterkante des oberen Schusses zu der in 9.2.1 definierten Höhe, in m;

S_L zulässige Auslegungsspannung im unteren Schuss, in N/mm²;

S_U zulässige Auslegungsspannung im oberen Schuss, in N/mm²

ist die Dicke des oberen Schusses nach der folgenden modifizierten Gleichung zu berechnen:

$$e_c = \frac{D}{20S_c}(98WH_c + p) + c; \quad e_t = \frac{D}{20S_t}(98W_tH_c + p_t) \quad (6)$$

6.4.3 9.3 Wind- und Unterdrucklasten

6.4.3.1 9.3.1 Versteifungsringe

Offene Tanks müssen mit einem Hauptversteifungsring ausgestattet sein, um die Rundheit des Tanks auch unter Windlasten sicherzustellen. Der Hauptversteifungsring ist an oder nahe der Oberkante des obersten Schusses und vorzugsweise an der Außenseite des Tankmantels anzubringen.

Bei Festdachtanks ist die Dachkonstruktion als ausreichende Versteifung des oberen Mantelrandes anzusehen; ein Hauptversteifungsring wird daher nicht für erforderlich gehalten.

6.4.3.2 9.3.2 Auslegung des Hauptversteifungsring (Windverband)

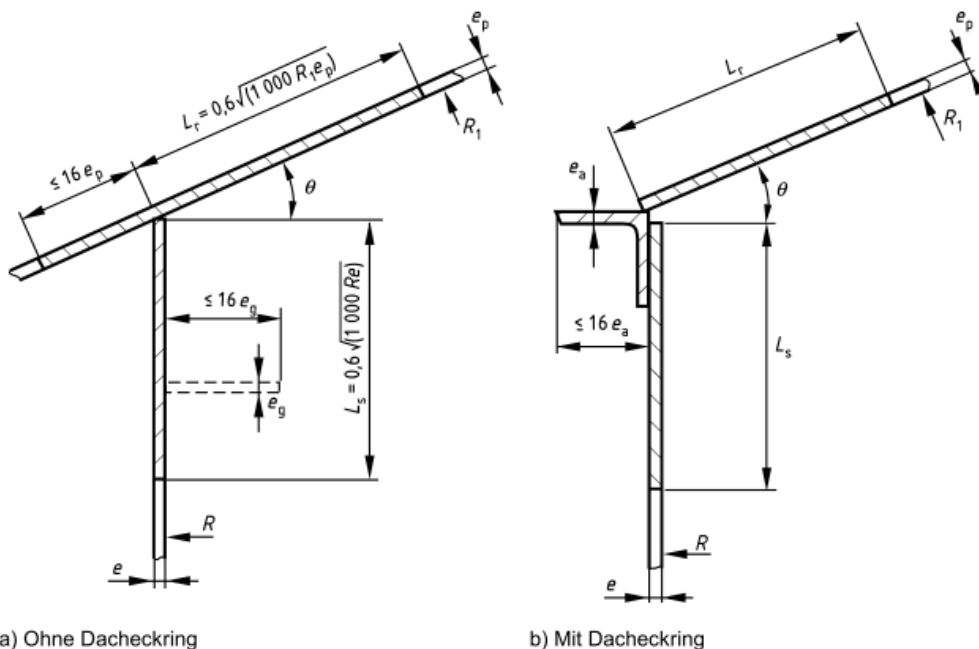
Das erforderliche Mindestwiderstandsmoment Z , in cm³, des Hauptversteifungsring muss mit folgender Gleichung ermittelt werden:

6. Auslegung und Herstellung von stehenden Behältern nach DIN EN 14015

$$Z = 0,058 D^2 H_f \frac{V_w^2}{45^2} \quad (7)$$

Dabei ist

- D Tankdurchmesser (ab einem Durchmesser von 60 m ist bei der Ermittlung des Widerstandsmoments $D = 60$ zu verwenden), in m;
- H_f Höhe des Tankmantels einschließlich eines jeglichen Freibords über der maximalen Füllhöhe (siehe 9.2.1), in m;
- V_w Windböengeschwindigkeit nach 7.2.10, in m/s.



Legende

- e Manteldicke, in mm;
- e_a Dicke des Dacheckrings (siehe Tabelle 18), in mm;
- e_g Dicke des waagerechten Ringträgers, in mm;
- e_p Dicke des Dachblechs am Druckring, in mm;
- L_r wirksame Dachlänge, in mm;
- L_s wirksame Mantellänge, in mm;
- R Radius des Tankmantels, in m;
- R_1 Krümmungsradius des Daches, in m, (bei Kegeldächern = $R/\sin \theta$)

Das Widerstandsmoment des Hauptversteifungsrings muss auf der Geometrie der verwendeten Teile basieren. Es ist der Tankmantel unterhalb und, falls anwendbar, oberhalb der Versteifungsring-Mantel-Verbindung mit einer mitwirkenden Breite von höchstens dem 16fachen der Mantelblechdicke ohne Korrosionszuschlag bei der Berechnung des Widerstandsmoments zu berücksichtigen.

6.4.3.3 9.3.3 Auslegung von Zusatzversteifungsringen (Windverbänden)

Die Abmessungen der Winkel für zusätzliche Versteifungsringe hängt nicht von den Auslegungslasten ab, sondern muss hinsichtlich des Tankdurchmessers in Übereinstimmung mit den Werten in Abb.5 ermittelt werden.

Tankdurchmesser D m	Mindestabmessungen der Winkel mm × mm × mm
$D \leq 20$	100 × 65 × 8
$20 < D \leq 36$	120 × 80 × 10
$36 < D \leq 48$	150 × 90 × 10
$48 < D$	200 × 100 × 12

ANMERKUNG Andere Ausführungen sind bei äquivalenten Widerstandsmomenten zulässig.

Abbildung 5: Mindestabmessungen der Winkel

Die Anordnung zusätzlicher Versteifungsringe in der Höhe ist zu berechnen, indem zuerst die Höhe eines vollständigen Tankmantels mit äquivalenter Stabilität, gleichem Durchmesser und gleicher Dicke wie der oberste Mantelschuss ermittelt wird. Aus der Berechnung dieses äquivalenten Tankmantels in Verbindung mit den in der Auslegung zu berücksichtigenden Wind- und Unterdrucklasten ist die erforderliche Anzahl zusätzlicher Versteifungsringe zu ermitteln, die am obersten Mantelschuss oder einem Schuss gleicher Dicke anzuordnen sind. Werden die Ringe nicht an einem dieser Mantelschüsse angebracht, ist ihre tatsächliche Lage dadurch zu bestimmen, dass die äquivalenten Werte der Mantelschusshöhen wieder in die tatsächlichen Werte umgerechnet werden.

In den Berechnungen sind die Werte für die Windgeschwindigkeit nach 7.2.10 zu verwenden.

Für den inneren Unterdruck (p_v) sind bei der Auslegung von Zusatzversteifungsringen folgende Werte zu verwenden:

- Offene Tanks: 5 mbar unabhängig von der Auslegungswindgeschwindigkeit;
- Festdachtanks: innerer Auslegungsunterdruck (siehe Tabelle 3).

6. Auslegung und Herstellung von stehenden Behältern nach DIN EN 14015

Für die Berechnung von Zusatzversteifungsrings für Tanks mit einem inneren Auslegungsunterdruck ≤ 5 mbar sind folgende Gleichungen zu verwenden:

$$H_e = h \left(\frac{e_{\min}}{e} \right)^{5/2} \quad (8)$$

$$H_E = \sum H_e \quad (9)$$

$$K = \frac{95\,000}{3,563 V_w^2 + 580 p_v} \quad (10)$$

$$H_p = K \left(\frac{e_{\min}^5}{D^3} \right)^{1/2} \quad (11)$$

Dabei ist

- D Tankdurchmesser, in m;
- e_{\min} Dicke des obersten Schusses (falls zutreffend im korrodierten Zustand), in mm;
- e Dicke der einzelnen Schüsse (falls zutreffend im korrodierten Zustand), in mm;
- h Höhe der einzelnen Schüsse jeweils unter einem Hauptversteifungsring, in m;
- H_e äquivalente stabile Höhe jedes Schusses bei e_{\min} , in m;
- H_E äquivalente stabile Gesamthöhe des Mantels bei e_{\min} , in m;
- H_p höchstzulässiger Abstand zusätzlicher Versteifungsringe an Mänteln mit Mindestdicke, in m;
- K Rechenbeiwert;
- p_v innerer Auslegungsunterdruck, in mbar (siehe Tabelle 3);
- V_w Windböengeschwindigkeit nach 7.2.10, in m/s.

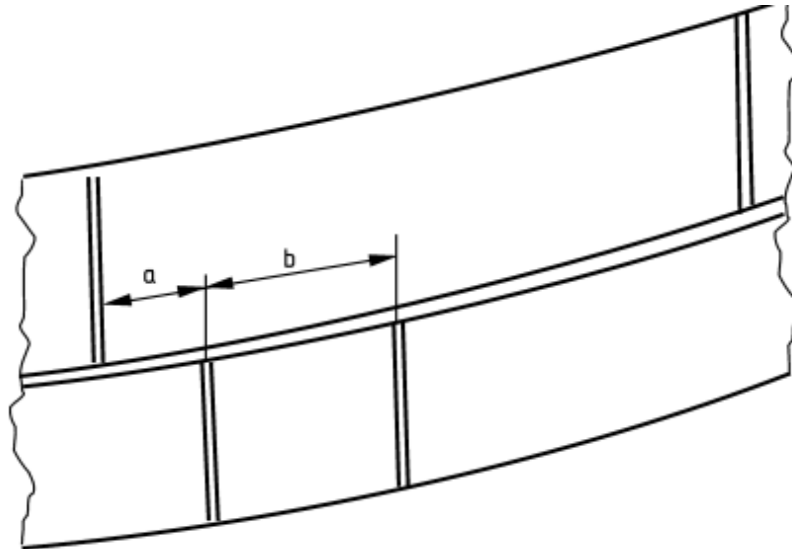
6.4.4 9.4 Anordnung der Mantelbleche

Der Tank ist so auszulegen, dass alle Schüsse senkrecht angeordnet sind. Senkrechte Schweißnähte in benachbarten Schüssen müssen folgende Mindestabstände haben (siehe Abb. 6 Legende a):

Mantelbleche mit einer Dicke < 5 mm 100 mm

6. Auslegung und Herstellung von stehenden Behältern nach DIN EN 14015

Mantelbleche mit einer Dicke $> 5 \text{ mm}$ 300 mm



Legende

- a Mindestabstand vertikaler Schweißnähte in angrenzenden Mantelschüssen (siehe 9.4)
- b Mindestabmessung eines Mantelblechs in Umfangsrichtung

Abbildung 6: Anordnung von Mantelblechen

6.5 10 Auslegung von Festdächern

6.5.1 10.1 Lasten

Festdächer sind für die in 7.2 festgelegten Lasten einschließlich Windsogwirkungen auszulegen.

6.5.2 10.2 Dacharten

Es ist eine der folgenden beiden Dacharten festzulegen:

- a) Freitragendes Kegel- oder Kugeldach mit oder ohne Tragkonstruktion oder
- b) Dach mit Stützen.

Die Neigung eines freitragenden Kegeldachs muss **1:5** betragen.

6. Auslegung und Herstellung von stehenden Behältern nach DIN EN 14015

Der Krümmungsradius bei einem Kugeldach muss zwischen dem **0,8- und 1,5fachen** des Tankdurchmessers betragen

Die Neigung eines Daches mit Stützen muss **1:16** betragen.

6.5.3 10.3 Dachbleche mit Tragkonstruktion

Tragkonstruktionen für Kegel- und Kugeldächer (Gespärre) sowie Dächer mit Stützen sind nach ENV 1993-1-1 auszulegen.

Die Abstände zwischen den tragenden Elementen des Dachblechs sind bei Kegeldächern so zu wählen, dass die Stützweite 2,0 m nicht übersteigt, wenn eine Kante des Dachblechs

durch den Dacheckring gestützt wird. Ist diese Abstützung nicht gegeben, darf die Stützweite nicht mehr als 1,7 m betragen.

Bei Kugeldächern ist in Übereinstimmung mit ENV 1993-4-2 eine Vergrößerung des Abstandes auf 3,25 m zulässig.

Dachbleche müssen mit einer durchlaufenden Kehlnaht mit dem Dacheckring des Tanks verschweißt werden. Dachbleche dürfen nicht an der Tragkonstruktion des Dachs befestigt sein, wenn eine Reißnaht gefordert ist.

Die Reißnaht in der Mantel-Dach-Verbindung muss mit Anhang K übereinstimmen.

Die festgelegte Mindestdicke aller Dachbleche darf ausschließlich Korrosionszuschlag nicht weniger betragen als:

5 mm für unlegierte Stähle und

3 mm für nichtrostende Stähle.

Die festgelegte Mindestdicke der für die Konstruktion der tragenden Elemente des Daches verwendeten Werkstoffe darf nicht weniger betragen als:

5 mm für unlegierte Stähle und

3 mm für nichtrostende Stähle.

6. Auslegung und Herstellung von stehenden Behältern nach DIN EN 14015

Die Bleche müssen überlappend angeordnet und mit durchlaufender Kehlnaht an der Außenseite verschweißt werden. Die Überlappung muss mindestens 25 mm betragen, sofern nicht anders festgelegt

Der Schweißnahtfaktor, J , muss entweder

1,0 bei Stumpfnähten;

0,35 bei Überlappverbindungen mit einseitiger Kehlnaht;

0,5 bei Überlappverbindungen mit beidseitiger Kehlnaht betragen.

Alle Tragkonstruktionen des Daches sind in der Ebene der Dachoberfläche wie folgt zu versteifen.

a) Querverbände in der Ebene der Dachoberfläche sind bei Dächern mit einem Durchmesser von mehr als 15 m in mindesten zwei Feldern, d. h. zwischen zwei Paaren benachbarter Träger, vorzusehen. Die Verbände sind in gleichmäßigen Abständen am gesamten Behälterumfang anzuordnen.

b) Zusätzliche senkrechte Ringversteifungen sind nur bei Dächern mit Fachwerktragkonstruktionen in einer annähernd senkrechten Ebene zwischen den Trägern wie folgt vorzusehen:

1) bei Dächern mit Durchmessern über 15 m und bis einschließlich 25 m: eine Ringversteifung;

2) bei Dächern mit Durchmessern über 25 m: zwei Ringversteifungen.

6.5.4 10.4 Dachbleche ohne Tragkonstruktion (Membrandächer)

Alle Membrandächer sind aus stumpfverschweißten oder beidseitig kehlnahtverschweißten überlappenden Blechen zu konstruieren.

Membrandächer sind gegen den Auslegungsüberdruck und gegen Beulen auszulegen.

6. Auslegung und Herstellung von stehenden Behältern nach DIN EN 14015

Gegen Überdruck

$$e_p = \frac{p R_1}{20SJ} \quad \text{bei kugelförmigen Dächern} \quad (12)$$

$$e_p = \frac{p R_1}{10SJ} \quad \text{bei kegelförmigen Dächern} \quad (13)$$

gegen Beulen

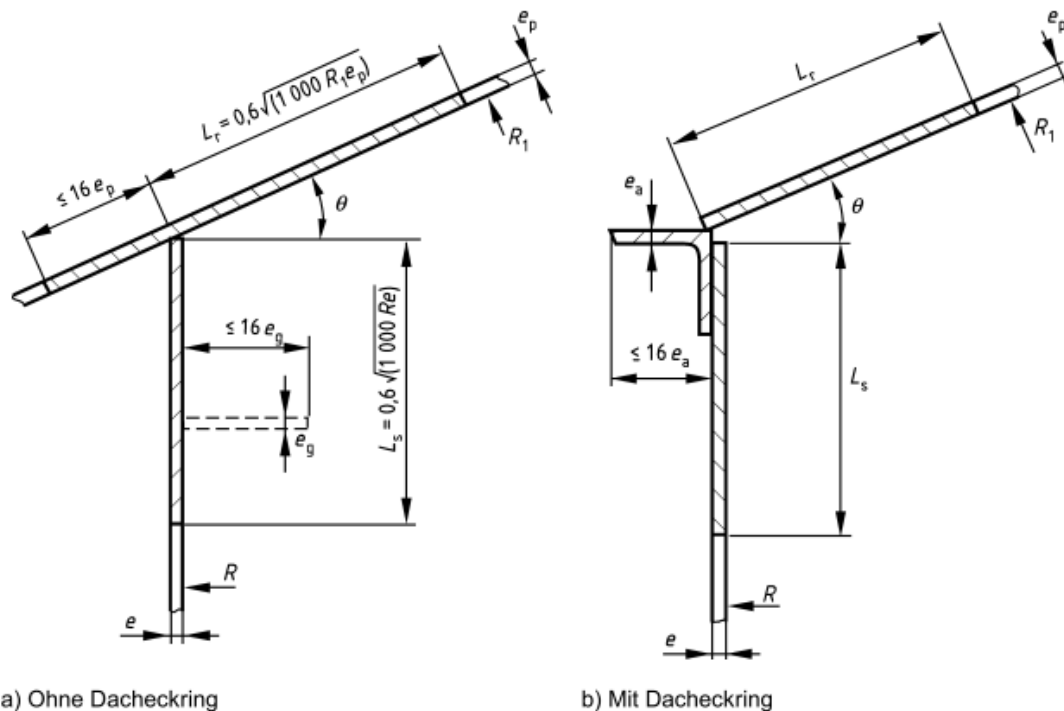
$$e_p = 40 R_1 \sqrt{\frac{10 p_e}{E}} \quad (14)$$

Dabei ist

- e_p Dicke der Dachbleche ohne Korrosionszuschlag, in mm;
- E Elastizitätsmodul, in N/mm^2 ;
- J Schweißnahtfaktor nach 10.3.6;
- P Auslegungsdruck (siehe Tabelle 3), in mbar;
- p_e äußere Belastung plus Eigengewicht der Bleche plus Auslegungsunterdruck, falls zutreffend, in kN/m^2 ;
- R_1 Krümmungsradius des Daches, in m (bei Kegeldächern gilt: $R_1 = R/\sin\theta$) (siehe Bild 8);
- S zulässige Auslegungsspannung (siehe 10.3.6), in N/mm^2 .

6.5.5 10.5 Druckbeanspruchte Fläche der Mantel-Dach-Verbindung

Die druckbeanspruchte Fläche ist der Bereich an der Verbindung zwischen Mantel und Dach, der den Kräften durch den Druck standhalten muss. Die maximalen Abmessungen der druckbeanspruchten Fläche müssen den schraffierten Flächen in Abb. 7 entsprechen.



Legende

- e Manteldicke, in mm;
- e_a Dicke des Dacheckrings (siehe Tabelle 18), in mm;
- e_g Dicke des waagerechten Ringträgers, in mm;
- e_p Dicke des Dachblechs am Druckring, in mm;
- L_r wirksame Dachlänge, in mm;
- L_s wirksame Mantellänge, in mm;
- R Radius des Tankmantels, in m;
- R_1 Krümmungsradius des Daches, in m, (bei Kegeldächern = $R/\sin \theta$)

Abbildung 7: Typische druckbeanspruchte Flächen an der Mantel-Dach-Verbindung

6.6 Vorkehrungen zur Erdbebensicherheit von Lagertanks

6.6.1 G.3 Widerstand gegen Kippen

6.6.1.1 G.3.1 Tankinhalt

Widerstand gegen das Kippmoment ist am unteren Rand des Tankmantels durch die Eigenmasse und die Verankerung des Tankmantels oder bei unverankerten Tanks durch das Gewicht eines Teils des am Tankmantel anliegenden Tankinhalts gegeben. Bei unverankerten Tanks ist der Teil des Inhalts, der dem Kippen entgegenwirkt, abhängig von der Breite des Bodenblechs unter dem Mantel, das sich von der Gründung abhebt, und wird wie folgt berechnet:

6. Auslegung und Herstellung von stehenden Behältern nach DIN EN 14015

$$W_L = 0,1 t_{ba} \sqrt{R_{eb} W_s H_T} \quad (\text{G.4})$$

wobei W_L nicht größer sein sollte als $0,2 W_s H_T D$.

Dabei ist

R_{eb} festgelegte Mindeststreckgrenze des Bodenblechs unter dem Tankmantel, in N/mm^2 ;

W_L maximal wirksame Kraft aus dem Tankinhalt, die dem Kippen entgegenwirkt, in kN je Meter Mantelumfang;

W_s maximale spezifische Dichte des Tankinhalts unter Lagerbedingungen, die nicht weniger als $1,0 \text{ kg/l}$ betragen darf;

t_{ba} Dicke des Bodenblechs unter dem Tankmantel, in mm.

6.6.1.2 G.3.2 Bodenblech

Die Dicke des Bodenblechs unter dem Mantel t_{ba} sollte die Dicke des unteren Mantelschusses nicht überschreiten. Ist das Bodenblech unter dem Mantel dicker als die übrigen Bodenbleche, darf die vom Mantel radial nach innen gemessene Breite des dickeren Bleches unter dem Mantel in Metern nicht kleiner sein als:

$$0,1744 \frac{W_L}{W_s H_T} \quad (\text{G.5})$$

6.6.2 G.4 Druckbelastung des Mantels

6.6.2.1 G.4.1 Unverankerte Tanks

Die maximale Druckkraft in Längsrichtung am unteren Rand des Mantels W_b wird wie folgt berechnet:

a) Für $\frac{M}{D^2(W_L + W_t)} \leq 0,785$:

$$W_b = W_t + \frac{1,273M}{D^2} \quad (\text{G.6})$$

6. Auslegung und Herstellung von stehenden Behältern nach DIN EN 14015

b) Für $\frac{M}{D^2(W_L + W_t)} > 0,785$ und $\leq 1,5$: (G.7)

W_b lässt sich aus dem Wert des Parameters $\frac{W_b + W_L}{W_t + W_L}$ aus Bild G.4 berechnen.

Dabei ist

W_b maximale Druckkraft am Mantel in Längsrichtung, in kN je Meter Mantelumfang;

W_t maximale Kraft durch den Tankmantel und den vom Mantel gestützten Teil des Dachs, in kN je Meter Mantelumfang.

c) Bei $\frac{M}{D^2(W_t + W_L)} > 1,5$ oder $W_b/t_{bs} > F_a$ (bei Berechnung nach dem in G.4.3 beschriebenen Verfahren), ist der Tank instabil und muss nach einem der folgenden Verfahren stabilisiert werden:

- i) Erhöhen der Dicke des Bodenblechs unter dem Mantel t_{ba} und damit von W_L , vorausgesetzt, die in G.3.1 und G.3.2 angegebenen Grenzen werden nicht überschritten.
- ii) Erhöhen der Mantelwanddicke t_{bs} .
- iii) Verändern der Tankproportionen durch Erhöhen des Durchmessers und Verringern der Höhe.
- iv) Verankerung des Tanks nach G.5.

6.6.2.2 G.4.2 Verankerte Tanks

Die maximale Druckkraft am unteren Rand des Mantels W_b , in kN je Meter Mantelumfang, wird wie folgt berechnet:

$$W_b = W_t + \frac{1,273M}{D^2} \quad (G.8)$$

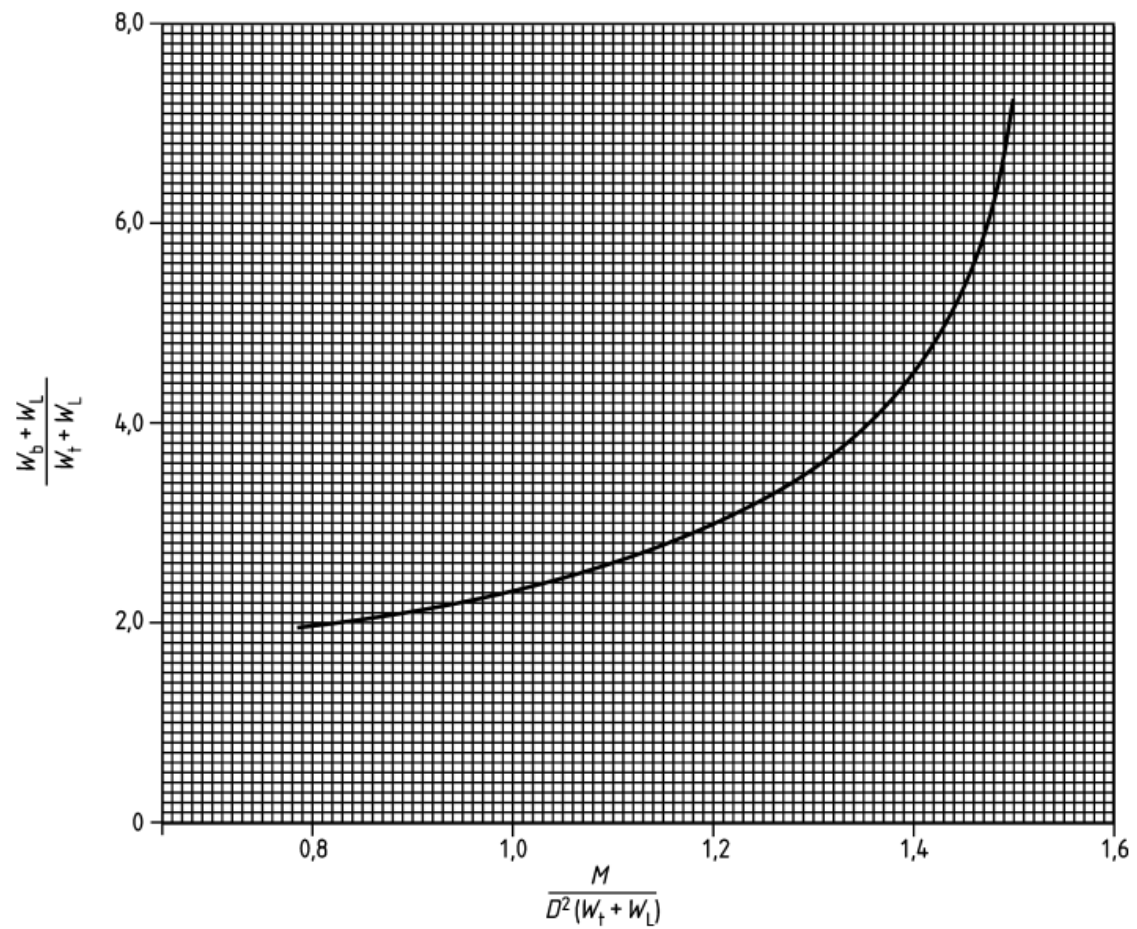


Abbildung 8: Druckkraft W_b

6.6.2.3 G.4.3 Zulässige Druckbelastung des Mantels

Die maximale Druckspannung im Mantel W_b/t_{bs} , in N/mm^2 , sollte die zulässige Spannung, F_a , in N/mm^2 , nicht überschreiten, die wie folgt berechnet wird:

6. Auslegung und Herstellung von stehenden Behältern nach DIN EN 14015

$$\text{a) Für } \frac{W_s H_T D^2}{t_{bs}^2} \geq 44 \quad F_a = 83 \frac{t_{bs}}{D} \quad (\text{G.9})$$

$$\text{b) Für } \frac{W_s H_T D^2}{t_{bs}^2} < 44 \quad F_a = 33 \frac{t_{bs}}{D} + 7,5 \sqrt{W_s H_T} \quad (\text{G.10})$$

Dabei ist

t_{bs} Dicke des unteren Mantelschusses ohne Korrosionszuschlag, in mm;

F_a zulässige Druckspannung in Längsrichtung im Mantel, in N/mm^2 . Die Gleichungen für F_a in a) und b) berücksichtigen die Wirkung des Innendrucks durch den Tankinhalt;

R_{es} festgelegte Mindeststreckgrenze des unteren Mantelschusses, in N/mm^2 .

Der Wert von F_a sollte keinesfalls $0,5 R_{es}$ überschreiten.

6.6.2.4 G.4.4 Obere Mantelschüsse

Wenn die gegen das Kippmoment durch seismische Belastung berechnete Dicke des unteren Mantelschusses größer ist als die für den Flüssigkeitsdruck erforderliche Dicke, jeweils ohne Korrosionszuschlag, sollte die berechnete Dicke der darüber liegenden Mantelschüsse im gleichen Verhältnis erhöht werden, sofern das Kippmoment durch seismische Belastung und die resultierenden Spannungen an den unteren Rändern der oberen Mantelschüsse nicht in einer besonderen Untersuchung ermittelt werden.

6.6.3 G.5 Tankverankerung

6.6.3.1 G.5.1 Erforderliche Mindestverankerung

Wenn eine Verankerung des Tanks als erforderlich angesehen wird, sollte sie so ausgelegt werden, dass der Mindestwiderstand der Verankerung (in kN je Meter Mantelumfang) folgenden Wert hat:

$$\frac{1,273M}{D_2} - W_t \quad (\text{G.11})$$

Dieser Verankerungswiderstand ist zusätzlich zu dem Widerstand gegen inneren Auslegungsdruck bei Tanks mit niedrigem und hohem Druck zu berücksichtigen.

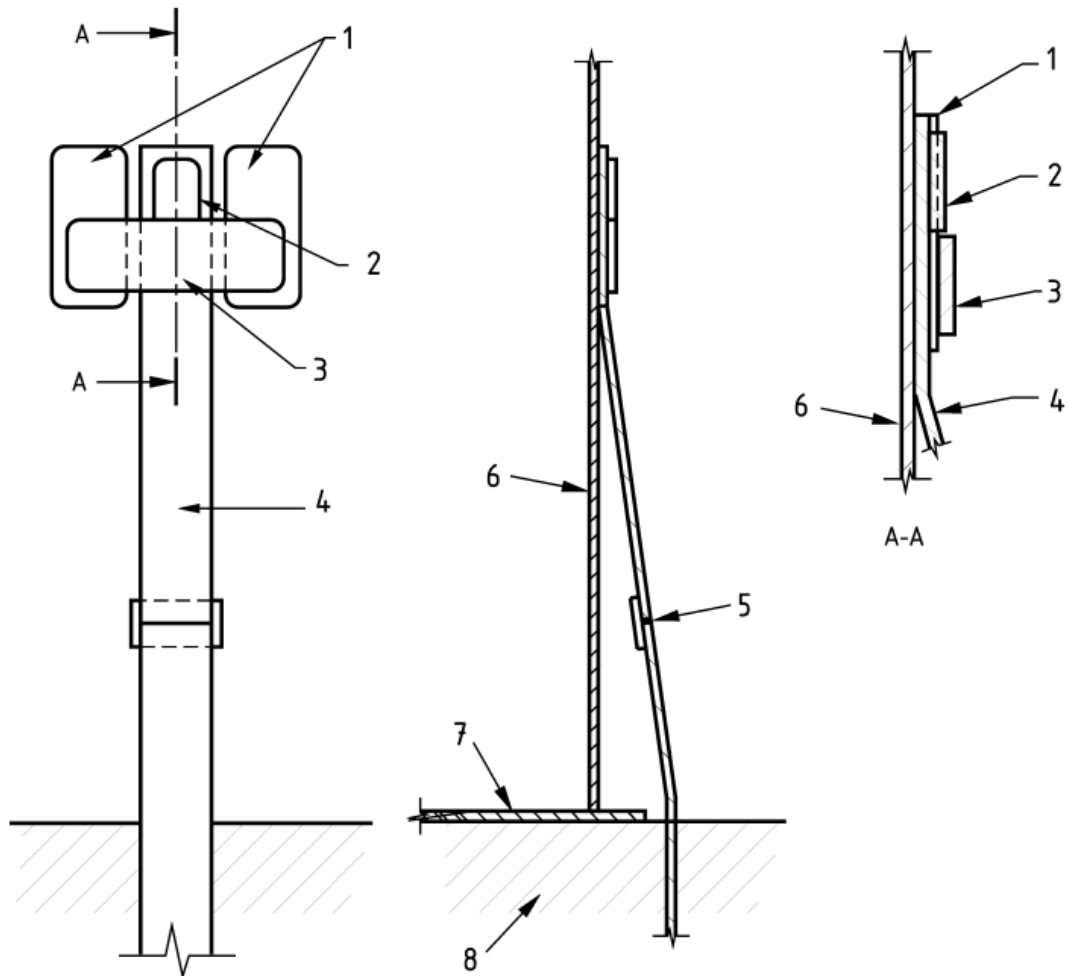
ANMERKUNG Seismische Last und Windlast sollten nicht als gleichzeitige Einwirkungen betrachtet werden.

6.6.3.2 G.5.2 Auslegung der Verankerung

Bei unzureichender Auslegung kann es bei verankerten Tanks zu Rissbildung kommen. Es sollte darauf geachtet werden, dass die Festigkeit der Befestigungsteile der Verankerung am Tankmantel größer ist als die erforderliche Mindeststreckgrenze der Verankerung, damit die Verankerung früher versagt als die Befestigungsteile. Erfahrungen zeigen, dass verankerte Tanks bei entsprechender Auslegung größere Festigkeitsreserven gegenüber seismischer Überbelastung haben als unverankerte Tanks.

Bei Tanks mit Durchmessern unter 15 m sollte der größte Abstand der Verankerungen 2 m nicht überschreiten.

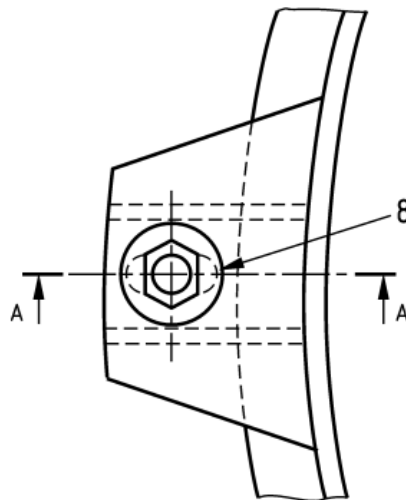
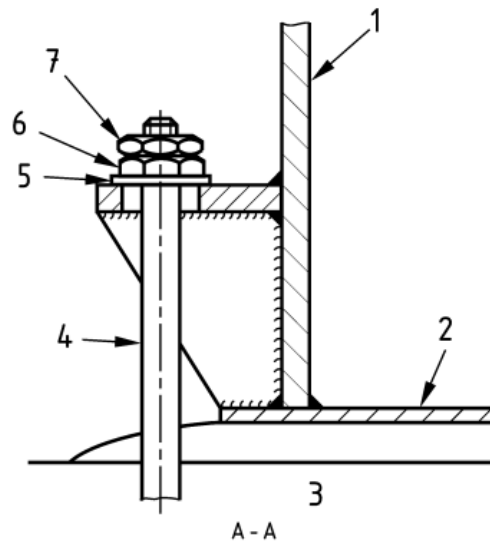
6.6.3.3 Ausführungsbeispiele für Tankverankerungen



Legende

- 1 Stützbleche am Mantel
- 2 Anschlagblech
- 3 Querblech
- 4 Ankerband
- 5 Stumpfstoß
- 6 Tankmantel
- 7 Tankboden
- 8 Gründung

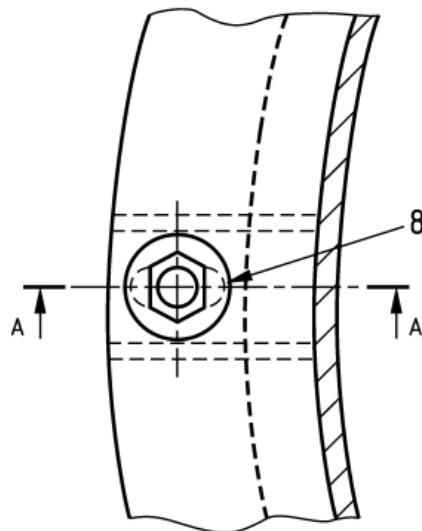
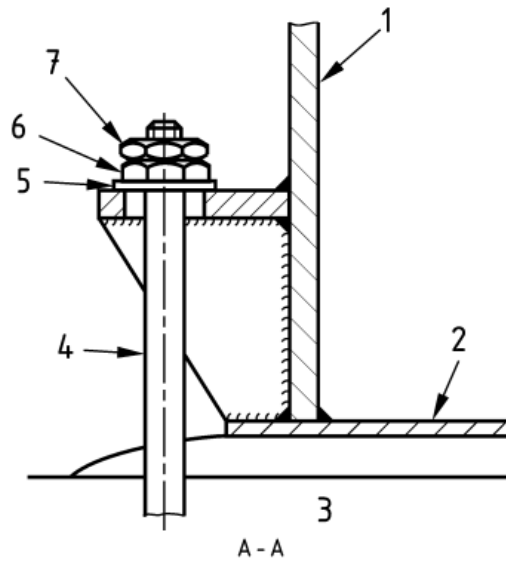
Abbildung 9: Typische Ausführung eines Ankerbandes



Legende

- 1 Tankmantel
- 2 Tankboden
- 3 Gründung
- 4 Ankerschraube
- 5 Spreizscheibe
- 6 Mutter
- 7 Sicherungsmutter
- 8 Langloch in der Stütze

Abbildung 10: Typische Ausführung einer Ankerschraube mit Einzelstütze



Legende

- 1 Tankmantel
- 2 Tankboden
- 3 Gründung
- 4 Ankerschraube
- 5 Spreizscheibe
- 6 Mutter
- 7 Sicherungsmutter
- 8 Langloch im Stützring

Abbildung 11: Typische Ausführung einer Ankerschraube mit durchgehendem Stützring

6.7 Auslegung von Tanks mit Dächern mit Reißnaht

6.7.1 K.1 Allgemeines

Unverankerte Festdach-Lagertanks mit selbsttragendem Kegel- oder Kugeldach ohne Gespärre oder säulengestütztem Kegeldach müssen mit Abb. 12 übereinstimmen.

Symbol	Beschreibung	Wert
D_F	Innendurchmesser des Tanks mit Dach mit Reißnaht	$\geq 5\ 000\ \text{mm}$
D_r	Durchmesser für Berechnungszwecke	
e_a	Bodenrandblechdicke (ohne Korrosionszuschlag)	$\geq 5\ \text{mm}$
e_{cyl}	Wanddicke des oberen Schusses (mit Korrosionszuschlag)	$\geq 5\ \text{mm}$
e_{cylb}	Wanddicke des unteren Schusses (ohne Korrosionszuschlag)	$\geq 5\ \text{mm}$
e_{ring}	Dicke des Verstärkungsringes (mit Korrosionszuschlag)	$\geq 5\ \text{mm}$
e_{roof}	Dachblechdicke (mit Korrosionszuschlag)	$\geq 5\ \text{mm}$
R_1	Radius des Kugeldachs (siehe Bild K.2)	
$\tan \theta$	Neigung des Kegeldachs (siehe Bild K.1) Oder Neigung der Tangente am Meridian an der Mantel-Dach-Verbindung bei einem Kugeldach (siehe Bild K.2) mit $0,8 D_r \leq R \leq 1,5 D_F$	1/16 bis 1/5

ANMERKUNG Für die in den Bildern K.3 a) und b) und K.4 a) bis d) gezeigten Anordnungen gilt $D_r = D_F$.

Abbildung 12: Merkmale von Kegel- oder Kugeldächern

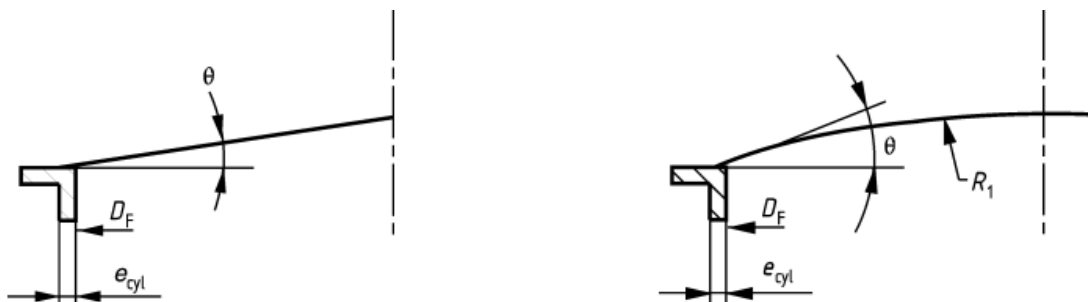


Abbildung 13: Kegel und Kugeldach

6.7.2 K.2 Konstruktion

Dachbleche dürfen nicht am Dachgespärre befestigt werden.

Ein mit dem Dacheckring verschweißter Bordwinkel zur Unterstützung der Dämmung oder anderer Anbauteile ist zulässig, wenn der Querschnitt dieses Winkels höchstens 15 % des Querschnitts des Dacheckrings beträgt.

Die Anforderungen in K.4 gelten für Tanks mit stumpfverschweißten Bodenrandblechen. Bei Tanks ohne Bodenrandbleche muss die in 8.4.3 festgelegte Mindestlänge der Bodenblechnaht von 150 mm auf 500 mm erhöht werden, damit der Tank mit einem Dach mit Reißnaht ausgestattet werden kann.

Wenn diese Anforderungen nicht erfüllt sind, ist das Verfahren zur Bewertung der Eignung des Tanks für ein Dach mit Reißnaht zu vereinbaren .

6.7.3 K.4 Auslegungsregeln

Die unverteiften Längen l_{cyl} und l_{cylb} , in Meter, des oberen und des unteren Schusses müssen die folgenden Anforderungen erfüllen:

$$l_{cyl} \geq 2,5 \sqrt{\frac{D e_{cyl}}{2000}} \quad \text{für den oberen Schuss } D_F \quad (K.1)$$

$$l_{cylb} \geq 2,5 \sqrt{\frac{D e_{cylb}}{2000}} \quad \text{für den unteren Schuss } D_F \quad (K.2)$$

Damit die Mantel-Dach-Verbindung eines unverankerten Tanks als Reißverbindung betrachtet werden kann,

müssen folgende Berechnungen durchgeführt werden:

a) Der Auslegungsversagensdruck des Dachs p_r , in mbar, muss wie folgt berechnet werden:

1) für Ausführungen nach Abb. 13

6. Auslegung und Herstellung von stehenden Behältern nach DIN EN 14015

$$p_r = \alpha_1 \left\{ \frac{\min(e_{\text{ring}}; e_{\text{roof}})}{D_r} \right\}^{\alpha_2} [\tan\theta]^{\alpha_3} \left\{ \frac{e_{\text{cyl}}}{D_F} \right\}^{\alpha_4} \quad (\text{K.3})$$

2) für Ausführungen nach Bild K.4

$$p_r = \alpha_1 \left\{ \frac{\min(e_{\text{cyl}}; e_{\text{roof}})}{D_r} \right\}^{\alpha_2} [\tan\theta]^{\alpha_3} \left\{ \frac{e_{\text{cyl}}}{D_F} \right\}^{\alpha_4} \quad (\text{K.4})$$

6. Auslegung und Herstellung von stehenden Behältern nach DIN EN 14015

Dabei ist

$$\alpha_1 = 2,175 \times 10^7$$

$$\alpha_2 = 1,253$$

$$\alpha_3 = 0,18$$

$$\alpha_4 = 0,14$$

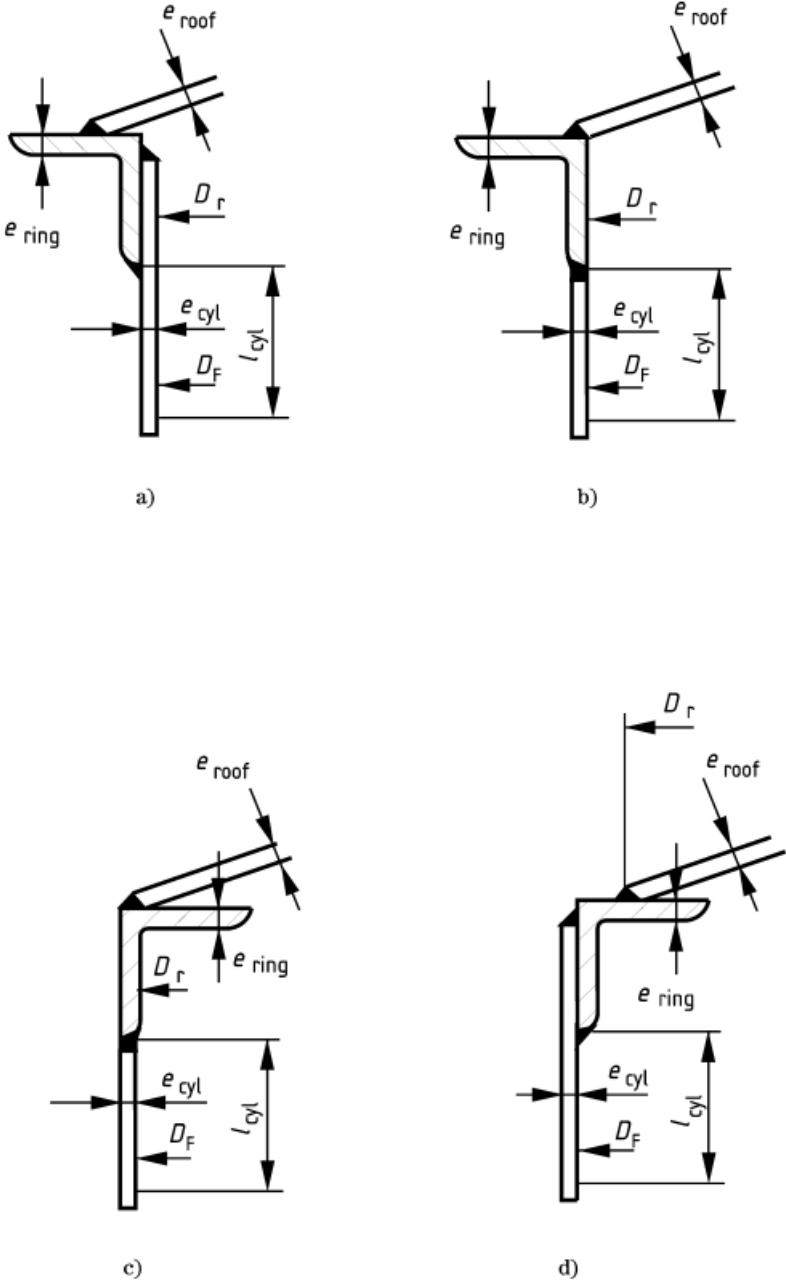


Abbildung 14: Verbindungen zwischen Dach und oberem Mantelschuss: Dach am Dacheckring angeschweißt

6. Auslegung und Herstellung von stehenden Behältern nach DIN EN 14015

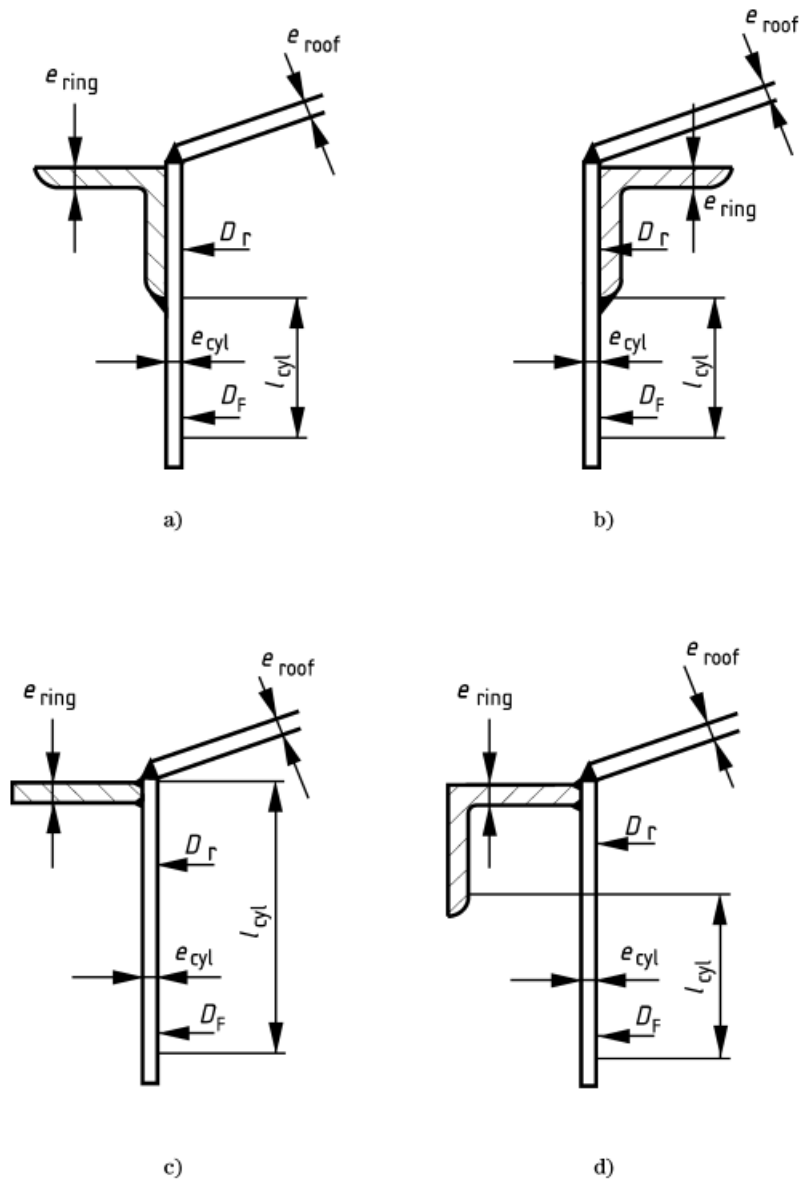


Abbildung 15: Verbindungen zwischen Dach und oberem Mantelschuss: Dach am oberem Mantelschuss angeschweißt

b) Der Auslegungsversagensdruck des Bodens p_b , in mbar, wird wie folgt berechnet werden:

$$p_b = (\beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2) \varepsilon \quad (\text{K.5})$$

Dabei ist

$$\varepsilon = \min \{ [(242,64X + 0,45) + 0,65Y^{10}]; 1 \} \quad (\text{K.6})$$

$$X = \frac{\min(e_{cylb}; e_a)}{D_f} \quad (\text{K.7})$$

6. Auslegung und Herstellung von stehenden Behältern nach DIN EN 14015

$$Y = \frac{\min(e_{\text{cylb}}; e_a)}{\max(e_{\text{cylb}}; e_a)} \quad (\text{K.8})$$

$$\beta_0 = 37,40 \quad (\text{K.9})$$

$$\beta_1 = 7,56 \times 10^5 \quad (\text{K.10})$$

$$\beta_2 = 1,48 \times 10^8 \quad (\text{K.11})$$

c) Bei diesen Auslegungsdrücken muss die folgende Gleichung erfüllt sein:

$$p_b \geq 2 \gamma p_r \quad (\text{K.12})$$

Dabei ist

γ vereinbarter Sicherheitsbeiwert (siehe A.2). ($1 < \gamma \leq 1.5$).

Teil II.

Tankberechnung

7. Definition des Beispieltanks

8. Berechnung der Erdbebenlasten nach Eurocode 8

Im folgenden Kapitel werden für den, von uns gewählten Tank, die entsprechenden Erdbebenlasten nach Eurocode 8 und dem Nationalen anhang ermittelt. Alle verwendeten Formeln und Gleichungen, sind aus den beiden angeführten Dokumenten zu entnehmen.

8. *Erdbebenberechnung*

Inhalt

8	Erdbebenberechnung.....	8-1
8.1	Erdbebenzone:	8-2
8.2	Referenz-Spitzenwert der Bodenbeschleunigung:.....	8-2
8.3	Baugrundklasse – Geologische Untergrundklasse:	8-2
8.4	Bedeutungsbeiwert:	8-2
8.5	Verhaltensbeiwert q	8-2
8.6	Elastisches Antwortspektrum:	8-3
8.6.1	Berechnung der Masse:	8-3
8.6.2	Berechnung von T_1	8-4
8.6.3	Antwortspektrum	8-5
8.7	Gesamterdbebenkraft	8-5
8.8	Moment	8-5
8.9	Abbildungen	8-5

8. Erdbebenberechnung

8.1 Erdbebenzone:

Zone 3

(Bild NA.1)

8.2 Referenz-Spitzenwert der Bodenbeschleunigung:

$a_{gR} = 0,8 \text{ m/s}^2$

(Tabelle NA.3)

8.3 Baugrundklasse – Geologische Untergrundklasse:

gewählt: Untergrundverhältnisse C-R

(Tabelle NA.4)

- ⇒ $S = 1,50$
- ⇒ $T_B = 0,05 \text{ s}$
- ⇒ $T_C = 0,30 \text{ s}$
- ⇒ $T_D = 2,0 \text{ s}$

8.4 Bedeutungsbeiwert:

Bedeutungskategorie II

- ⇒ Bedeutungsbeiwert $\gamma_I = 1,0$

(Tabelle NA.6)

8.5 Verhaltensbeiwert q

$q_{\text{hor}} = 1,0^1$ $q_{\text{ver}} = 1,0^1$

¹ Knödel, Peter; Heß, Andrea (2011): Erdbebenbemessung von Tanks - Erfahrungen aus der Praxis. 3.3 Verhaltensbeiwert. In: Stahlbau 80 (11), S. 824.

8. Erdbebenberechnung

8.7 Elastisches Antwortspektrum:

8.7.1 Berechnung der Masse:

8.7.1.1 Mantel:

$$M_{Mantel} = d \cdot \pi \cdot \sum t \cdot h_{Schüsse} \cdot \gamma_{Stahl} = 20 \text{ m} \cdot \pi \cdot (0,03 \text{ m} \cdot 4 \text{ m} + 0,006 \text{ m} \cdot 3 \text{ m}) \cdot 78,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 680,66 \text{ kN}$$

8.7.1.2 Dachhaut:

Blechdicke 6 mm

$$g_{k,Dachhaut} = 0,006 \text{ m} \cdot 78,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 0,47 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

8.7.1.3 Dachbinder:

$e = 2 \text{ m}$; $l = 10 \text{ m}$; $q = 0,36 \text{ kN/m}$ (IPE 270)

$$G_{k,Dachbinder} = q \cdot l \cdot n = q \cdot l \cdot \frac{U}{e} = 0,36 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot 10 \text{ m} \cdot \frac{20 \text{ m} \cdot \pi}{2 \text{ m}} = 113,10 \text{ kN}$$

$$M_{Dach} = r^2 \cdot \pi \cdot g_{k,Dachhaut} + G_{k,Dachbinder} = (10 \text{ m})^2 \cdot \pi \cdot 0,47 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + 113,10 \text{ kN} = 260,75 \text{ kN}$$

8.7.1.4 Schneelast:

$$s_k = 0,8 \cdot \left(0,19 + 0,91 \cdot \left(\frac{700 + 140}{760} \right)^2 \right) = 1,04 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$M_{Schnee} = r^2 \cdot \pi \cdot s_k = (10 \text{ m})^2 \cdot \pi \cdot 1,04 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 315,20 \text{ kN}$$

8.7.1.5 Füllmedium:

$$M_{Füllmedium} = r^2 \cdot \pi \cdot h \cdot \gamma_{Wasser} = (10 \text{ m})^2 \cdot \pi \cdot 15 \text{ m} \cdot 10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 47.123,89 \text{ kN}$$

$$G_k = M_{Mantel} + M_{Dach} = 680,66 \text{ kN} + 260,75 \text{ kN} = 884,86 \text{ kN}$$

$$Q_k = M_{Füllmedium} = 47.123,89 \text{ kN}$$

$$S_k = M_{Schnee} = 315,20 \text{ kN}$$

8. Erdbebenberechnung

$$\begin{aligned} Q_d &= 1,00 \cdot G_k + 1,00 \cdot (0,8 \cdot Q_k + 0,5 \cdot S_k) \\ &= 1,00 \cdot 884,86 \text{ kN} + 1,00 \cdot (0,8 \cdot 47.123,89 \text{ kN} + 0,5 \cdot 315,20 \text{ kN}) \\ &= 38.741,57 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$M = \frac{Q_d}{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = \frac{38.741,57 \text{ kN}}{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 3.949,19 \text{ t}$$

8.7.2 Berechnung von T_1 = Schwingungsdauer eines linearen Einmassenschwingers nach Rayleigh/Morleight

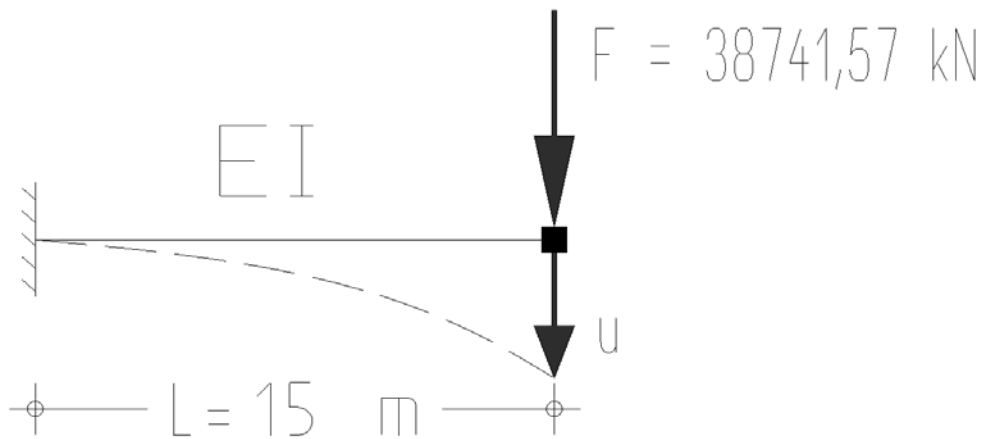


Abbildung 8.1 Statisches System

$$E = 210.000 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2}$$

$$I = \frac{\pi}{4} \cdot (R^4 - r^4) = \frac{\pi}{4} \cdot (20,009^4 - 20^4) = 226,3 \text{ m}^4$$

Alternativ: $I = \pi \cdot R^3 \cdot T$

$$u = \frac{L^3}{3 \cdot EI} \cdot F = \frac{(15,00 \text{ m})^3}{3 \cdot 210.000 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2} \cdot 226,3 \text{ m}^4} \cdot 38.741 \text{ MN} = 0,0009 \text{ m}$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{g}{u}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{0,0009 \text{ m}}} = 16,4 \frac{1}{\text{s}}$$

$$T_1 = \frac{1}{f} = \frac{1}{16,4 \frac{1}{\text{s}}} = 0,06 \text{ s}$$

8. Erdbebenberechnung

8.7.3 Antwortspektrum

$$T_A \leq T \leq T_B: \quad S_d(T_1) = 0,8 \frac{m}{s^2} \cdot 1,0 \cdot 1,50 \cdot \left[1 + \frac{0,06 s}{0,05 s} \cdot \left(\frac{2,5}{1,0} - 1 \right) \right] = 3,36 \frac{m}{s^2} \quad (\text{Gl. NA.10})$$

$$T_B \leq T \leq T_C: \quad S_d(T_1) = 0,8 \frac{m}{s^2} \cdot 1,0 \cdot 1,50 \cdot \frac{2,5}{1,0} = 3,00 \frac{m}{s^2} \quad (\text{Gl. NA.11})$$

$$T_C \leq T \leq T_D: \quad S_d(T_1) = 0,8 \frac{m}{s^2} \cdot 1,0 \cdot 1,5 \cdot \frac{2,5}{1,0} \cdot \frac{0,3 s}{0,06 s} = 15,0 \frac{m}{s^2} \quad (\text{Gl. NA.12})$$

$$T_D \leq T: \quad S_d(T_1) = 0,8 \frac{m}{s^2} \cdot 1,0 \cdot 1,5 \cdot \frac{2,5}{1,0} \cdot \frac{0,30 s \cdot 2,0 s}{(0,06 s)^2} = 500 \frac{m}{s^2} \quad (\text{Gl. NA.13})$$

$$\Leftrightarrow T_B \leq T_1 \leq T_C \Rightarrow S_d(T_1) = 3,00 \text{ m/s}^2$$

8.8 Gesamterdbebenkraft

Horizontalkraft = Vertikalkraft

$$F_{b,hor} = F_{b,ver} = S_d(T_1) \cdot m \cdot \lambda \quad (\text{NA.D.1})$$

$$F_{b,hor} = F_{b,ver} = 3,0 \frac{m}{s^2} \cdot 3.949,19 \text{ t} \cdot 1,0 = 11.847,57 \text{ kN} \quad (\text{NA.D.1})$$

8.9 Moment

Beschluss / Annahme: effektiver Schwerpunkt bei ca. 9,00 m

$$M_{b,hor} = M_{b,ver} = 11.847,57 \text{ kN} \cdot 9 \text{ m} = 106.628,13 \text{ kNm}$$

8.10 Abbildungen

Abbildung 6.1 8-4

9. Berechnung nach DIN EN 14015

9. Bemessung des vorgegebenen Tanks nach DIN EN 14015

9. *Bemessung des vorgegebenen Tanks nach DIN EN 14015:*

Tankboden:

→ mit Bodenrandblechen da $D > 12,50$ m

Nenn Dicke e_a

a) $e_a = 3,0 + 12/3 = \underline{7\text{mm}}$ maßg.

b) 6mm

Mindestabstand l_a

a) $l_a > 240/\sqrt{H} * e_a = 240/\sqrt{15} * 7 = 433,8$ mm

b) 500 mm maßg.

Mindestmantelblechdicke

Nach Tab. 16, unlegierter Stahl → $e_{\min} = 6\text{mm}$

Berechnung Manteldicke, Last durch Lagergut

$$e_c = D/20 S * (98W (H_c - 0,3) + p) + c = 20/20 * 235 * (98 * 1 (15 - 0,3) + 45) = 6,4 \text{ mm}$$

Umfangsspannung

entfällt da Material in jedem Schuss gleich

Hauptversteifungsring (Dacheckring)

$$W = Z = 0,058 * D^2 * H_f * V_w^2 / 45^2 = 0,058 * 20^2 * 15 * 45^2 / 45^2 = 348 \text{ cm}^3 \text{ entspr. IPE 240}$$

Zusatzversteifungsring nach Tab. 17

→ mit Winkel min.: 120*80*10 mm

9. Bemessung des vorgegebenen Tanks nach DIN EN 14015

Ermittlung des am unteren Rand des Tankmantels durch seismische Kräfte hervorgerufene Kippmoment M :

$$M = [G_1(T_t X_s + T_r H_L + T_1 X_1) + G_2 T_2 X_2] / 102$$

$$= [0,082 (68.074,5 * 7,5 + 105.504 * 15 + 3.299.100 * 5,7) + 0,036 * 1.413.900 * 10,5] / 102 = \mathbf{22040,1 \text{ kNm}}$$

H_L Gesamthöhe des Tankmantels, in m

T_t Gesamtgewicht des Tankmantels, in kg: $0,138 \text{ m}^3 / \text{m} * 62,8 \text{ m} * 7850 \text{ kg} / \text{m}^3 = 68.074,5 \text{ kg}$

T_r Gesamtgewicht des Tankdachs, in kg: $16,8 \text{ kN/m} * 62,8 \text{ m} * 100 = 105.504,0 \text{ kg}$

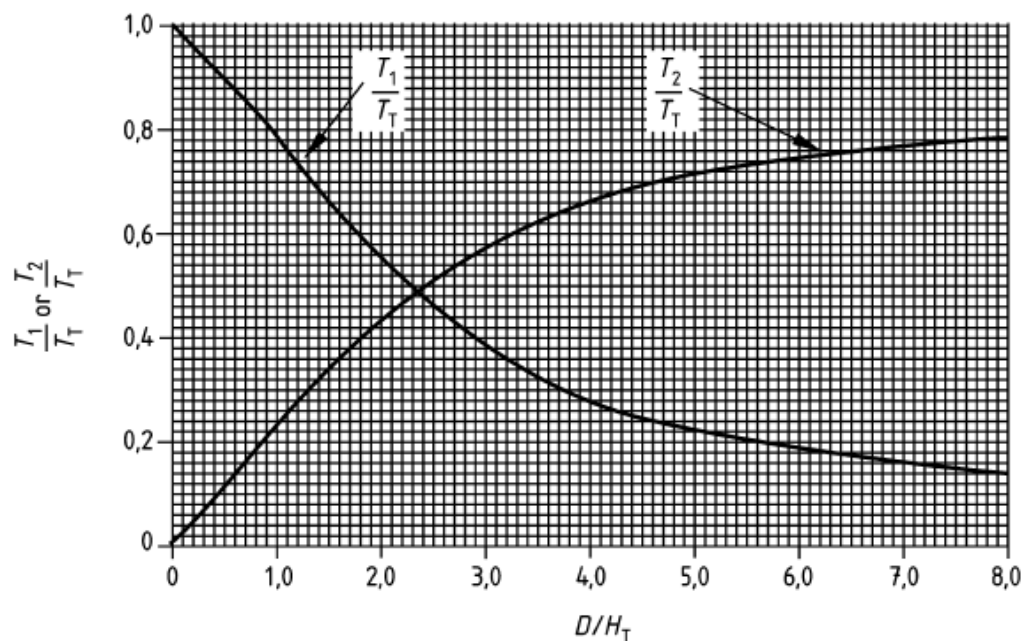
Ermittlung T_1, T_2 :

T_1 : Gewicht der effektiven Masse des Tankinhalts, die sich mit dem Tankmantel bewegt

T_2 : Gewicht der effektiven Masse des Tankinhalts, die sich beim Flüssigkeitsstoß der anregenden Schwingung bewegt

H_T : maximale Füllhöhe des Tanks = 15,0 m

T_T : Gesamtgewicht des Tankinhalts = $\pi * r^2 * h * 1000 \text{ kg} / \text{m}^3 = 4.713.000,0 \text{ kg}$



$$D/H_T = 20/15 = 1,33$$

$$T_1/T_T = 0,7 \rightarrow T_1 = 3.299.100,0 \text{ kg}$$

$$T_2/T_T = 0,3 \rightarrow T_2 = 1.413.900,0 \text{ kg}$$

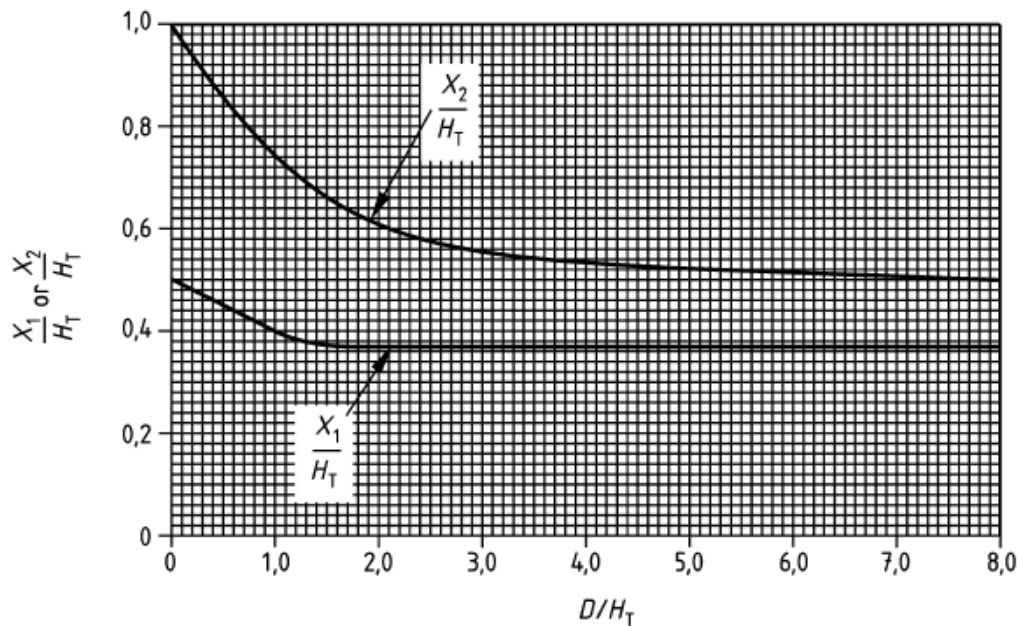
9. Bemessung des vorgegebenen Tanks nach DIN EN 14015

Ermittlung X_1, X_2

X_1 : Höhe vom unteren Rand des Tankmantels zum Flächenschwerpunkt der seismischen Seitenkraft T_1

X_2 : Höhe vom unteren Rand des Tankmantels zum Flächenschwerpunkt der seismischen Seitenkraft T_2

X_s : Höhe vom unteren Rand des Tankmantels zum Schwerpunkt des Tanks = 7,5 m



$$D/H_T = 20/15 = 1,33$$

$$X_1/H_T = 0,38 \rightarrow X_1 = 5,7 \text{ m}$$

$$X_2/H_T = 0,7 \rightarrow X_2 = 10,5 \text{ m}$$

Ermittlung G_1, G_2

G_1 : Beiwert für die Seitenkraft, ausgedrückt als Verhältnis der Erdbeschleunigung = 0,082

G_2 : Beiwert für die Seitenkraft, ausgedrückt als Verhältnis der Erdbeschleunigung und berechnet nach:

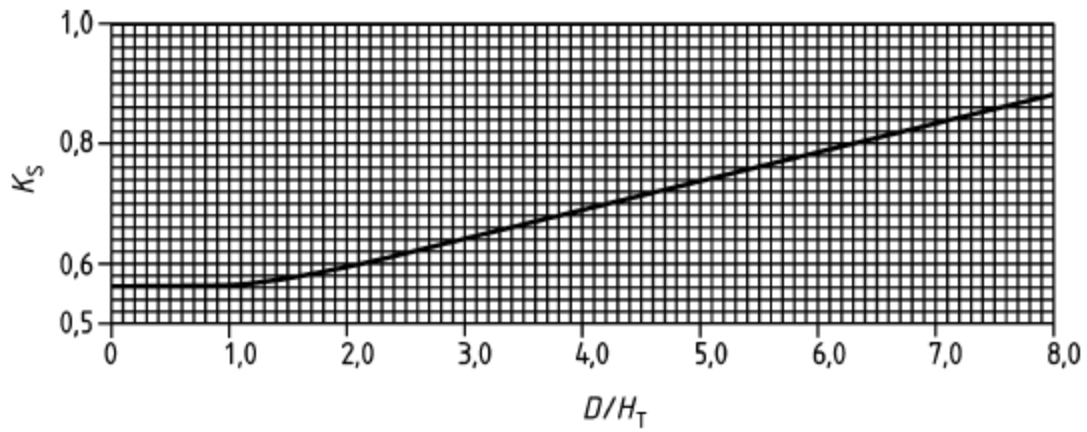
$$T_s \leq 4,5 \quad G.2$$

$$T_s \geq 4,5 \quad G.3$$

9. Bemessung des vorgegebenen Tanks nach DIN EN 14015

T_s Eigenperiode der anregenden Schwingung des Flüssigkeitsstoßes, in s

$$T_s = 1,8 K_s * D^{1/2} = 1,8 * 0,53 * 20^{0,5} = 4,27s \leq 4,5 \rightarrow G.2$$



$$G_2 = 1,25 * G_1 * j / T_s = 1,25 * 0,082 * 1,5 / 4,27 = 0,036$$

9. Bemessung des vorgegebenen Tanks nach DIN EN 14015

Druckbelastung des Mantels

4.2 Verankerter Tank, max. axiale Druckkraft (Einwirkung) am unteren Rand des Mantels

$$W_b = W_t + 1,273M / D^2 \quad [\text{kN/m}]$$

$$= 27,63 + 1,273 * 22040,1 / 20^2 = 97,77 \quad [\text{kN/m}]$$

W_t : max Kraft infolge Manteleigengewicht und Dach

W_b : max. Druckkraft in Längsrichtung am unteren Rand des Mantels

Ermittlung W_t

Gewichtskraft infolge Mantel:

$$1\text{m} * 4\text{m} * 0,012\text{m}$$

$$+ 1\text{m} * 4\text{m} * 0,010\text{m}$$

$$+ 1\text{m} * 4\text{m} * 0,008\text{m}$$

$$+ 1\text{m} * 3\text{m} * 0,006\text{m} = 0,138\text{m}^3 / \text{lfm Umfang}$$

$$0,138\text{m}^3 / \text{lfm} * 78,5 \text{ kN/m}^3 = \mathbf{10,83 \text{ kN/m}}$$

Gewichtskraft infolge Dach:

Vorbemessung Dach:

$$\text{Schneelast: } s_k = 0,19 + 0,91 * ((A+140)/760)^2 = s_k = 0,19 + 0,91 * ((780+140)/760)^2 = 1,52 \text{ kN/m}^2$$

$$s_d = 1,5 * 1,52 = 2,28 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Dachhaut: Blechdicke 6mm : } q = 0,006\text{m} * 78,5 \text{ kN/m}^3 * 1\text{m}^2 = 0,47 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Dachbinder: } e = 2\text{m}, l = 10\text{m}, q = 3 \text{ kN/m}^2 \text{ (Schnee + Dachhaut + Verbände)} \rightarrow 6 \text{ kN/m}$$

$$M = 6 * 10^2 / 8 = 75 \text{ kNm}$$

$$W = M / \sigma = 7500 \text{ kNcm} / 21,8 \text{ kN/cm}^2 = 344 \text{ cm}^3 \rightarrow \text{IPE 270}$$

Last aus Binder:

$$\rightarrow 3,6 \text{ kN} / \text{Binder} \rightarrow \mathbf{1,8 \text{ kN/m}}, \text{ da } e = 2\text{m} \text{ aber komplettes Dachgewicht auf Mantel}$$

Last aus Dachhaut:

$$A = \pi * r^2 = 314,2 \text{ m}^2 \quad U = 2\pi r = 62,8 \text{ m}$$

$$314,2 \text{ m}^2 * 3 \text{ kN/m}^2 / 62,8\text{m} = \mathbf{15,00 \text{ kN/m}}$$

9. Bemessung des vorgegebenen Tanks nach DIN EN 14015

insg. aus Dach : $1,8 \text{ kN/m} + 15,00 \text{ kN/m} = 16,8 \text{ kN /m}$

$$W_t = 10,83 \text{ kN/m} + 16,8 \text{ kN /m} = 27,63 \text{ kN /m}$$

Zulässige Druckbelastung des Mantels

Die maximale Druckspannung im Mantel W_b/tbs , in N/mm^2 , sollte die zulässige Spannung, F_a , in N/mm^2 , nicht überschreiten

$$W_b = 97,77 \text{ [kN/m]} = 97770 \text{ N/m} \quad t = 12\text{mm} \quad tbs = 12\text{mm} * 1000 \text{ mm} = 12000 \text{ mm}^2$$

$$\text{vorhanden Spannung: } W_b/tbs = 97770 \text{ N} / 12000 \text{ mm}^2 = 8,15 \text{ N/ mm}^2$$

$$W_s * H_T * D^2 / tbs^2 = 41,7 < 44$$

W_s maximale spezifische Dichte des Tankinhalts unter Lagerbedingungen

$$\text{zulässige Spannung: } F_a = 33 tbs/D + 7,5 \sqrt{W_s * H_T} = 33 * 12/20 + 7,5 \sqrt{1 * 15} = 48,85 \text{ N/ mm}^2 > 8,15 \text{ N/ mm}^2$$

$$\text{Ausnutzung : } 8,15 \text{ N/ mm}^2 / 48,85 \text{ N/ mm}^2 = 0,167 \rightarrow 17\%$$

Vergleich mit Beulsicherheitsnachweis Kapitel 4.5.8:

$$\sigma_{\theta,Ed} = \sigma_{\theta,Rd} \quad 0,788 / 2,26 = 0,35 < 1,0 \quad \text{Ausnutzung } 35\%$$

Erforderliche Mindestverankerung

$$1,273 * M / D^2 - W_t = 1,273 * 22040,1 / 20^2 - 27,63 = 42,5 \text{ kN/m}$$

10. Berechnung des Tanks nach Störgrößen

Alle Werte werden an der Stelle $x_i = 0$ berechnet.

Abschnitt	1	2	3	4
Wasserhöhe $[h]$ in m	3	7	11	15
Blechdicke $[t]$ in mm	6	8	10	12
Plattensteifigkeit $[K]$ in kN m	4.2	9.8	19.2	33.3
Wellenlängenparameter $[\lambda]$ in m^{-1}	5.25	4.54	4.06	3.71
Innendruck $[p_i]$ in kN/m	30	70	110	150
Umfangskraft $[n_\varphi]$ in kN/m ²	300	700	1100	1500
Umfangsspannung $[\sigma_\varphi]$ in N/mm ²	50	87.5	110	125
Umfangsdehnung $[\varepsilon_\varphi]$	0.0024	0.00042	0.00052	0.00060
Radiumaufweitung $[\Delta R]$ in mm	2.38	4.17	5.24	5.95
Kreppmoment $[M]$ in N mm	544,4	1693,6	3326,6	5443,6
Radiale Ringlast $[R]$ in N	-5,7	-15,4	-27,0	-40,4
Biegemoment $[m_x R_i]$ in N mm	0	0	0	0
Biegemoment $[m_x M_i]$ in N mm	544,4	1693,6	3326,6	5443,6
Querkraft $[q_x R_i]$ in N	-5,7	-15,4	-27,0	-40,4
Querkraft $[q_x M_i]$ in N	0	0	0	0
Umfangskraft $[n_\varphi R_i]$ in N	-600	-1400	-2200	-3000
Umfangskraft $[n_\varphi M_i]$ in N	300	700	1100	1500
Biegespannung $[\sigma_{x,R_i}]$ in N/mm ²	0	0	0	0
Biegespannung $[\sigma_{x,M_i}]$ in N/mm ²	90,7	158,8	199,9	226,8
Schubspannung $[\tau_{x,R_i}]$ in N/mm ²	-1,4	-2,9	-4,1	-5,0
Schubspannung $[\tau_{x,M_i}]$ in N/mm ²	0	0	0	0
Umfangsspannung $[\sigma_{\varphi,R_i}]$ in N/mm ²	-100	-175	-220	-250
Umfangsspannung $[\sigma_{\varphi,M_i}]$ in N/mm ²	50	87,5	110	125
σ_{1x_i} in N/mm ²	90,7	158,8	199,6	226,8
σ_{3x_i} in N/mm ²	-90,7	-158,8	-199,6	-226,8
σ_{φ_i} in N/mm ²	-50	-87,5	-110	-125
Spannung Innenseite $[\sigma_{1v_i}]$ in N/mm ²	123,6	216,2	271,8	308,9
Spannung Mittelfläche $[\sigma_{2v_i}]$ in N/mm ²	50	87,5	110	125
Spannung Außenseite $[\sigma_{3v_i}]$ in N/mm ²	78,7	137,7	173,1	196,8

Tabelle 10.1: Rechenergebnisse

10. Berechnung des Tanks nach Störgrößen

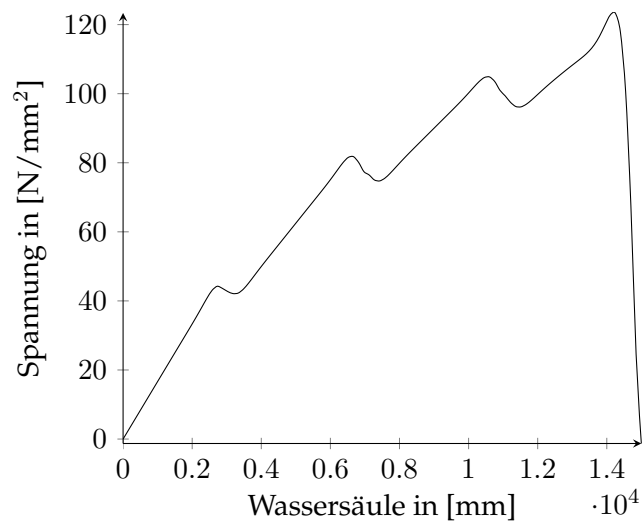


Abbildung 10.1: Membranspannung $[\sigma_\varphi]$ + Störgrößen $[\sigma_{\varphi_i}]$

Anhang

Abbildungsverzeichnis

1.1	Begriffsdefinitionen an einem Behälter	2
2.1	Modellierungsgenauigkeit bei Zeitverlaufsrechnung und Antwortspektrenverfahren [12]	4
2.2	Ungedämpfte, freie Schwingung (eigene Darstellung)	5
2.3	Schwach gedämpfte Schwingung mit exponentiell abnehmender Begrenzung [6]	6
2.4	$D = 0$; Dauerschwingung	7
2.5	$0 < D < 1,0$	7
2.6	$D = 1,0$; gerade kein Überschwingen (aperiodischer Grenzfall)	8
2.7	$D > 1,0$; nicht schwingend (Kriechfall)	8
2.8	Schwingungsverlauf [7]	9
2.9	Vorgehensweise beim Antwortspektrenverfahren	10
2.10	Antwortspektrum der DIN 4119 []	10
5.1	Herleitung der Kesselformel	41
5.2	Freigeschnittenes Schalenende	42
5.3	Störgrößen am Schalenende	42
5.4	Biegemomente (Meridian) [15]	45
5.5	Querkräfte (Meridianrichtung) [15]	45
5.6	Umfangskräfte aus den Störgrößen [15]	46
5.7	Meridianspannungen [15]	47
5.8	Querkräfte (Schubspannungen) [15]	48
5.9	Umfangsspannungen [15]	48
5.10	Vergleichsspannungen [15]	49
10.1	Membranspannung $[\sigma_\varphi]$ + Störgrößen $[\sigma_{\varphi_i}]$	97

Literaturverzeichnis

- [1] Norm DIN EN 1993-1-6 Dezember 2010. *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-6: Festigkeit und Stabilität von Schalen*
- [2] Norm DIN EN 1998-1 Dezember 2010. *Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und und Regeln für Hochbauten*
- [3] Norm DIN EN 1990 Dezember 2010. *Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung*
- [4] Norm DIN EN 1993-1-6/NA Dezember 2010. *Nationaler Anhang - Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-6: Festigkeit und Stabilität von Schalen*
- [5] Norm DIN EN 1998-1/NA Januar 2011. *Nationaler Anhang - Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und und Regeln für Hochbauten*
- [6] *Schwach gedämpfte Schwingung mit exponentiell abnehmender Begrenzung.* http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d1/Schwingung_ged%C3%A4mpft.svg, Oktober 2012
- [7] XXX. <http://www.tm-mathe.de/Themen/html/gewdglyerzschwing.html>, Oktober 2012
- [8] XXX. ftp://statik.bv.tu-berlin.de/pub/Lehre/Statik_VT_II/Skripte/Vertiefung%20II, Teil%203.pdf, Oktober 2012
- [9] XXX. http://www.ifb.tugraz.at/backup_old_homepage/educ/teaching_material/Baustatik/Antwortspektrum.pdf, Oktober 2012
- [10] XXX. <http://ipu-wob.de/index.php?id=67&type=98>, Oktober 2012
- [11] GIRKMANN, Dr. Techn. Dipl.-Ing. K.: *Flächentragwerke*. Bd. 3. Springer-Verlang Wien, 1954
- [12] KNÖDEL ; HESS: Erdbebenbemessung von Tanks- Erfahrungen aus der Praxis. In: *Stahlbau 80 Heft 11* (2011), S. 822

- [13] KNÖDEL, Dr. P.: Zylinder - Verträglichkeit mit unendlich steifer Bodenplatte / Ingenieurbüro Dr. Knödel. 2003. – Arbeitsblatt - Behälterbau
- [14] KNÖDEL, Dr. P.: Zylinder unter Innendruck - Membrandehnung / Ingenieurbüro Dr. Knödel. 2003. – Arbeitsblatt - Behälterbau
- [15] KNÖDEL, Dr. P.: Zylinder unter Randstörung - Radiale Ringlast plus Krepelmoment / Ingenieurbüro Dr. Knödel. 2003. – Arbeitsblatt - Behälterbau