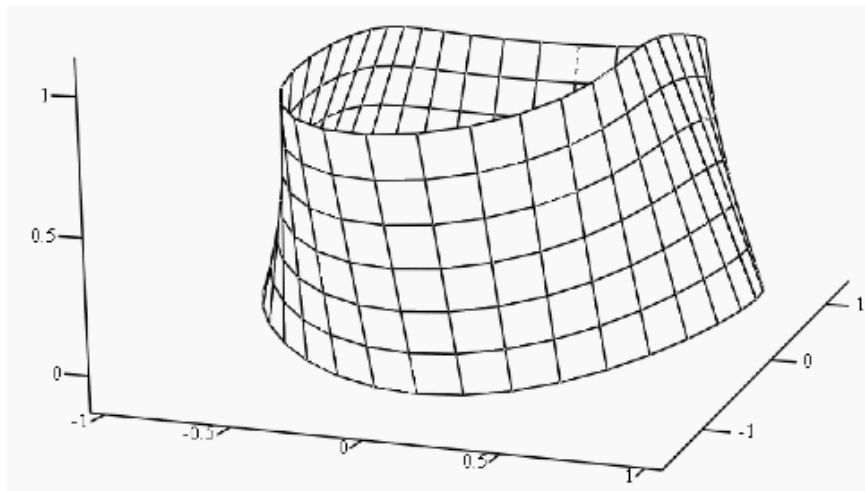


Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft
Fakultät Architektur und Bauwesen

Modul Behälter- und Brückenbau:
Dr.-Ing. Peter Knödel / Dipl.-Ing. Rüdiger Wolfram

Behälterbau



Lehrbeauftragter: Dr.-Ing. Peter Knödel

www.peterknoedel.de

Wintersemester 2006/2007

Stoffplan

Wintersemester 2006/2007

- 09.10.06 nachgeholt vom 02.10.06
1. + 2. Doppelstunde:
Einführung, Spielregeln,
Behälterttypen, Anspruch und Grenzen des Moduls,
Grundformen von Schalen, Seil – Balken, Membran – Schale,
Lasten aus Innendruck, Herleiten der "Kesselformel",
Mathematische Grundlagen: Gedämpfte Schwingung
- 16.10.06
3. + 4. Doppelstunde
Querschnittswerte des Kreisringquerschnittes
Lasten und Schnittgrößen aus Wind, wirbelerregte Schwingungen,
Lasten aus Explosion
- 23.10.06 vorgeholt vom 30.10.06
5. + 6. Doppelstunde
Lasten und Schnittgrößen aus Füllung (Flüssigkeit, Schüttgüter),
Lasten aus Erdbeben
- 06.11.06 vorgeholt vom 13.11.06
7. + 8. Doppelstunde
Biegestörung der Zylinderschale, Kraftgrößenverfahren
- 27.11.06
9. + 10. Doppelstunde
Schnittgrößen und Bemessung eines Stahlbehälters,
Beulversuche an Klopapier-Rollen und Getränke-Dosen,
Stabilitätsnachweise

11.12.06	11. + 12. Doppelstunde FEM im Behälterbau Schnittgrößen und Bemessung eines Betonbehälters
18.12.06	vorgeholt vom 25.12.06 13. + 14. Doppelstunde Dächer, Trichter, konstruktive Einzelheiten
08.01.07	15. + 16. Doppelstunde Sonderfragen, Wiederholung, Besprechung der Übungsaufgaben
ca. Anf. Feb. 2007	Schriftliche Prüfung "Behälterbau" gemeinsam mit der schriftlichen Prüfung "Brückenbau" (siehe folgende Hinweise)

Hinweise zur Prüfung:

Die Prüfungszeit beträgt 20 Min. je Semesterwochenstunde, d.h. 40 Min. für Behälterbau und 80 Min. für Brückenbau.

Es werden in jedem Fach ca. 100-120 % angeboten.

Aus den Punkten in beiden Fächern wird eine gemeinsame Note mit der Gewichtung 1/3 (Behälterbau) zu 2/3 (Brückenbau) gebildet.

Leitfaden –
Reihenfolge der für die Vorlesung unmittelbar benötigten
Text- und Rechenmodule

1. + 2. Doppelstunde:

Tit_ <datum>
Stoffplan_ <datum>
\$\$_Leitfaden_ <datum>
Lit_ <datum>
Z-Mem-pi_ <datum>
0_Gedaempfte_Schwing_ <datum>

3. + 4. Doppelstunde:

L_Wind_ <datum>
L_Ex_ <datum>

5. + 6. Doppelstunde:

L_Fuell_ <datum>
L_Erdbeb_ <datum>

7. + 8. Doppelstunde:

Z-Stoer-R_ <datum>
Z-Stoer-M_ <datum>
Z-Vertraeg_ <datum>
Z-Stoer-R+M_ <datum>

9. + 10. Doppelstunde:

Z-Beul-axial_ <datum>
Z-Beul-aussen_ <datum>

11. + 12. Doppelstunde:

FEM_ <datum>
Z-Vertraeg_Beton_ <datum>
Z-Stoer-R+M_Beton_ <datum>

13. + 14. Doppelstunde:

(keine, nur Tafelanschrieb)

15. + 16. Doppelstunde:

Ue_<datum>

PR_<datum>

Empfehlung:

Schauen Sie sich im Internet die „Versagensbilder“ und „Projekte“ an.

Schauen Sie sich die Themen für Diplomarbeiten an.

Literaturhinweise

0. Inhalt

0.	Inhalt	1
1.	Standardwerke Schalenstatik	1
2.	Normen und Regelwerke	1
2.1	International	1
2.2	Europäisch	2
2.3	National	2
2.4	Land Baden-Württemberg	3
2.5	Sonstige	4
3.	Weitere Fachliteratur	4
4.	Erläuterungen	5

1. Standardwerke Schalenstatik

- [1] Calladine, C.R.: Theory of Shell Structures. Cambridge University Press 1983.
- [2] Duddeck, H., Niemann, H.: Kreiszyllindrische Behälter. Tabellen und Rechenprogramme für allgemeine Lastfälle. Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1976.
- [3] Flügge, W.: Statik und Dynamik der Schalen. 3. Auflage, Springer, Berlin 1962.
- [4] Girkmann, K.: Flächentragwerke. 6. Auflage, Springer, Wien 1963.
- [5] Hampe, E.: Rotationssymmetrische Flächentragwerke. Einführung in das Tragverhalten. Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1981.
- [6] Markus, G.: Theorie und Berechnung rotationssymmetrischer Bauwerke. 3. Auflage, Werner, Düsseldorf, 1978.

2. Normen und Regelwerke

2.1 International

- [7] ISO 11697: Grundlagen für den Entwurf, die Berechnung und die Bemessung von Tragwerken - Lasten infolge Schüttgütern (1995-06).
(siehe auch EC1 und DIN 1055)

2.2 Europäisch

- [8] DIN V ENV 1991 (EC1): Eurocode 1: Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkungen auf Tragwerke.
Teil 2-1: Einwirkungen auf Tragwerke – Wichten, Eigenlasten, Nutzlasten (1996-01)
Teil 4: Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter. Entwurf Januar 2003.
Teil 4: Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter (1996-12). Deutsche Fassung ENV 1991-4:1995.
(siehe auch DIN 1055 und ISO 11697)
- [9] DIN V ENV 1993 (EC3): Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten.
Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln, Bemessungsregeln für den Hochbau. April 1993.
Teil 4-1: Silos, Tankbauwerke und Rohrleitungen; Silos (2002-05).
Teil 4-2: Silos, Tankbauwerke und Rohrleitungen; Tankbauwerke (2002-05).
Teil 4-3: Silos, Tankbauwerke und Rohrleitungen; Rohrleitungen (2002-05).
- [10] DIN EN 14015: Auslegung und Herstellung standortgefertigter, oberirdischer, stehender, zylindrischer, geschweißter Flachboden-Stahl tanks für die Lagerung von Flüssigkeiten bei Umgebungstemperatur und höheren Temperaturen; Deutsche Fassung EN 14015:2004. Februar 2005.
(siehe auch DIN 4119)
- [11] Richtlinie über Druckgeräte (Druckgeräterichtlinie DGRL). Richtlinie 97/23/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. Mai 1997 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten über Druckgeräte. Ausgabe Februar 1998.

2.3 National

- [12] DIN Fachbericht 93: Nationales Anwendungsdokument (NAD) – Richtlinie zur Anwendung von DIN V ENV 1993-1-2:1997-05. 2000
(In LTB 2003 Baden-Württemberg aufgeführt, Stand 01.01.04)
- [13] DIN 1055: Lastannahmen für Bauten.
Teil 6: Lasten in Silozellen. Mai 1987; Beiblatt zu Teil 6, Mai 1987.
Einführungserlaß GABl BW (1989)
- [14] DIN 1055: Einwirkungen auf Tragwerke.
Teil 6: Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter. März 2005.
(siehe auch EC1 und ISO 11697)
- [15] DIN 4119: Oberirdische zylindrische Flachboden-Tankbauwerke aus metallischen Werkstoffen.
Teil 1: Grundlagen, Ausführung, Prüfungen. Juni 1979.
Teil 2: Berechnung. Februar 1980.
(In LTB 2004 Baden-Württemberg aufgeführt Stand 30.12.04 www.im... – Anlage 2.4/1 verweist auf die Anpassungsrichtlinie.
Für Teil 1 verweist diese auf
– DIN 18800 Teile 1, 2, 4, 7, DIN 18801, DIN EN 10025, DIN EN 287-1
– enthält eine Tabelle mit Stahlsorten und Werkstoffbescheinigungen
– Doppelboden für wassergefährdende Flüssigkeiten
Für Teil 2 verweist diese auf
– Lastannahmen sind charakteristisch, Unterscheidung von H und HZ entfällt

- „Abs. 4.2.3.4 Die Festlegung $p_{us} = 0,4 q_0$ gilt ungeachtet der Regeln in DIN 18800-4 Elm 424.“
- Teilsicherheitsbeiwerte mit 1,35 für kontrollierten Flüssigkeitspegel (siehe auch DIN EN 14015)
- [16] DIN 6600: Behälter (Tanks) aus Stahl für die Lagerung wassergefährdender, brennbarer und nichtbrennbarer Flüssigkeiten; Begriffe, Güteüberwachung. September 1989. (siehe auch 28005 Teil 1)
Hinweis:
diese Normenreihe geht weiter bis DIN 6625
- [17] DIN 11622: Gärfuttersilos und Güllebehälter.
Beiblatt 1: Erläuterungen; Systemskizzen für Fußpunktausbildung (07/94).
Teil 1: Bemessung, Ausführung, Beschaffenheit; Allgemeine Anforderungen (07/94).
Teil 4: Bemessung, Ausführung, Beschaffenheit; Gärfutterhochsilos und Güllehochbehälter aus Stahl (07/94).
(siehe auch DIN 18914)
- [18] DIN 15190-101:1991-04: Frachtbehälter; Binnencontainer; Hauptmaße, Eckbeschläge, Prüfungen.
- [19] DIN 18800: Stahlbauten.
Teil 1: Bemessung und Konstruktion. November 1990.
Teil 4: Stabilitätsfälle, Schalenbeulen. November 1990.
Teil 7: Ausführung und Herstellerqualifikation. September 2002.
(In LTB 2003 Baden-Württemberg aufgeführt Stand 01.01.04 www.wm...)
(In LTB 2004 Rheinland-Pfalz aufgeführt Stand 10.02.05 www.fm...)
- [20] DIN 28005 Teil 1: Allgemeintoleranzen für Behälter; Behälter allgemein. November 1988.
(siehe auch DIN 6600 ff)
- [21] DIN 28083: Pratzen;
Teil 1: Maße, Maximale Gewichtskräfte (1987-01).
Teil 2: Maximale Momente auf die Apparatwand durch Gewichtskräfte über Pratzen Form A (1987-01).
- [22] VDI 2263: Staubbrände und Staubexplosionen; Gefahren, Beurteilung, Schutzmaßnahmen.
Mai Ausgabe 1992.
Blatt 3: Explosionsdruckstoßfeste Behälter und Apparate; Berechnung, Bau und Prüfung.
Ausgabe Mai 1990.
- [23] Verordnung über Druckbehälter, Druckgasbehälter und Füllanlagen (Druckbehälterverordnung DruckbehV) und Allgemeine Verwaltungsvorschrift. Ausgabe April 2002.

2.4 Land Baden-Württemberg

- [24] Sauter, Imig, K.: Landesbauordnung für Baden-Württemberg (LBO) vom 08. August 1995, zuletzt geändert durch Gesetz vom 19. Dezember 2000. 24. Auflage. Kohlhammer, Stuttgart 2001. (neuere Ausgaben vorhanden).

Hinweis 1:

Für Baden-Württemberg siehe aktuelle Dokumente auf den Internet-Seiten des Innenministeriums

www.im.baden-wuerttemberg.de – „Bauen“ mit den Unterpunkten „Bauordnungsrecht“ und „Bautechnik“

Hinweis 2: Vorschriften mit Stand Frühjahr 2005 siehe www.peterknoedel.de – Lehre – Projekte P_Baurecht_BW und P_Baurecht_NRW.

2.5 Sonstige

- [25] Verband der Technischen Überwachungs-Vereine e.V. (Hrsg): AD-Merkblätter, Taschenbuch-Ausgabe 2002. Stand Mai 2002. Heymanns Verlag, Köln / Beuth Verlag, Berlin.
- [26] Richtlinie für die Herstellung von Flachbodentanks mit besonderen Anforderungen. Vereinbarung zwischen VdTÜV und FDBR, Stand 11.06.2002.

3. Weitere Fachliteratur

- [27] Brown, C.J., Nielsen, J. (eds): Silos - Fundamentals of theory, behaviour and design. E & FN Spon, London 1998, pp 642--644.
- [28] Knoedel, P., Ummenhofer, T.: Substitute Imperfections for the Prediction of Buckling Loads in Shell Design. Proceedings, Imperfections in Metal Silos - Measurement, Characterisation and Strength Analysis, pp. 87-101. BRITE/EURAM concerted action CA-Silo Working Group 3: Metal Silo Structures. International Workshop, INSA, Lyon, 19.04.96.
- [29] Knödel, P., Ummenhofer, T.: Ein einfaches Modell zum Stabilitätsnachweis zylindrischer Schalentragwerke auf Einzelstützen. Stahlbau 67 (1998), Heft 6, S. 425-429.
- [30] Ummenhofer, T., Knoedel, P.: Modelling of Boundary Conditions for Cylindrical Steel Structures in Natural Wind. Paper No. 57 in Papadrakakis, M., Samartin, A., Onate, E. (eds.): Proc., Fourth Int. Coll. on Computational Methods for Shell and Spatial Structures IASS-IACM, June 4-7, 2000, Chania-Crete, Greece.
- [31] Knoedel, P., Ummenhofer, T.: Flat Bottom Tanks Endangered by Ice Lenses. In Krupka, V. (ed.): Proc., Int. Conf. Design, Inspection, Maintenance and Operation of Cylindrical Steel Tanks and Pipelines. Prague, Czech Republic, 8.-11. Oct. 2003.
- [32] Knoedel, P., Ummenhofer, Th.: Design of Squat Steel Tanks with $R/T > 5000$. TP056 in Motro, R. (ed.): Proc., IASS Symposium: Shell and Spatial Structures from Models to Realization, Montpellier, 20-24 September 2004.
- [33] Knödel, P., Ummenhofer, Th.: Ankerkräfte bei kurzen Zylinderschalen. Stahlbau 75 (2006), Heft 9, S. 723-728.
- [34] Mang, F., Bremer, K.: Großrohrleitungen und Behälterbau. Kapitel 32 in Stahlbau Handbuch - Für Studium und Praxis, Band 2, Stahlbau-Verlagsgesellschaft mbH, Köln 1985.
- [35] Martens, P. (Hrsg.): Silo-Handbuch. Ernst & Sohn, Berlin 1988.
- [36] Petersen, Chr.: Behälterbau. Kapitel 22 in Stahlbau. 2. Auflage, Vieweg, Braunschweig 1990.
- [37] Ruckenbrod, C., Schlüter, F.-H.: Silolasten nach der neuen DIN 1055-6. Beton- und Stahlbetonbau 101 (2006), Heft 3, S. 138-151.

4. Erläuterungen

Dieses Dokument enthält Literaturhinweise in einer subjektiven Auswahl – es soll dabei helfen, zu verschiedenen Stichworten den Anfang des roten Fadens zu finden. Vor der praktischen Anwendung die angegebenen Normen unbedingt auf Aktualität prüfen.

www <http://www2.beuth.de>
suchen nach Normen

Baurecht In der BRD ist Baurecht Ländersache. In jedem Bundesland können daher andere Bauvorschriften gelten.

GABI BW GEMEINSAMES AMTSBLATT des Innenministeriums, des Finanzministeriums, des Wirtschaftsministeriums, des Ministeriums für Ländlichen Raum, Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, des Ministeriums für Arbeit, Gesundheit und Sozialordnung, des Umweltministeriums, des Verkehrsministeriums, des Ministeriums für Familie, Frauen, Weiterbildung und Kunst sowie der Regierungspräsidien DES LANDES BADEN-WÜRTTEMBERG. Herausgegeben vom Innenministerium.

Hinweis:

die Bezeichnungen der Ministerien entsprechen dem Stand 1992

Aktuelle Dokumente liegen auf den Internet-Seiten des Innenministeriums

www.im.baden-wuerttemberg.de – „Bauen“ mit den Unterpunkten „Bauordnungsrecht“ und „Bautechnik“

FDBR Fachverband Dampfkessel-, Behälter- und Rohrleitungsbau e.V., Düsseldorf.

"Richtlinie" Eine "Richtlinie" des Europäischen Parlaments hat Gesetzescharakter. Die Länder sind verpflichtet, diese Richtlinien in Landesrecht umzusetzen.

Insofern ist der Begriff "Richtlinie" nach unserem üblichen Sprachgebrauch hier völlig irreführend!

siehe z.B. "Richtlinie über Druckgeräte" des Europäischen Parlaments und die darauf folgende deutsche "Verordnung über Druckbehälter".

VdTÜV Verband der Technischen Überwachungs-Vereine e.V., Essen.

Zylinder unter Innendruck - Membrandehnungen

(Formular Z-Mem-pi_05-09-26.mcd)

Geometrie

Durchmesser $D := 10.0\text{m}$

Füllhöhe $L := 10.0\text{m}$

informativ: Volumen $V := \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot L$ $V = 785\text{m}^3$

Werkstoff

Stahl - E-Modul $E := 2.1 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Lasten

Wasserfüllung $\gamma := 10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$

Innendruck $p := L \cdot \gamma$ $p = 100 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

Schnittgrößen

Radius $R := \frac{D}{2}$ $R = 5000\text{mm}$

Umfangskraft nach der Kesselformel $n_\varphi := p \cdot R$ $n_\varphi = 500 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Bemessung Stahl

gewählt S 235

Streckgrenze DIN 18800 Teil 1

$$f_{y,k} := 240 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Teilsicherheitsbeiwert Material

$$\gamma_M := 1.1$$

Bemessungswert der Spannungen

$$f_{y,d} := \frac{f_{y,k}}{\gamma_M}$$

$$f_{y,d} = 218 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Teilsicherheitsbeiwert Last

$$\gamma_F := 1.5$$

Wanddicke gewählt

$$t := 4\text{mm}$$

vorhandene Umfangsspannung (charakteristisch)

$$\sigma_\varphi := \frac{n_\varphi}{t}$$

$$\sigma_\varphi = 125 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

vorhandene Umfangsspannung (Bemessungswert)

$$\sigma_{\varphi,d} := \sigma_\varphi \cdot \gamma_F$$

$$\sigma_{\varphi,d} = 188 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Tragsicherheitsnachweis als Spannungsnachweis (Ausnutzungsgrad)

$$\eta := \frac{\sigma_{\varphi,d}}{f_{y,d}}$$

$$\eta = 0.859$$

Vorhandene Umfangsdehnung

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

$$\varepsilon_\varphi = 0.0595\%$$

Vorhandene Radienzunahme

$$\Delta R := R \cdot \varepsilon_\varphi$$

$$\Delta R = 3.0\text{mm}$$

Bemessung Beton

gewählt

BSt 500

Streckgrenze BSt 500 DIN 488

$$\beta_S := 500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Teilsicherheitsbeiwert Betonstahl

$$\gamma_M := 1.75$$

Bemessungswert der Spannungen

$$\beta_d := \frac{\beta_S}{\gamma_M} \quad \beta_d = 286 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Teilsicherheitsbeiwert Last

$$\gamma_F := 1.0$$

vorhandene Umfangskraft (übertragen von oben)

$$n_\varphi = 500 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

erforderlicher Bewehrungsquerschnitt

$$a_S := \frac{n_\varphi}{\beta_d} \quad a_S = 17.5 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}}$$

Bewehrung zu gleichen Teilen innen und außen verteilt,
ergibt je Fläche

$$a_{S,i} := \frac{a_S}{2} \quad a_{S,i} = 8.7 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}}$$

gewählt

K884 mit $a_{S,\text{vorh}} = 8,84 \text{ cm}^2/\text{m}$

alternativ gewählt

d12 e12,5

Vorhandene Umfangsdehnung

Beton gerissen, maßgebend wird nur die Bewehrung

$$\varepsilon_{\varphi,b} := \frac{\beta_d}{E} \quad \varepsilon_{\varphi,b} = 0.14\%$$

Vorhandene Radienzunahme

$$\Delta R_b := R \cdot \varepsilon_{\varphi,b} \quad \Delta R_b = 6.8 \text{ mm}$$

Mathematische Grundlagen: Gedämpfte Schwingung

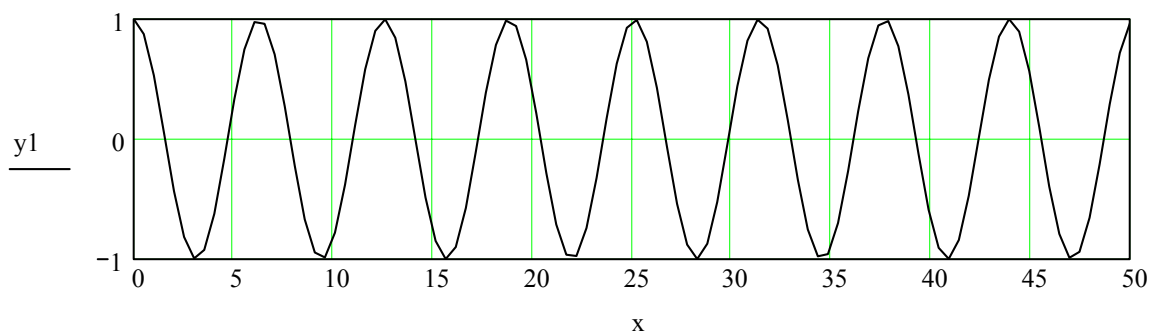
(Formular 0_Gedämpfte_Schwing_05-09-26.mcd)

Vorbereiten der graphischen Darstellung

$$\begin{aligned} \text{start} &:= 0 & \text{end} &:= 50 & \text{Npts} &:= 100 & i &:= 1..Npts \\ \text{step} &:= \frac{\text{end} - \text{start}}{\text{Npts} - 1} & x_i &:= \text{start} + \text{step} \cdot (i - 1) \end{aligned}$$

Eine Kosinusfunktion

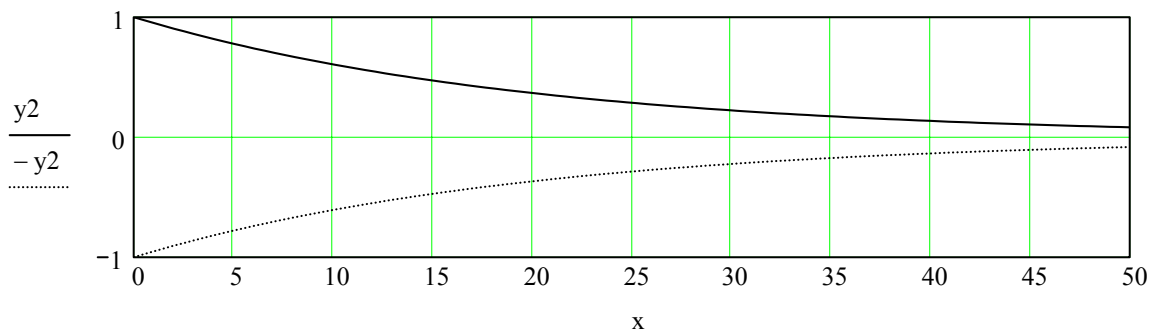
$$y1_i := \cos(x_i)$$



und eine e-Funktion

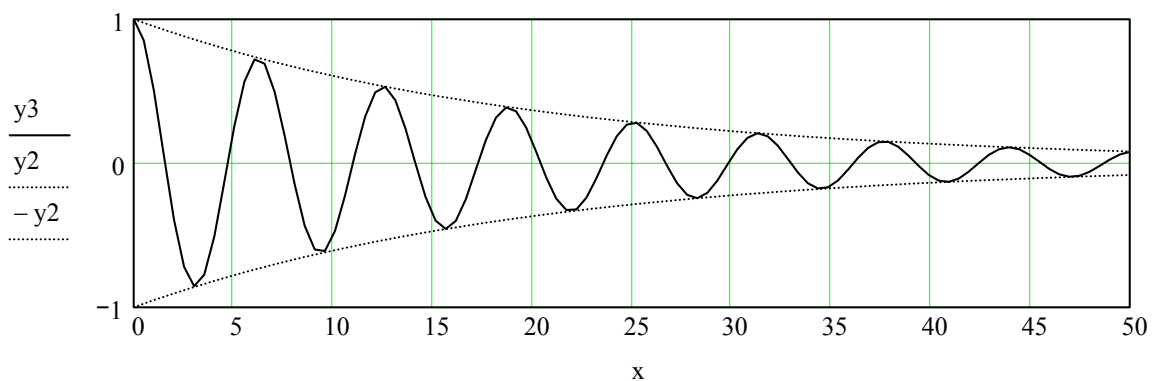
mit beliebigem negativem Exponenten ("Argument")

$$y2_i := e^{-(0.05x)_i}$$



ergeben multipliziert eine gedämpfte Schwingung

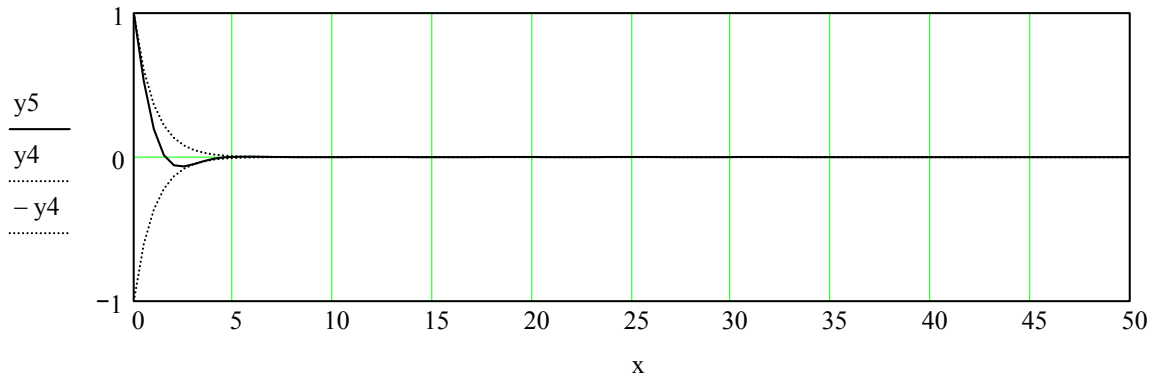
$$y3_i := e^{-(0.05 \cdot x)_i} \cdot (\cos(x)_i)$$



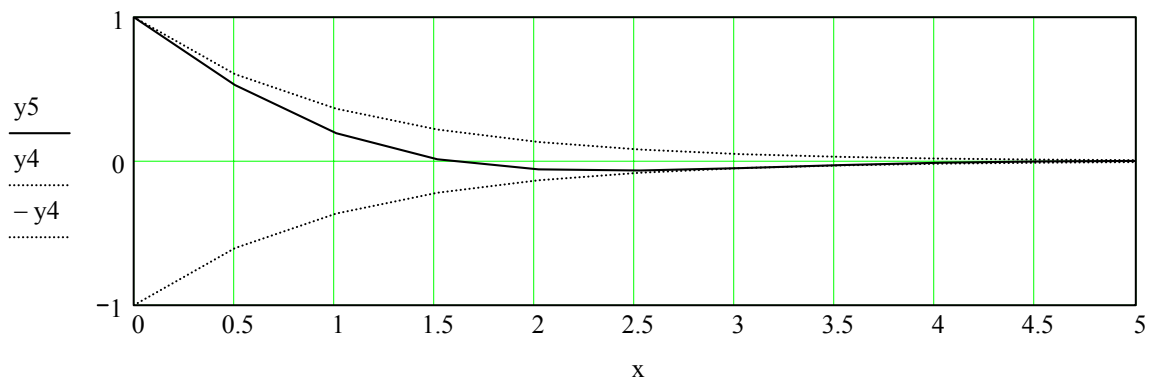
Ist das Argument der e-Funktion gleich dem der sin-/cos-Funktion, entsteht eine stark gedämpfte Schwingung

$$y4_i := e^{-x_i}$$

$$y5_i := y4_i \cdot y1_i$$



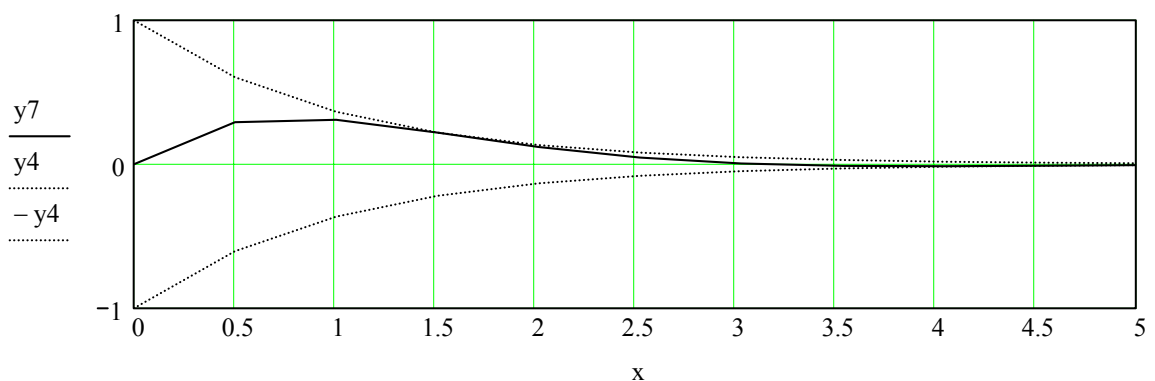
Vergrößerung



Gleiches Beispiel für Sinus

$$y6_i := \sin(x_i)$$

$$y7_i := y4_i \cdot y6_i$$



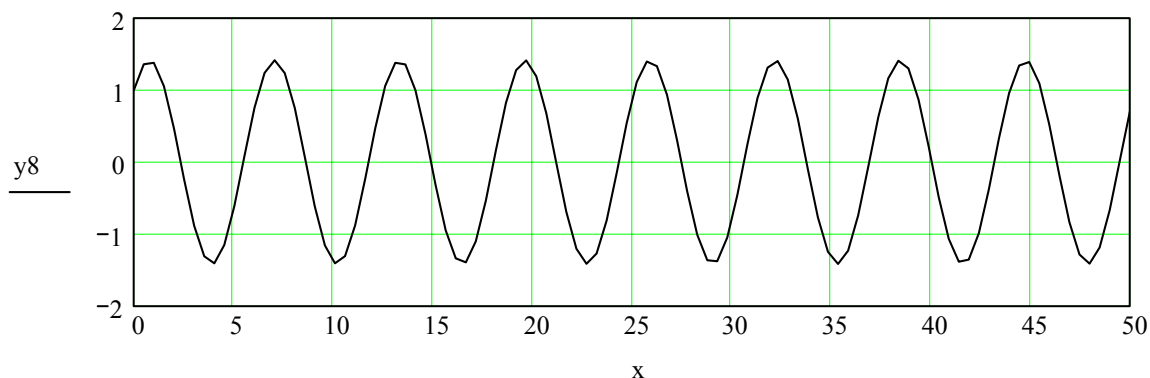
Die Länge einer Vollwelle

(Abstand von DREI Wendepunkten)

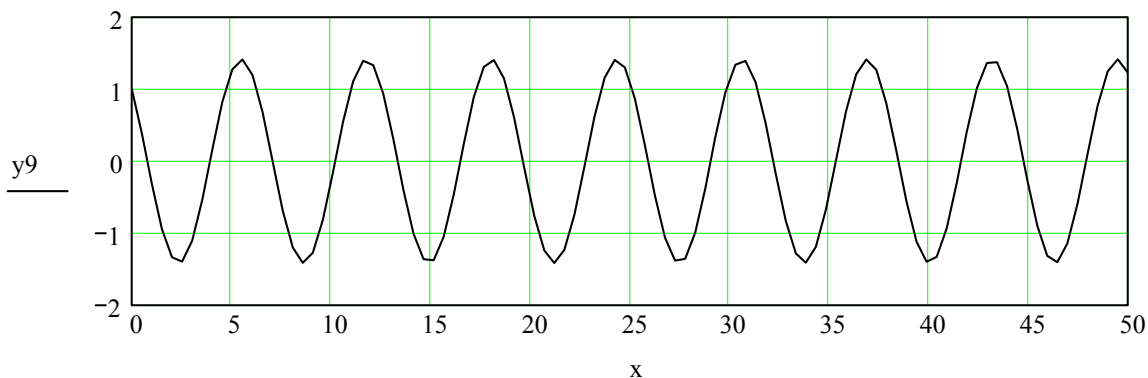
hängt NUR davon ab, wann das Argument der sin-/cos-Funktion der Wert $x = 2\pi$ erreicht.

Auch wenn die Funktion anders aussieht als gewohnt !

$$y8_i := y1_i + y6_i$$



$$y9_i := y1_i - y6_i$$



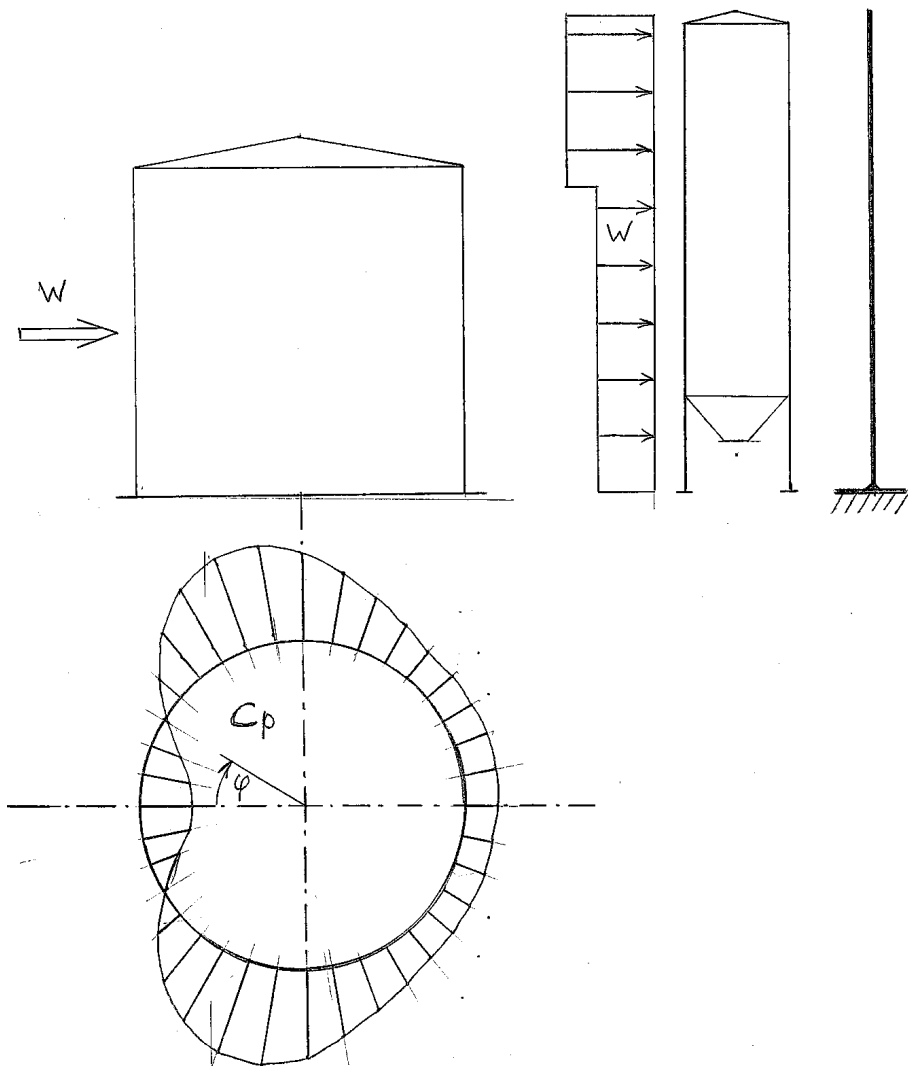
wenn man das Argument der sin-/cos-Funktion als $(\omega \cdot x)$

bezeichnet, dann gilt für die Periodendauer $T = 2 \cdot \pi / \omega$

oder umgeformt $\omega = 2 \cdot \pi / T$

in das Argument der sin-/cos-Funktion eingesetzt $(2 \cdot \pi / T \cdot x)$
jetzt sieht man: wenn x den Wert T erreicht,
dann steht in der Klammer $2 \cdot \pi$, und somit ist eine Periode vorbei

Lasten aus Wind



Skizze schematisch – Wind auf einen zylindrischen Behälter:

links: Druckverteilung entlang des Umfanges; rechts: Druckverteilung entlang der Höhe

1 Lastverteilung entlang des Umfanges

Bei der Umströmung eines Zylinders entsteht Druck gegen die Wand nur in einem relativ kleinen Bereich im Luv (windzugewandte Seite, siehe Skizze), an den übrigen Bereichen der Wand entstehen Sogkräfte (Tragflügel-Effekt).

Die Luv-Ordinate des Druckbeiwertes c_p bei $\varphi = 0$ (Anströmrichtung) wird definitionsgemäß auf 1,0 kalibriert, der Seitensog kann nach DIN 1055 Teil 4 das $-1,6$ -fache dieses Wertes betragen, der Hecksog erreicht Werte bis $-0,8$.

Lage und Größe des Seitensoges sowie Größe des Hecksoges sind abhängig von der *Reynoldszahl*, daher ergeben sich bei unterschiedlichen Bemessungswindgeschwindigkeiten und unterschiedlichen Behälterdurchmessern unterschiedliche Druckverteilungen (siehe DIN 1055 Teil 4).

Nach Bernoulli ist

$$q = 0,5 * \rho * v^2$$

oder

$$v = \sqrt{(2 * q / \rho)}$$

Nach DIN 4133 Stahlschornsteine darf gesetzt werden:

$$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$$

Damit wird:

$$q [\text{N/m}^2] = 0,5 * 1,25 \text{ kg/m}^3 * (v [\text{m/s}])^2$$

oder

$$v [\text{m/s}] = \sqrt{(2 * q [\text{N/m}^2] / 1,25 \text{ kg/m}^3)}$$

v [m/s]	v [km/h]	q [kN/m ²]
20,0	72	0,25
28,0	101	0,49
35,8	129	0,80
40,0	144	1,00
42,0	151	1,10
45,6	164	1,30
50,0	180	1,56

Ausführlichere Angaben zur Beschreibung der Windlasten entlang des Umfanges sind in *Ummenhofer/Knödel (2000)* enthalten.

2 Lastverteilung entlang der Höhe

In Höhenrichtung ist der Winddruck ähnlich einer Exponentialfunktion verteilt, dies ist bedingt durch die Bodenrauigkeit und die dadurch bedingte turbulente Grenzschicht.

Vereinfachend kann die Stufenverteilung nach DIN 1055 Teil 4 verwendet werden (siehe obige Skizze rechts).

Wenn die beiden Sprünge bei 8 m und 20 m beim Rechnen zu unhandlich sind, da man diese Bereiche getrennt voneinander erfassen muß, dann kann man sich auch auf DIN 4133 stützen. Dort ist im Anhang A Gleichung A.3 eine Formel angegeben, mit der man zylindrische Bauwerke bis zu einer Höhe von 50 m mit einer über die Höhe konstanten Ersatz-Windlast berechnen kann.

3 Schnittgrößen

3.1 Schnittgrößen in Meridianrichtung

Die oben beschriebene Druckverteilung entlang des Umfangs bewirkt bei dünnwandigen Zylindern (Stahl, Aluminium, GFK, wird bei Betonbehältern in der Regel nicht maßgebend) eine Verteilung der Längskräfte n_x , die unter Umständen von der erwarteten Verteilung nach

$$\sigma = M / W(\text{Kreisring})$$

erheblich zur unsicheren Seite abweicht. Sie genügend genau zu erfassen erfordert entweder relativ komplizierte Berechnungen unter Verwendung von *Fourier*-Reihen, oder den Einsatz der Finite Elemente Methode (FEM). Näherungsverfahren dazu sind in *Ummenhofer/Knödel* (2000) enthalten.

Der beschriebene Effekt ist bei dünnwandigen, kurzen Schalen groß, und bei dickwandigen, langen Schalen vernachlässigbar.

Ein Kriterium dafür, wann man nach Balkentheorie von einem eingespannten Kragarm ausgehen darf (siehe obige Skizze rechts), und nicht Schalentheorie rechnen muß, ist in DIN 4133 Abs. 6.1 angegeben:

$$L/R \geq 0,14 R/T + 10$$

Beispiel:

$$D = 10 \text{ m}$$

$$H = 10 \text{ m}$$

$$T = 5 \text{ mm}$$

$$R/T = 5000 \text{ mm} / 5 \text{ mm} = 1000$$

$$L/R = 10 \text{ m} / 5 \text{ m} = 2$$

$$0,14 * R/T + 10 = 0,14 * 1000 + 10 = 150$$

$$2 \ll 150 \quad \text{Bedingung nicht erfüllt}$$

Wenn man z.B. die Längsspannungen σ_x nur zu 10% ausgenutzt hat (was sich dadurch ergeben kann, daß der Beulnachweis für die Umfangsdruckspannungen maßgebend wird), kann man davon ausgehen, daß trotz des Verletzens dieser Bedingung die Bemessung in Ordnung ist.

Wenn das Balken-Kragarm-Kriterium erfüllt ist, geht die Berechnung ganz einfach.

Man ermittelt das Kippmoment M_x des Behälters mit den üblichen baustatischen Methoden. Die Spannung in der Standzarge ergibt sich dann aus

$$\sigma_x = M_x / W$$

Für dünnwandige Kreisringquerschnitte (auch für die Abmessungen von Beton-Behältern) gilt:

$$W = \pi * R^2 * T$$

Die Kraft F auf einen Anker (Ankerabstand a) ermittelt man "rückwärts" aus der Spannung:

$$n_x = \sigma_x * T$$

$$F = n_x * a$$

3.2 Schnittgrößen in Umfangsrichtung

Die oben beschriebene Druckverteilung entlang des Umfangs bewirkt, daß der Zylinder zu den Seiten auseinandergezogen wird, und an der Luvseite eingedrückt wird. In Umfangsrichtung des Zylinders entsteht dadurch ein Umfangsbiegemoment. Nach DIN 4133 Abs. A.10 beträgt dieses

$$M = q * D^2 / 8 \quad [\text{Einheit z.B. kNm/m, d.h. kNm je laufenden Meter Behälterlänge}]$$

q ist der anzusetzende Staudruck.

Das Mantelblech des Behälters wird dabei um seine schwache Achse gebogen, daher

$$W = T^2 / 6 \quad [\text{Einheit z.B. cm}^3 / \text{cm, d.h. cm}^3 \text{ je laufenden Meter Behälterlänge}]$$

Es wird empfohlen, das Biegemoment und das Widerstandsmoment jeweils für einen 1 m langen Schalenabschnitt zu berechnen. Dann werden die Bemessungsspannungen in der Form

$$\sigma_{d} = \gamma F * M / W$$

ermittelt.

Hinweis:

Dieser Nachweis ist nach DIN 4133 erst für $R/T \geq 160$ erforderlich, darunter (d.h. für dickerwandige Schalen) wird er nicht maßgebend.

4 Winderregte Schwingungen

Schlanke Behälter können im Sprachgebrauch von DIN 1055 Teil 4 "schwingungsanfällig" sein.

Dies hat zweierlei Auswirkungen:

- Bei starkem Wind (z.B. 40 m/s, siehe obige Tabelle) schwingen die Behälter in Windrichtung, da der Wind nicht gleichförmig laminar kommt sondern böig ist. Rechnerisch wird dies erfasst durch Erhöhung der statischen Windlasten.
- Bei schwachem Wind (z.B. 10-15 m/s, vgl. obige Tabelle) werden zylindrische Bauwerke durch die Kármán'schen Wirbel zu Querschwingungen, d.h. Auslenkungen quer zur anströmenden Windrichtung angeregt. Diese Querschwingungen treten häufig mit so großen Lastwechselzahlen auf, daß Nachweise gegen Ermüdung geführt werden müssen.

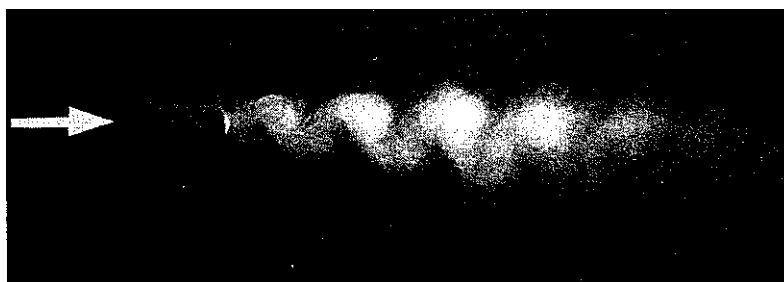


Bild 2.44: Kármán'sche Wirbelstraße hinter einem Zylinder ($Re = 10^4$)

(aus Ruscheweyh 1982)

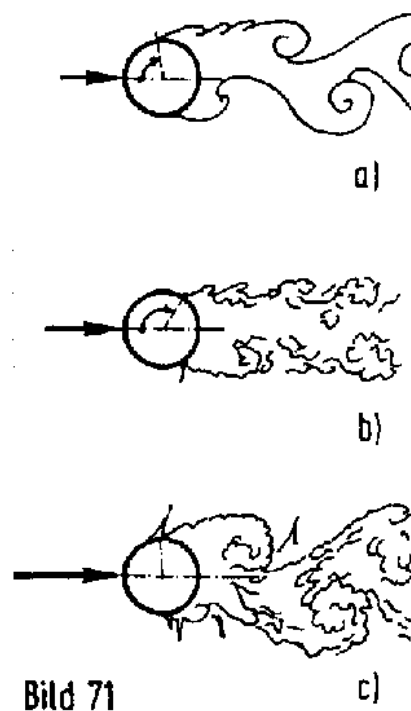


Bild 71

(aus Petersen Stahlbau 1977)

Rechenverfahren für winderregte Längs- und Querschwingungen sind in DIN 4133 enthalten.

Hinweis.

Ungeübt braucht man erfahrungsgemäß ein bis zwei Wochen (d.h. 40-80 Stunden !) bis man die Formeln in DIN 4133 so weit durchdrungen hat, daß man damit Ergebnisse erzielen kann, die man auch selber glauben mag.

5 Literatur

[1] DIN 1055: Lastannahmen für Bauten.

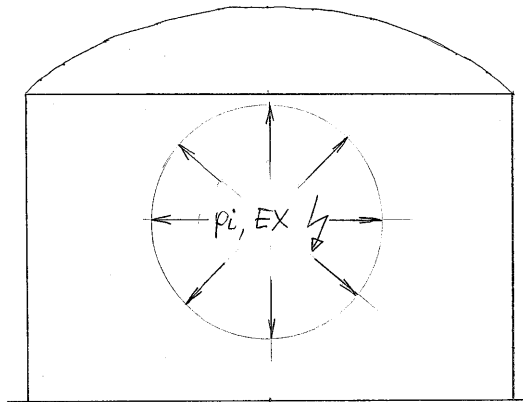
Teil 4: Verkehrslasten, Windlasten bei nicht schwingungsanfälligen Bauwerken. August 1986, 29 Seiten.

A1 Änderung: Berichtigungen. Juni 1987, 2 Seiten.

Einführungserlaß GABI BW (1989)

- [2] DIN 1055: Einwirkungen auf Tragwerke.
Teil 4: Windlasten. Entwurf März 2001.
- [3] DIN 4133: Schornsteine aus Stahl. November 1991.
"Einführungserlaß" vom 16. März 1993 - Az.: VI-2601.1/9. Gemeinsames Amtsblatt des Landes Baden-Württemberg 41 (1993) Nr. 13, S. 451.
"Einführungserlaß" Hessen vom 16.03.93
"Einführungserlaß" Bayern: AllMBL. 1993, S. 1215.
- [4] Petersen, Chr.: Stahlbau, 3. überarbeitete und erweiterte Auflage, 2. durchgesehener Nachdruck. Vieweg, Braunschweig 1997.
- [5] Ruscheweyh, H.: Dynamische Windwirkung an Bauwerken. Band 1: Grundlagen. Bauverlag GmbH, Berlin 1982
- [6] Ruscheweyh, H.: Dynamische Windwirkung an Bauwerken. Band 2: Praktische Anwendungen. Bauverlag GmbH, Berlin 1982
- [7] Ummenhofer, T., Knoedel, P.: Modelling of Boundary Conditions for Cylindrical Steel Structures in Natural Wind. Paper No. 57 in Papadrakakis, M., Samartin, A., Onate, E. (eds.): Proc., Fourth Int. Coll. on Computational Methods for Shell and Spatial Structures IASS-IACM, June 4-7, 2000, Chania-Crete, Greece.
- der Volltext kann auf www.peterknoedel.de heruntergeladen werden -

Lasten aus Explosion



Skizze schematisch – Explosionslasten in einem Behälter

1 Lastverlauf

Wenn ein zündfähiges Gemisch zündet, breitet sich eine Explosionswelle kugelförmig nach allen Raumseiten aus.

In einer Quelle des Umweltbundesamtes www.umweltbundesamt.de/anlagen/Beisp5.pdf wird für Holzstaub eine Druckanstiegsgeschwindigkeit von ca. 100 bar/Sekunde angegeben mit einem Maximaldruck von ca. 9 bar.

Der Explosionsdruck kann auch von außen wirken, wenn ein benachbarter Behälter explodiert. Eine übliche Annahme für ein Tanklager wäre z.B. ein Druck von 5 kN/m² entspr. 50 mbar.

Hinweis:

Im Zusammenhang mit Staubexplosionen in Silos gibt es in der BRD jährlich größenordnungsmäßig 3 tödliche Unfälle.

2 Schnittgrößen

2.1 Explosion im Behälter

Der oben beschriebene zeitliche und räumliche Verlauf der Druckwelle entlang der Behälterwände wird üblicherweise rechnerisch nicht erfaßt. Der Lastfall "Explosion" wird wie ein Innen-

druck behandelt, es wird dabei nur nach dem Maximaldruck bzw. dem "Entlastungsdruck (siehe unten) bemessen.

2.2 Explosion außerhalb des Behälters

Der anzunehmende Maximaldruck hängt von der Entfernung zum möglichen Explosionsort ab. Er wird z.B. vom Betreiber oder den Aufsichtsbehörden vorgegeben.

Der Explosionsdruck wird dann wie eine Windlast behandelt.

3 Konstruktive Hinweise

Silos und Behälter werden in der Regel nicht für die volle Explosionslast bemessen, weil das viel zu unwirtschaftlich ist.

Im Dach werden z.B. Berstscheiben, Berstklappen oder Berstfolien angebracht, die bei Explosion mehr oder weniger kontrolliert wegfliegen. Die Summe der Entlastungsöffnungen im Dach ist z.B. so bemessen, daß sich im Silo nur ein "Entlastungs-Druck" von z.B. 1 bar aufbaut. Die Berstscheiben sprechen dabei z.B. schon bei 0,5 bar an.

Bei Flachbodentanks nach DIN 4119 ist z.B. geregelt, daß die Dachecknaht nur als 3-mm-Reißnaht ausgebildet werden soll.

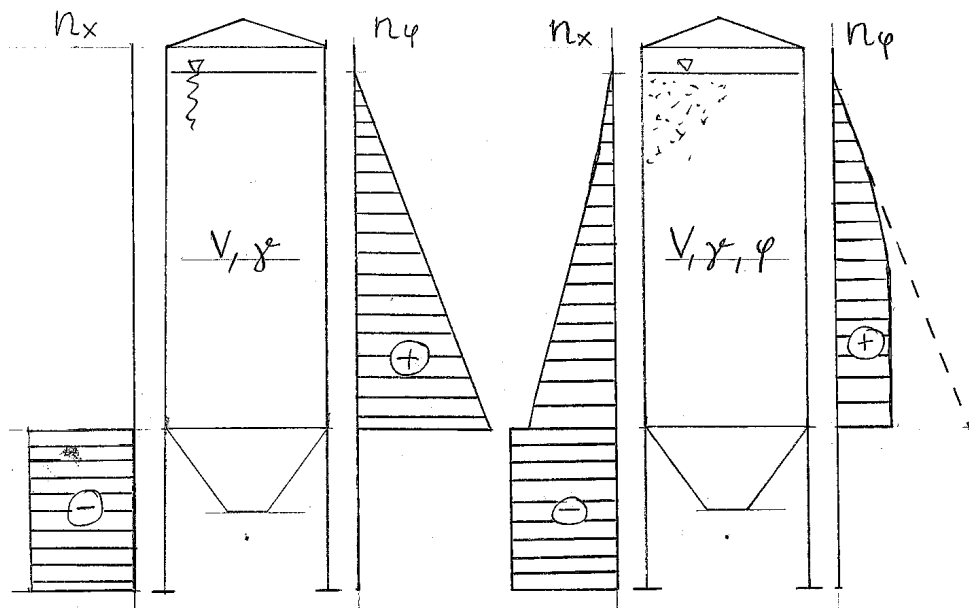
4 Literatur

- [1] DIN 4119: Oberirdische zylindrische Flachboden-Tankbauwerke aus metallischen Werkstoffen.
Teil 1: Grundlagen, Ausführung, Prüfungen. Juni 1979.
Teil 2: Berechnung. Februar 1980.
(In der LTB enthalten)

Lasten aus Füllung

0. Inhalt

0.	Inhalt	1
1.	Lasten aus Flüssigkeit	1
1.1	Lastverteilung	1
1.2	Schnittgrößen	2
2.	Lasten aus Schüttgut	3
2.1	Lastverteilung	3
2.2	Schnittgrößen	3
3.	Literatur	4



Skizze schematisch – Schnittgrößen in einem zylindrischen Behälter auf Standzarge:

links: Eigenlasten aus Flüssigkeitsfüllung; rechts: Eigenlasten aus Schüttgutfüllung

1. Lasten aus Flüssigkeit

1.1 Lastverteilung

Im Behälter stellt sich ein hydrostatischer (höhenabhängiger) Innendruck ein. Der Innendruck nimmt vom freien Flüssigkeitspegel mit der Höhe (bzw. Tiefe) linear zu.

Die Höhenordinate z wird von der freien Flüssigkeitsoberfläche positiv nach unten gemessen.

$$p(z) = z * \gamma$$

bzw.

$$p(z) = z * \rho * g$$

mit

z Höhenordinate (siehe oben)

γ spezifisches Gewicht [z.B. kN/m³]

ρ Wichte [z.B. kg/m³]

g Erdbeschleunigung ca. 9,81 m/s²

Das Gesamtgewicht der Füllung beträgt

$$G = V * \gamma$$

mit

V Betriebsvolumen aus Zylinder und Auslaufkegel

1.2 Schnittgrößen

Aus dem Innendruck entsteht in der Behälterwand eine (ebenfalls höhenabhängige) Umfangszugspannung $n\varphi$, nach der "Kesselformel" beträgt sie

$$n\varphi(z) = p(z) * R$$

Die Verteilung entlang der Behälterachse ist in der obigen Skizze links dargestellt.

Die Behälterwand nimmt aus der Flüssigkeit keine Vertikallasten auf.

Das gesamte im Behälter befindliche Flüssigkeitsgewicht "steht" daher auf dem Behälterboden bzw. Auslauftrichter.

In der Standzarge herrscht kein Innendruck, daher auch keine Umfangszugspannungen, dafür aber das volle Eigengewicht der Füllung, das vom Auslauftrichter bzw. Behälterboden an die Standzarge "gehängt" wird. Dieses Gewicht verteilt sich gleichmäßig über den Umfang der Standzarge.

$$n_x = G / (2\pi * R)$$

2. Lasten aus Schüttgut

2.1 Lastverteilung

Im Unterschied zur Flüssigkeitsfüllung hat Schüttgut noch die Stoffeigenschaft "innere Reibung" ϕ (nicht zu verwechseln mit dem Umfangswinkel ϕ) und gemeinsam mit der Behälterwand die Stoffpaareigenschaft "Wandreibungswinkel" ϕ . Zahlenwerte sind in DIN 1055 Teil 6 angegeben.

Im oberen Teil des Behälters (ca. 1-2 Behälterdurchmesser ab Schüttgutoberfläche) stellt sich ein quasi-hydrostatischer Innendruck ein.

Im unteren Teil des Behälters (mehr als ca. 2 Behälterdurchmesser ab Schüttgutoberfläche) ist der Innendruck konstant, d.h. unabhängig von der Höhenlage.

Qualitativ gleich sind die Wandreibungslasten (genauer: Wandreibungs-Schubspannungen) entlang des Behälters verteilt.

Auf dem Behälterboden bzw. Auslaufkegel steht eine Last, die dem Eigengewicht des Schüttgutes im Kegel entspricht plus einem gedachten Überschüttungskegel.

In DIN 1055 Teil 6 sind Formeln für die Berechnung der Lasten senkrecht zu Zylinderwand und Kegel (d.h. Innendrucke) sowie Wandreibungslasten (d.h. Schubspannungen) angegeben.

Hinweis:

Wenn man die vertikalen Lasten nach DIN 1055 Teil 6 addiert, bekommt man mehr, als an Füllgewicht im Silo überhaupt enthalten ist. Dies ist für die Bemessung richtig, da die Lasten aus Schüttgut oft nicht gleichmäßig über den Umfang verteilt sind, und für die Bemessung der größtmögliche Wert interessant ist.

2.2 Schnittgrößen

Wie bei der Flüssigkeitsfüllung entsteht eine Umfangszugspannung $n\phi$, die nach der Kesselformel dem vorhandenen Innendruck proportional ist.

Die Verteilung entlang der Behälterachse ist in der obigen Skizze rechts dargestellt.

Die Behälterwand sammelt von oben nach unten die Wandreibungslasten aus dem Schüttgut auf. In der zylindrischen Wandung ist daher ein großer Teil des Eigengewichts aus Füllung schon oberhalb des Kegelanschlusses in der Wand enthalten.

Am Kegelanschluß kommt sprungartig das Eigengewicht des Füllgutes im Kegel dazu.

Wie bei der Flüssigkeitsfüllung entstehen in der Standzarge keine Umfangszugspannungen.

Die Last für die Standzarge ermittelt man sinnvollerweise nicht aus der Summe der nach DIN 1055 Teil 6 ermittelten Zellenlasten, sondern direkt aus dem Gesamtgewicht der Füllung G. Dieses Gewicht verteilt sich gleichmäßig über den Umfang der Standzarge.

$$n_x = G / (2\pi * R)$$

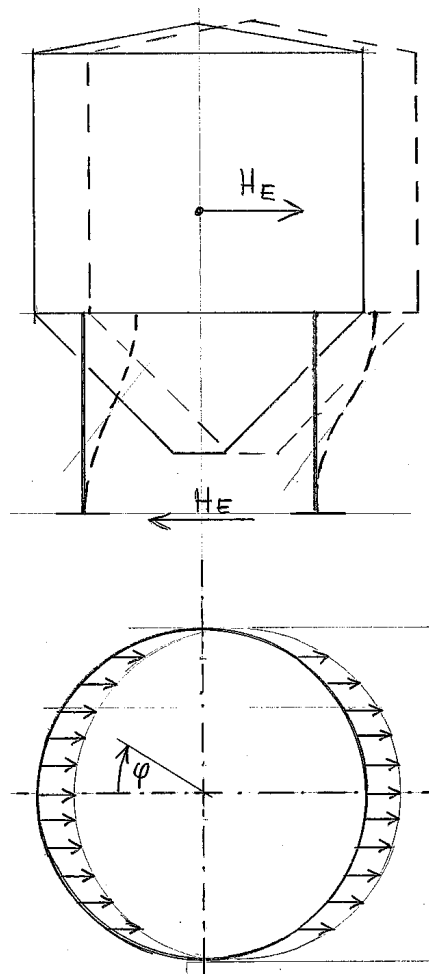
3. Literatur

- [1] DIN 1055: Einwirkungen auf Tragwerke.
Teil 6: Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter. März 2005.
(siehe auch EC1 und ISO 11697)
- [2] Martens, P. (Hrsg.): Silo-Handbuch. Ernst & Sohn, Berlin 1988.
- [3] Ruckenbrod, C., Schlüter, F.-H.: Silolasten nach der neuen DIN 1055-6. Beton- und Stahlbetonbau 101 (2006), Heft 3, S. 138-151.

nicht mehr gültig !!!

- [4] DIN 1055: Lastannahmen für Bauten.
Teil 6: Lasten in Silozellen. Mai 1987;
Beiblatt zu Teil 6, Mai 1987, 6 Seiten.
Einführungserlaß GABI BW (1989)

Lasten aus Erdbeben



Skizze schematisch – Erdbebenlasten an einem aufgeständerten Behälter:
unten: Druckverteilung entlang des Umfangs; oben: Schwingungsfigur

1. Lastverteilung entlang des Umfangs

Erdbebenlasten resultieren aus einer Horizontalbeschleunigung des Bodens, der das Bauwerk aufgrund seiner Massenträgheit nicht folgen will.

Zur Berechnung stellt man sich veranschaulichend vor, die Bauwerksmasse würde in folge einer äußeren Last horizontal beschleunigt werden.

Die ungünstigste Bodenbeschleunigung beträgt $a_g = 0,8 \text{ m/s}^2$ in Erdbebenzone 3 nach Tabelle 2.

Gewöhnliche Bauten haben einen Bedeutungsbeiwert $\gamma_I = 1,0$ nach Tabelle 3 (kann für wichtige Gebäude, z.B. Krankenhäuser, den Wert 1,4 annehmen).

Der höchste Untergrundparameter $S = 1,50$ ergibt sich bei einer Kombination der geologischen Untergrundklasse R (felsig) mit der Baugrundklasse C.

Der Verstärkungsbeiwert beträgt $\beta_0 = 2,5$ für eine Dämpfung von 5 %.

Der ungünstigste Verhaltensbeiwert $q = 1,0$ (steht im Nenner) ergibt sich bei Stahlbauten für die Duktilitätsklasse 1 (kann auch 1,5 sein).

Die maximale Querbeschleunigung beträgt nach Gleichung 7:

$$S_{d} = a_g \cdot \gamma_I \cdot S \cdot \beta_0 / q$$

mit ungünstigsten Zahlenwerten erhält man für Erdbebenzone 3:

$$S_{d} = 0,8 \text{ m/s}^2 \cdot 1,0 \cdot 1,50 \cdot 2,5 / 1,0 = 3,0 \text{ m/s}^2 \quad \text{entspr. 30 \% g}$$

für Erdbebenzone 1 erhält man im ungünstigsten Fall

$$S_{d} = 0,4 \text{ m/s}^2 \cdot 1,0 \cdot 1,50 \cdot 2,5 / 1,0 = 1,5 \text{ m/s}^2 \quad \text{entspr. 15 \% g}$$

Zur Bemessung der Verbände oder Wandscheiben ist diese Beschleunigung noch mindestens mit $\delta = 1,3$ nach Gl. (16) zu multiplizieren, damit wird unplanmäßige Torsionswirkung berücksichtigt.

Die rechnerische Horizontalbeschleunigung kann daher

$$1,3 \cdot 30 \% g = \text{ca. } 40 \% g$$

betragen (bei Krankenhäusern liegt sie noch höher).

Dies bedeutet zwar eine Auslenkung des Gewichtspfeiles "nur" um

$$\arctan(0,40) = \text{ca. } 22^\circ$$

aber bei einem Wasserbehälter mit

$$D = 10 \text{ m};$$

$$H = 10 \text{ m};$$

$$V = 785 \text{ m}^3$$

$$G = 7850 \text{ kN}$$

beträgt die resultierende Erdbeben-Horizontalkraft

$$H_E = \text{ca. } 3100 \text{ kN}$$

In der Draufsicht (siehe obige Skizze) stellt man sich vor, die Füllung sei in Richtung des Erdbeben-Angriffes in gleichdicke Scheiben geschnitten. Jede Scheibe bewirkt dann entsprechend ihrer

Länge eine Horizontallast, gedacht als "Sog" auf die "Luvseite" und Druck auf die "Leeseite". Insgesamt entsteht eine Belastung, die nach der Beziehung

$$p(\varphi) = p_0 * \cos(\varphi)$$

entlang des Umfanges verteilt ist.

Den Maximalwert p_0 erhält man aus der Beziehung

$$p_0 = HE / (\pi * R)$$

Der Maximalwert ist damit genau doppelt so groß, als hätte man die Erdbebenlast gleichmäßig auf den ganzen Umfang verteilt.

$$p_{\text{mittel}} = HE / (2\pi * R)$$

Das Schwappen der Flüssigkeit braucht in kleinen bis mittleren Behältern nicht berücksichtigt zu werden.

2. Schnittgrößen

Bei kleinen und mittleren Behältern werden die Schnittgrößen aus Erdbeben in der Behälterwand selbst üblicherweise nicht nachgewiesen:

Die $\cos(\varphi)$ -förmige Flächenlast ist eine schalengerechte Belastung, die im Aufstandskreis eine $\cos(\varphi)$ -förmige Längskraft n_x hervorruft, deren Maximalwerte genügend genau mittels

$$\sigma_x = M_x / W(\text{Kreisring})$$

bestimmt werden können.

Für dünnwandige Kreisringquerschnitte (auch für die Abmessungen von Beton-Behältern) gilt:

$$W = \pi * R^2 * T$$

Bei Behältern auf Einzelstützen muß man besonders aufpassen (siehe Verformungsfigur in der obigen Skizze):

Ideal sind Kreuzverbände (oder eine drucksteife Diagonale).

Falls dies nicht möglich ist – z.B. wegen der erforderlichen Durchfahrt von Fahrzeugen – muß man möglichst steife Rahmen bauen. Hier ist nicht nur auf die Festigkeitsbemessung zu achten, sondern auch darauf, daß die Horizontalverformungen nicht zu groß sind.

3. Literatur

- [1] DIN 4149:2005-04 Bauten in deutschen Erdbebengebieten. Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten.
(In LTB 2005 (Nov. 05) Baden-Württemberg aufgeführt Stand 25.02.06 www.im...)
- [2] Karte der Erdbebenzonen und geologischen Untergrundklassen für Baden-Württemberg. Herausgegeben vom Innenministerium Baden-Württemberg, 1. Aufl. 2005.
- [3] DIN V ENV 1998 (EC8): Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben.
Teil 1-1:1997-06: Grundlagen; Erdbebeneinwirkungen und allgemeine Anforderungen an Bauwerke.
Teil 1-2:1997-06: Grundlagen; Allgemeine Regeln für Hochbauten.
Teil 1-3:1997-06: Grundlagen; Baustoffspezifische Regeln für Hochbauten.
Teil 1-4:1999-09: Grundlagen; Verstärkung und Reparatur von Hochbauten.
Teil 2:1998-07: Brücken.
Teil 3:1999-09: Türme, Maste und Schornsteine.
Teil 4:2001-07: Silos, Tankbauwerke und Rohrleitungen.
Teil 5:1997-06: Gründungen, Stützbauwerke.
- [4] Bachmann, H.: Erdbebensicherung von Bauwerken. Birkhäuser, 2. Auflage, Basel 2002.
- [5] Gehrig, H.: Vereinfachte Berechnung flüssigkeitsgefüllter verankerter Kreiszylinderschalen unter Erdbebenbelastung. Stahlbau 73 (2004), Heft 1, S. 37-45.
- [6] Knödel, P.: Bauen von Holzhäusern in Erdbebengebieten Deutschlands. Eintägiges Seminar mit Prof. Steinmetz, Technische Akademie Südwest, Kaiserslautern, 05.04.06. Vortragsskript unter www.peterknoedel.de.
- [7] Meskouris, K., Hinzen, K.-G.: Bauwerke und Erdbeben. Grundlagen – Anwendung – Beispiele. Vieweg, Wiesbaden 2003.

Nicht mehr gültig !!!

- [8] DIN 4149: Bauten in deutschen Erdbebengebieten.
Teil 1: Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten. April 1981.
Teil 1 A1: Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten. Änderung 1, Karte der Erdbebenzonen.
Beiblatt 1: Zuordnung von Verwaltungsgebieten zu den Erdbebenzonen. April 1981.
- [9] Karte der Erdbebenzonen für Baden-Württemberg. Landesvermessungsamt Baden-Württemberg 1972, III. Aufl. 1988, im Auftrag des Innenministeriums.

Zylinder unter Randstörung - Radiale Ringlast

(Quelle: Girkmann Flächentragwerke Abs. 197; Formular Z-Stoer-R_05-09-26.mcd)

Geometrie

Radius $a := 5.0\text{m}$

Wanddicke $t := 4\text{mm}$

Werkstoff

Stahl - E-Modul $E := 2.1 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Querdehnzahl $\mu := 0.3$

Parameter

Plattensteifigkeit $K := \frac{E \cdot t^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)}$ $K = 1231 \text{Nm}$

Wellenlängenparameter $\lambda := \frac{1}{\sqrt{a \cdot t}} \cdot \sqrt[4]{3 \cdot (1 - \mu^2)}$ $\lambda = 9.09 \frac{1}{\text{m}}$

Halbwellenlänge (=Abstand der Wendepunkte in der Biegelinie)

$\Lambda := \frac{\pi}{\lambda}$ $\Lambda = 346 \text{mm}$

Vorbereiten der graphischen Darstellung

start := 0mm end := 1m Npts := 100 i := 1..Npts

step := $\frac{\text{end} - \text{start}}{\text{Npts} - 1}$ $x_i := \text{start} + \text{step} \cdot (i - 1)$

Randstörgröße

Radiale, nach innen gerichtete Ringlast $R := 1.0 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Schnittgrößen

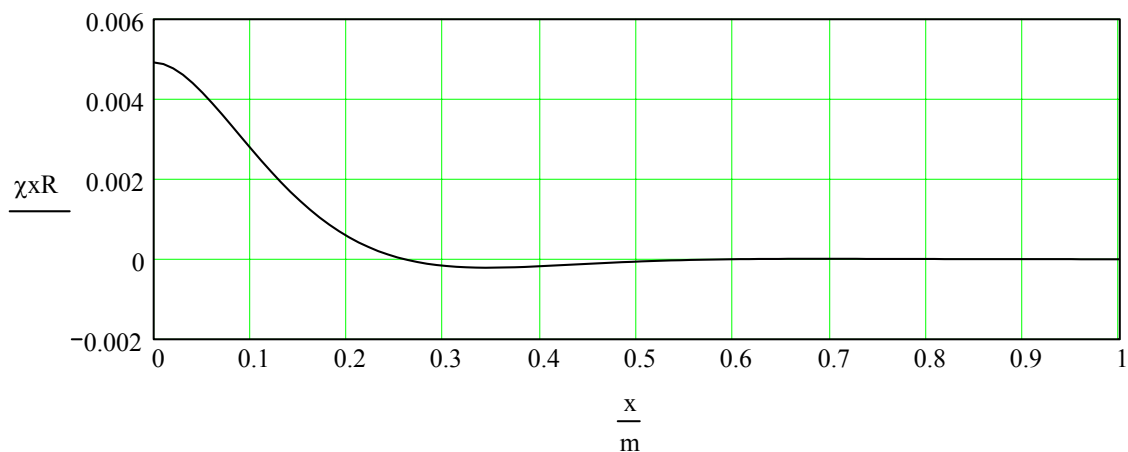
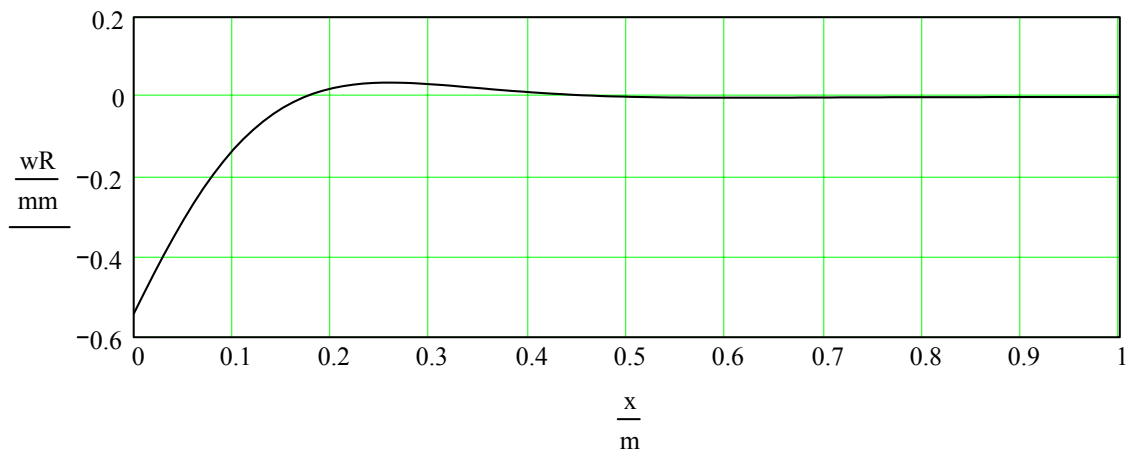
Radiale Verformung $wR_i := \frac{-R}{2 \cdot K \cdot \lambda^3} \cdot e^{-\lambda \cdot x_i} \cdot \cos(\lambda \cdot x_i)$

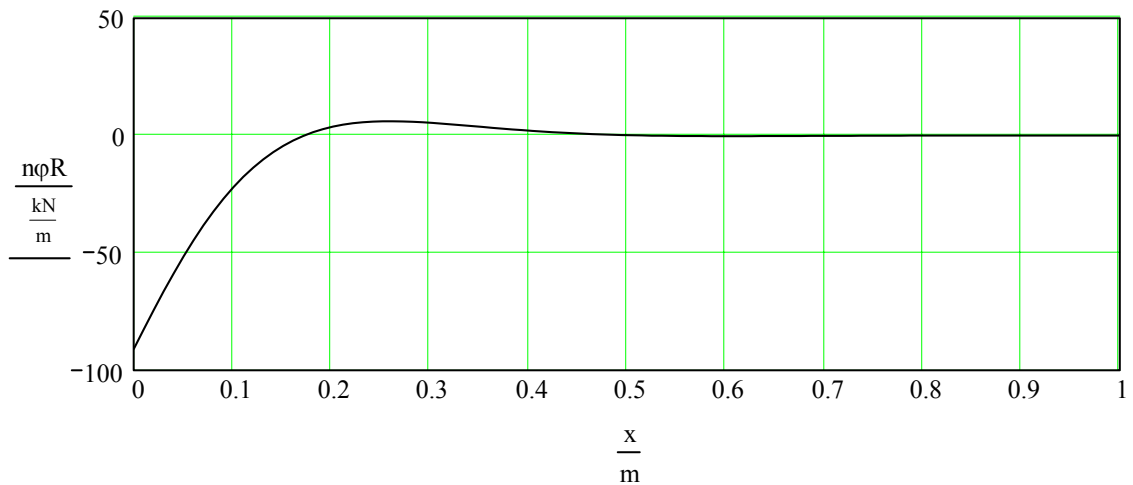
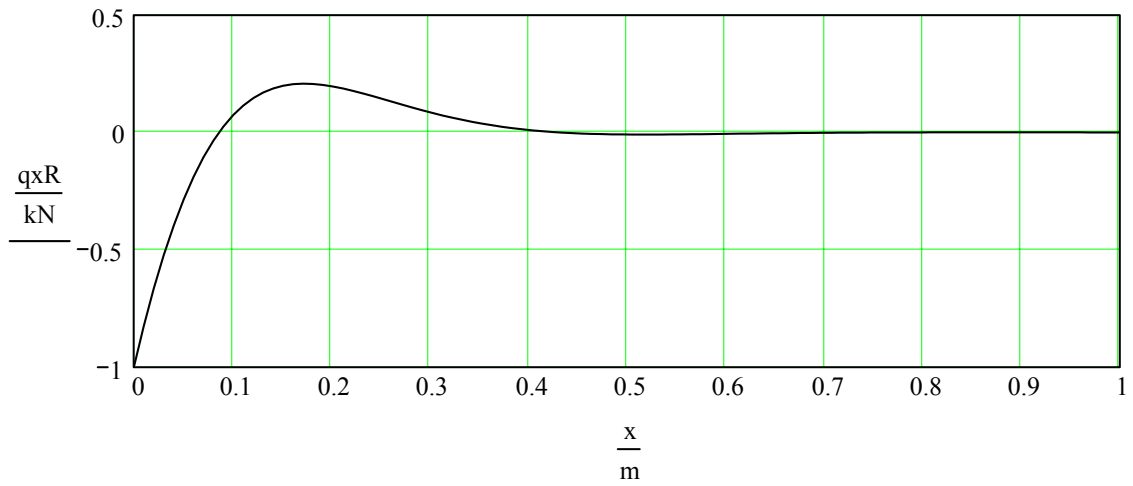
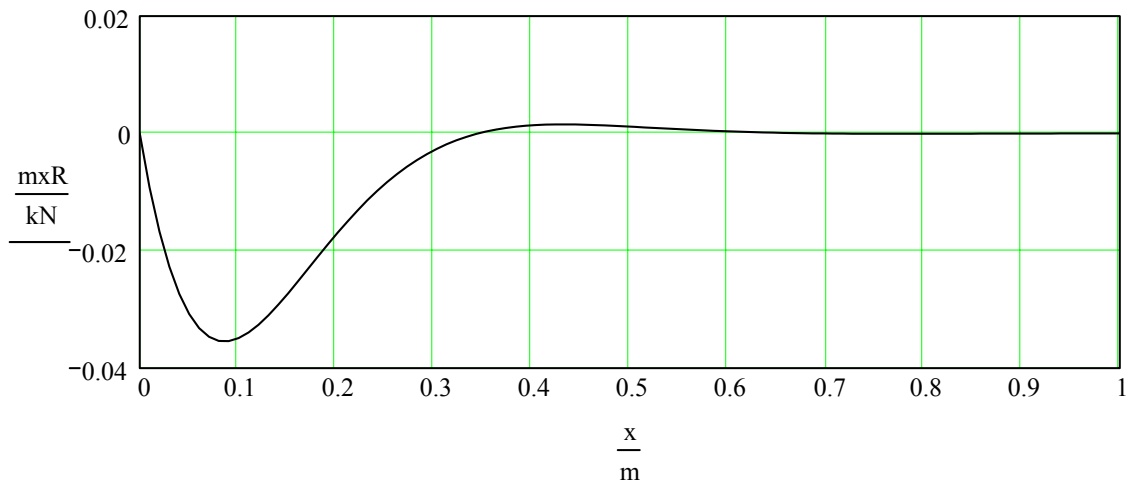
Tangenten-Neigung (Meridian) $\chi_{xR_i} := \frac{R}{2 \cdot K \cdot \lambda^2} \cdot e^{-\lambda \cdot x_i} \cdot (\cos(\lambda \cdot x_i) + \sin(\lambda \cdot x_i))$

Biegemoment (Meridian) $m_{xR_i} := \frac{-R}{\lambda} \cdot e^{-\lambda \cdot x_i} \cdot \sin(\lambda \cdot x_i)$

Querkraft (Meridian) $q_{xR_i} := -R \cdot e^{-\lambda \cdot x_i} \cdot (\cos(\lambda \cdot x_i) - \sin(\lambda \cdot x_i))$

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





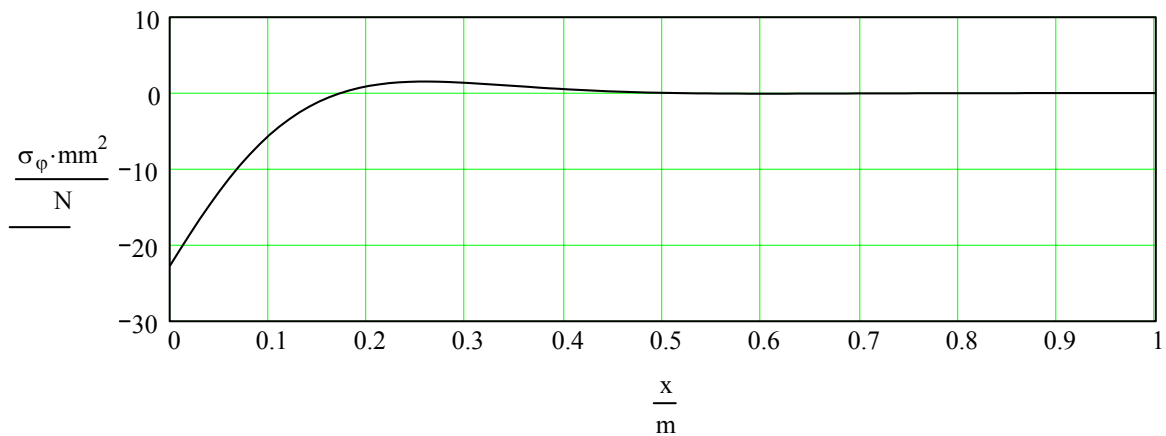
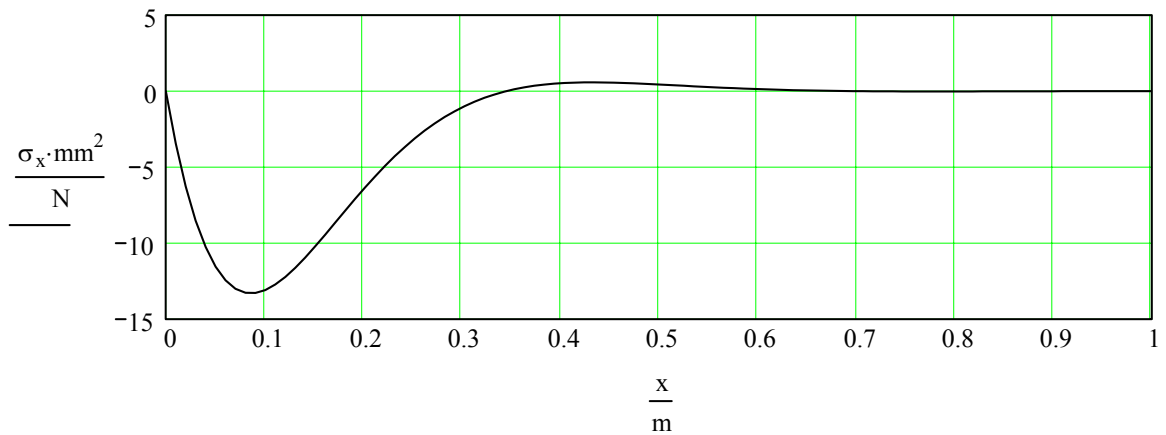
Auswertung der Spannungen

Umfangsspannungen

$$\sigma_{\varphi_i} := \frac{n\varphi R_i}{t}$$

Meridianspannungen aus Moment

$$\sigma_{x_i} := \frac{m x R_i \cdot 6}{t^2}$$



Zylinder unter Randstörung - Krepelmoment

(Quelle: Girkmann Flächentragwerke Abs. 197; Formular Z-Stoer-M_05-09-26.mcd)

Geometrie

Radius $a := 5.0\text{m}$

Wanddicke $t := 4\text{mm}$

Werkstoff

Stahl - E-Modul $E := 2.1 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Querdehnzahl $\mu := 0.3$

Parameter

Plattensteifigkeit $K := \frac{E \cdot t^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)}$ $K = 1231 \text{Nm}$

Wellenlängenparameter $\lambda := \frac{1}{\sqrt{a \cdot t}} \cdot \sqrt[4]{3 \cdot (1 - \mu^2)}$ $\lambda = 9.09 \frac{1}{\text{m}}$

Halbwellenlänge (=Abstand der Wendepunkte in der Biegelinie)

$\Lambda := \frac{\pi}{\lambda}$ $\Lambda = 346 \text{mm}$

Vorbereiten der graphischen Darstellung

start := 0mm end := 1m Npts := 100 i := 1 .. Npts

step := $\frac{\text{end} - \text{start}}{\text{Npts} - 1}$ $x_i := \text{start} + \text{step} \cdot (i - 1)$

Randstörgröße

Krepelmoment, nach außen krepelnd $M := 1.0 \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$

Schnittgrößen

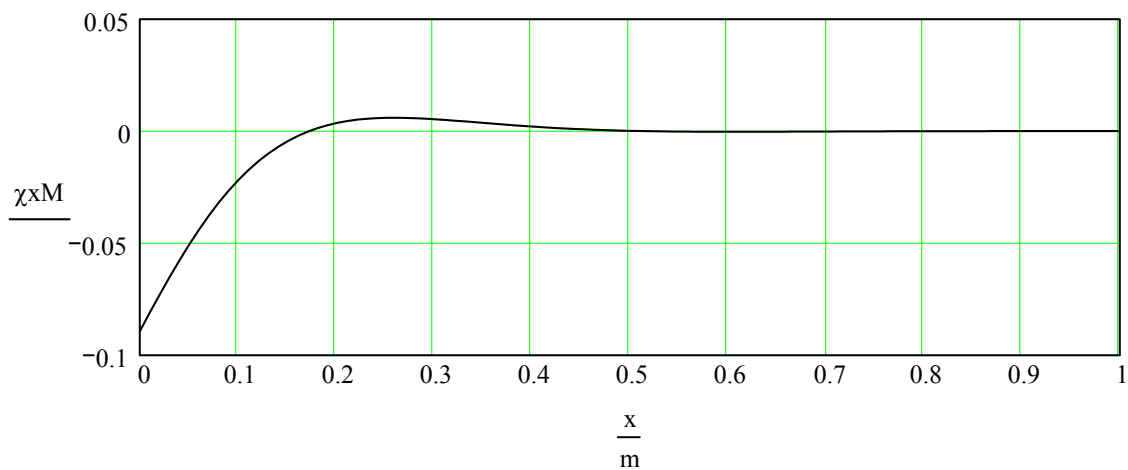
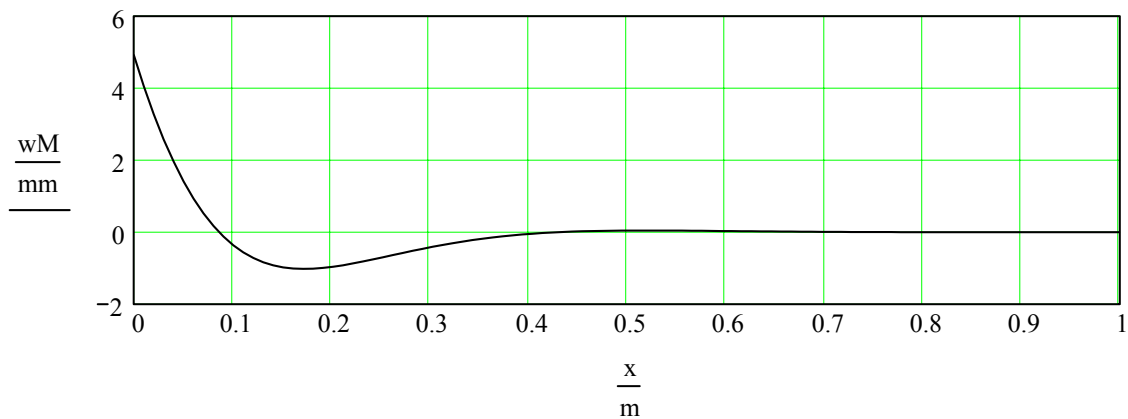
Radiale Verformung $wM_i := \frac{M}{2 \cdot K \cdot \lambda^2} \cdot e^{-\lambda \cdot x_i} \cdot (\cos(\lambda \cdot x_i) - \sin(\lambda \cdot x_i))$

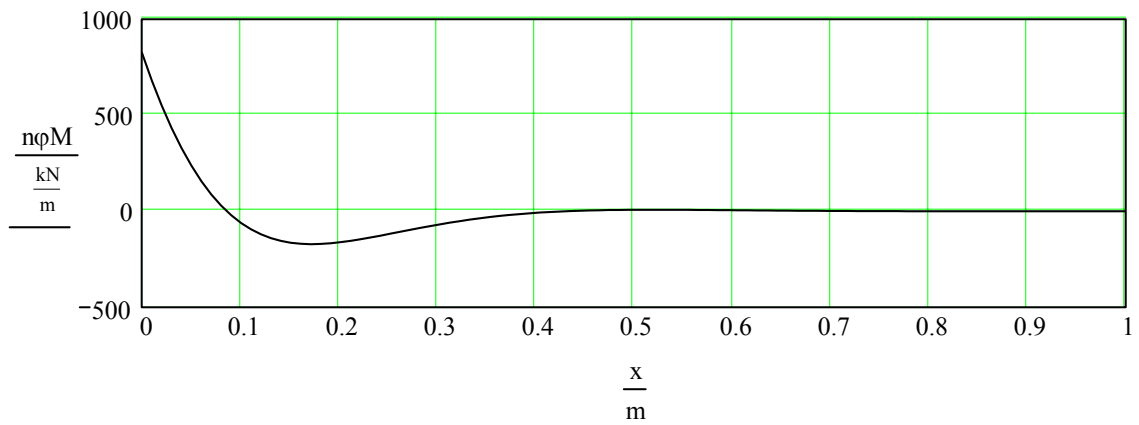
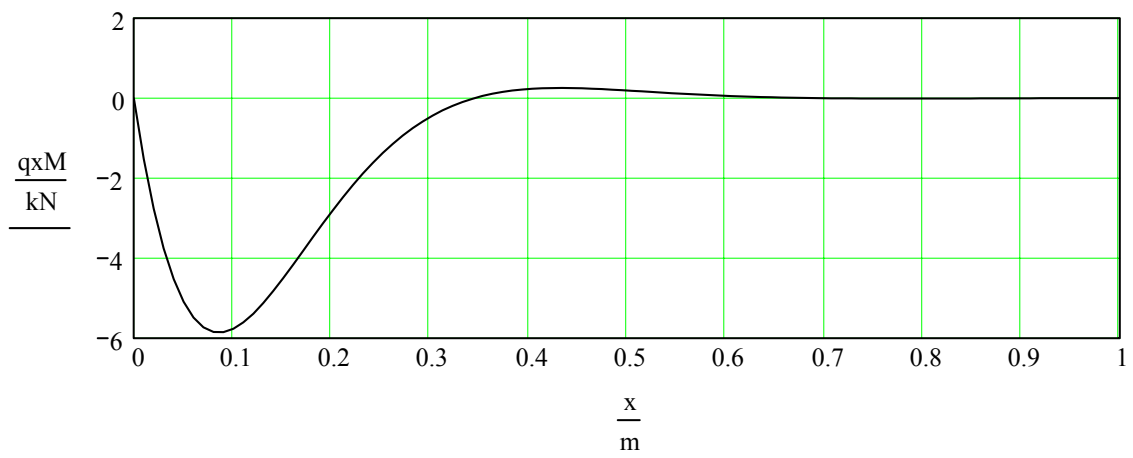
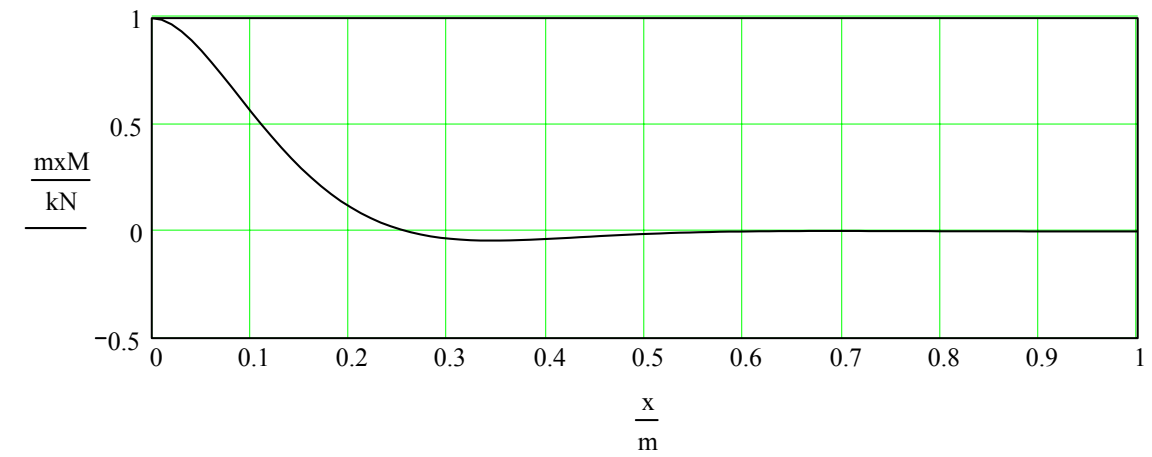
Tangenten-Neigung $\chi_{xM_i} := \frac{-M}{K \cdot \lambda} \cdot e^{-\lambda \cdot x_i} \cdot \cos(\lambda \cdot x_i)$

Biegemoment (Meridian) $m_{xM_i} := M \cdot e^{-\lambda \cdot x_i} \cdot (\cos(\lambda \cdot x_i) + \sin(\lambda \cdot x_i))$

Querkraft (Meridianrichtung) $q_{xM_i} := -2 \cdot \lambda \cdot M \cdot e^{-\lambda \cdot x_i} \cdot \sin(\lambda \cdot x_i)$

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





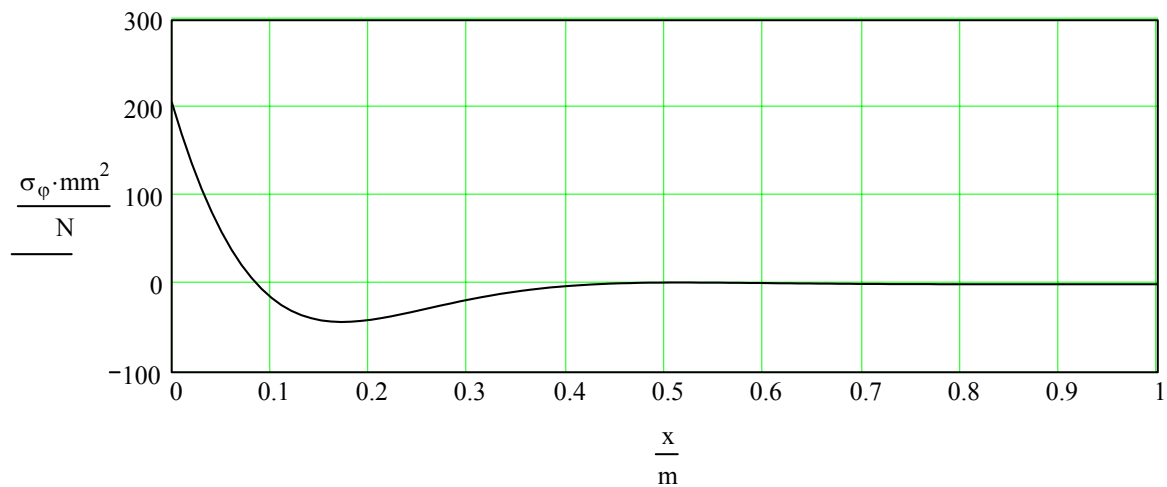
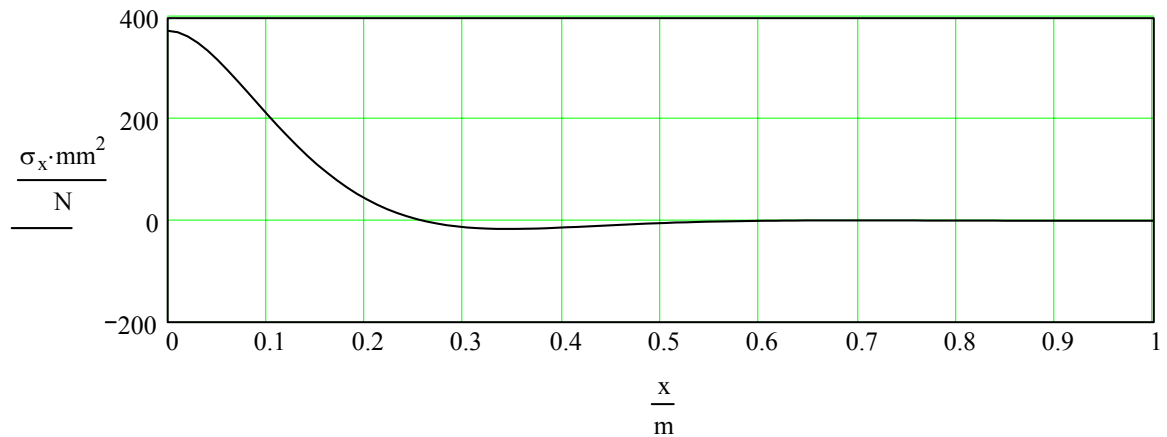
Auswertung der Spannungen

Umfangsspannungen

$$\sigma_{\varphi_i} := \frac{n\varphi M_i}{t}$$

Meridianspannungen aus Moment

$$\sigma_{x_i} := \frac{m x M_i \cdot 6}{t^2}$$



Zylinder - Verträglichkeit mit unendlich steifer Bodenplatte

(Quelle: Girkmann Flächentragwerke Abs. 197; Formular Z-Vertraeg_05-09-26.mcd)

Geometrie

Radius $a := 5.0\text{m}$

Wanddicke $t := 4\text{mm}$

Werkstoff

Stahl - E-Modul $E := 2.1 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Querdehnzahl $\mu := 0.3$

Parameter

Plattensteifigkeit $K := \frac{E \cdot t^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)}$ $K = 1.23 \text{ kNm}$

Wellenlängenparameter $\lambda := \frac{1}{\sqrt{a \cdot t}} \cdot \sqrt[4]{3 \cdot (1 - \mu^2)}$ $\lambda = 9.09 \frac{1}{\text{m}}$

Halbwellenlänge (=Abstand der Wendepunkte in der Biegelinie)

$\Lambda := \frac{\pi}{\lambda}$ $\Lambda = 346 \text{ mm}$

Verformungen aus dem (freigeschnittenen) Membranspannungszustand:

Radiale Verformung $w_0 := 3.0\text{mm}$

Tangentenverdrehung (näherungsweise) $\chi_0 := 0 \frac{\text{mm}}{\text{mm}}$

Verträglichkeitsbedingung:

Bestimme für den freigeschnittenen Rand durch Rechnen (oder Probieren !) die Größen Ringkraft R und Kreppelmoment M so, daß sie Summe der Radialverschiebungen w und die Summe der Tangentenverdrehungen χ (chi) aus dem Membranspannungszustand und den Störgrößen jeweils Null ergibt.

$$w = w_R + w_M + w_0 \quad \text{gleich Null}$$

$$\chi = \chi_R + \chi_M + \chi_0 \quad \text{gleich Null}$$

Bereitstellen der Randgrößen für $x = 0$ aus den Arbeitsblättern Z-Stoer-R und Z-Stoer-M

(aus technischen Gründen als Koeffizientenmatrix geschrieben)

	R	M	Mem	
Gleichung 1	$\left(\frac{-1}{2 \cdot K \cdot \lambda^3} \quad \frac{1}{2 \cdot K \cdot \lambda^2} \quad w_0 \right)$			gleich Null
Gleichung 2	$\left(\frac{1}{2 \cdot K \cdot \lambda^2} \quad \frac{-1}{K \cdot \lambda} \quad \chi_0 \right)$			gleich Null
Gleichung 2 durch λ dividiert ergibt Gleichung 2a	$\left(\frac{1}{2 \cdot K \cdot \lambda^3} \quad \frac{-1}{K \cdot \lambda^2} \quad \frac{\chi_0}{\lambda} \right)$			gleich Null
Gleichungen 1 und 2a addiert ergibt Gleichung 3	$\left(0 \quad \frac{1}{2 \cdot K \cdot \lambda^2} + \frac{-1}{K \cdot \lambda^2} \quad w_0 + \frac{\chi_0}{\lambda} \right)$			gleich Null
Hauptnenner bilden und zusammen fassen ergibt Gleichung 3a	$\left(0 \quad \frac{-1}{2 \cdot K \cdot \lambda^2} \quad w_0 + \frac{\chi_0}{\lambda} \right)$			gleich Null
Nach M auflösen	$M := \left(w_0 + \frac{\chi_0}{\lambda} \right) \cdot 2 \cdot K \cdot \lambda^2$			$M = 0.610 \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$
M in Gleichung 2 einsetzen ergibt Gleichung 4	$\left[\frac{1}{2 \cdot K \cdot \lambda^2} \quad 0 \quad \chi_0 - \frac{\left(w_0 + \frac{\chi_0}{\lambda} \right) \cdot 2 \cdot K \cdot \lambda^2}{K \cdot \lambda} \right]$			gleich Null
Kürzen ergibt Gleichung 4a	$\left[\frac{1}{2 \cdot K \cdot \lambda^2} \quad 0 \quad \chi_0 - \left(w_0 + \frac{\chi_0}{\lambda} \right) \cdot 2 \cdot \lambda \right]$			gleich Null
Nach R auflösen	$R := \left[\left(w_0 + \frac{\chi_0}{\lambda} \right) \cdot 2 \cdot \lambda - \chi_0 \right] \cdot 2 \cdot K \cdot \lambda^2$			$R = 11.1 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Zylinder unter Randstörung - Radiale Ringlast plus Kreppelmoment

(Quelle: Girkmann Flächentragwerke Abs. 197; Formular Z-Stoer-R+M_05-09-26.mcd)

Geometrie

Radius $a := 5.0\text{m}$

Wanddicke $t := 4\text{mm}$

Werkstoff

E-Modul $E := 2.1 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Querdehnzahl $\mu := 0.3$

Parameter

Plattensteifigkeit $K := \frac{E \cdot t^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)}$ $K = 1.23 \text{ kNm}$

Wellenlängenparameter $\lambda := \frac{1}{\sqrt{a \cdot t}} \cdot \sqrt[4]{3 \cdot (1 - \mu^2)}$ $\lambda = 9.09 \frac{1}{\text{m}}$

Halbwellenlänge (=Abstand der Wendepunkte in der Biegelinie)

$\Lambda := \frac{\pi}{\lambda}$ $\Lambda = 346 \text{ mm}$

Vorbereiten der graphischen Darstellung

start := 0mm end := 2.0 Λ Npts := 100 i := 1 .. Npts

step := $\frac{\text{end} - \text{start}}{\text{Npts} - 1}$ $x_i := \text{start} + \text{step} \cdot (i - 1)$

Randstörgrößen

Radiale, nach innen gerichtete Ringlast $R := 11.1 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Kreppelmoment, nach außen drehend $M := 0.61 \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$

Schnittgrößen

Radiale Verformung

$$wR_i := \frac{-R}{2 \cdot K \cdot \lambda^3} \cdot e^{-\lambda \cdot x_i} \cdot \cos(\lambda \cdot x_i)$$

$$wM_i := \frac{M}{2 \cdot K \cdot \lambda^2} \cdot e^{-\lambda \cdot x_i} \cdot (\cos(\lambda \cdot x_i) - \sin(\lambda \cdot x_i))$$

Tangenten-Neigung

$$\chi_{xR_i} := \frac{R}{2 \cdot K \cdot \lambda^2} \cdot e^{-\lambda \cdot x_i} \cdot (\cos(\lambda \cdot x_i) + \sin(\lambda \cdot x_i))$$

$$\chi_{xM_i} := \frac{-M}{K \cdot \lambda} \cdot e^{-\lambda \cdot x_i} \cdot \cos(\lambda \cdot x_i)$$

Biegemoment (Meridian)

$$m_{xR_i} := \frac{-R}{\lambda} \cdot e^{-\lambda \cdot x_i} \cdot \sin(\lambda \cdot x_i)$$

$$m_{xM_i} := M \cdot e^{-\lambda \cdot x_i} \cdot (\cos(\lambda \cdot x_i) + \sin(\lambda \cdot x_i))$$

Querkraft (Meridianrichtung)

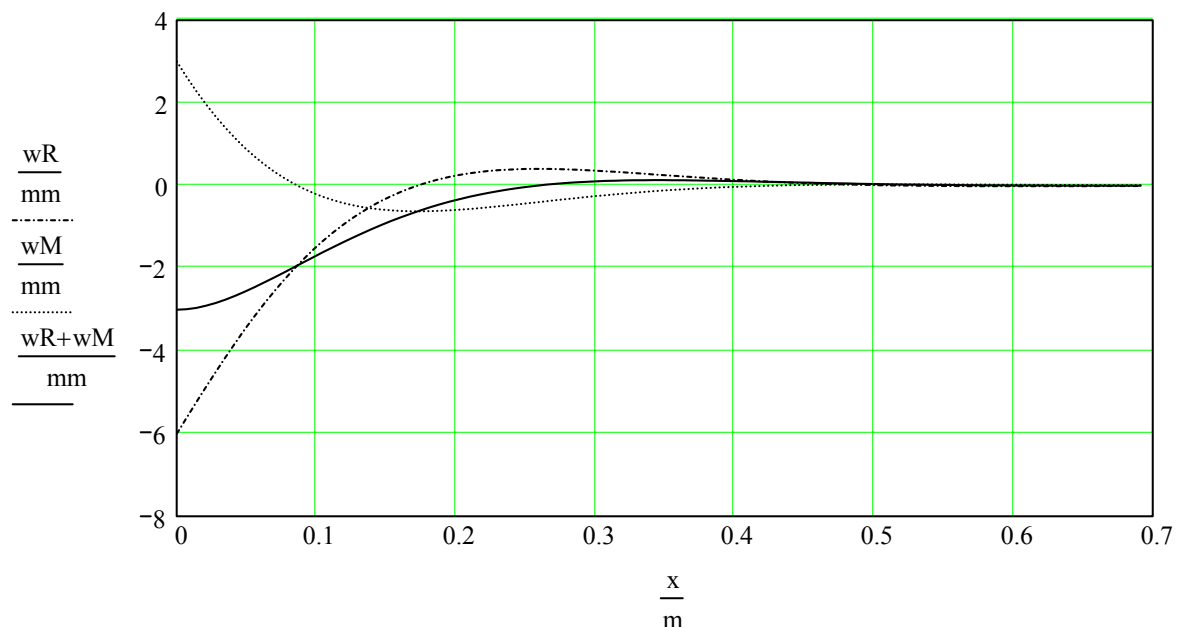
$$q_{xR_i} := -R \cdot e^{-\lambda \cdot x_i} \cdot (\cos(\lambda \cdot x_i) - \sin(\lambda \cdot x_i))$$

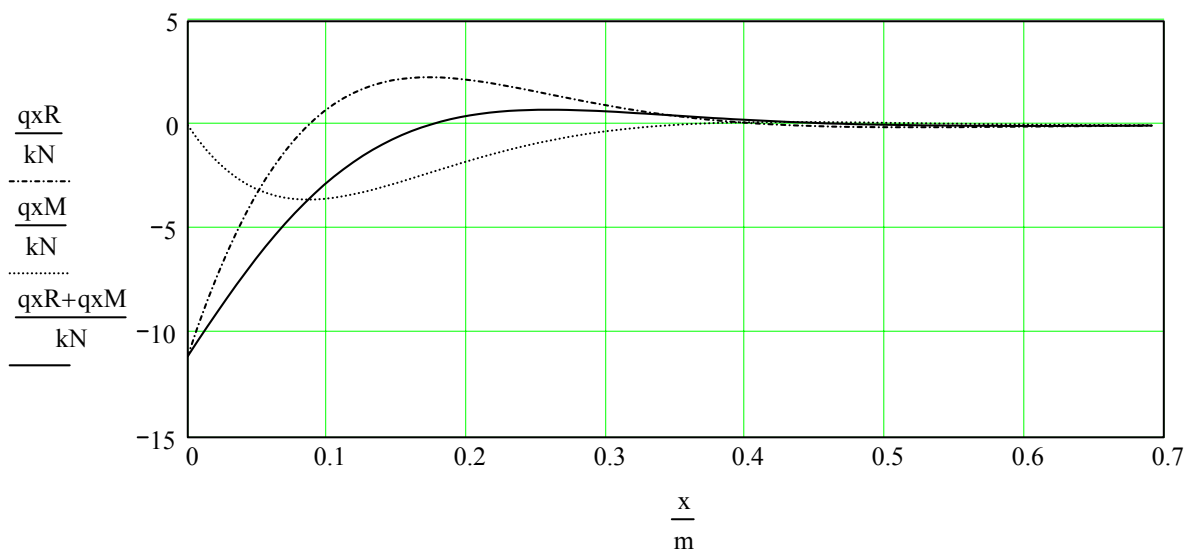
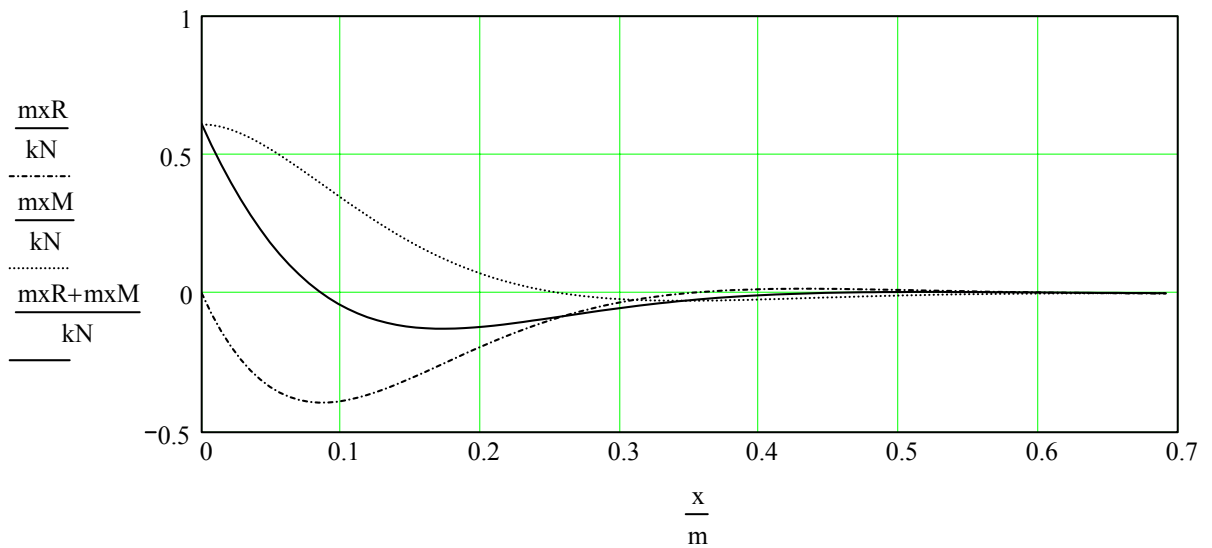
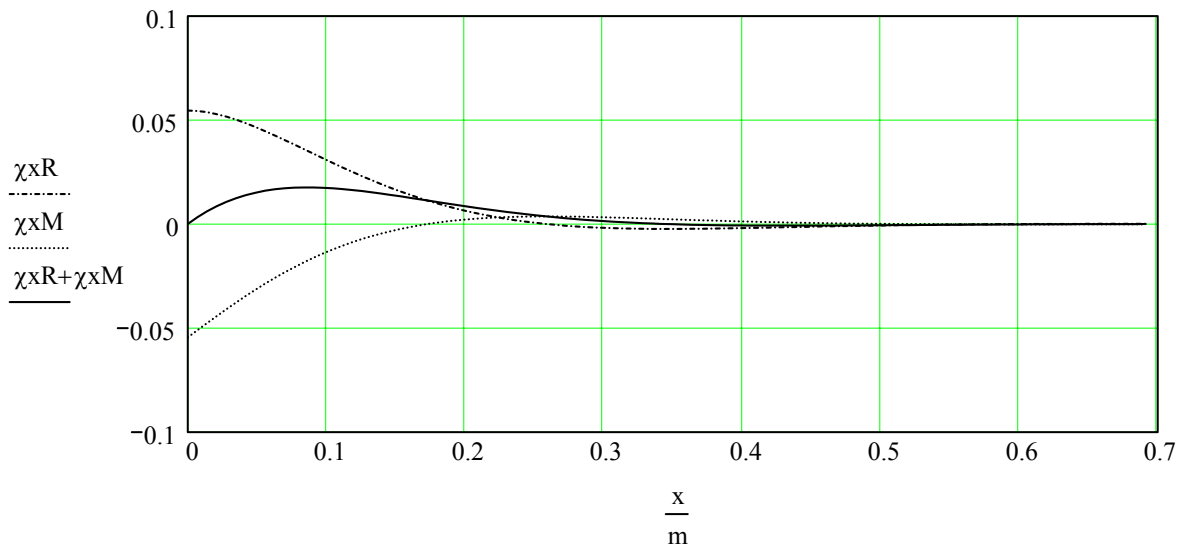
$$q_{xM_i} := -2 \cdot \lambda \cdot M \cdot e^{-\lambda \cdot x_i} \cdot \sin(\lambda \cdot x_i)$$

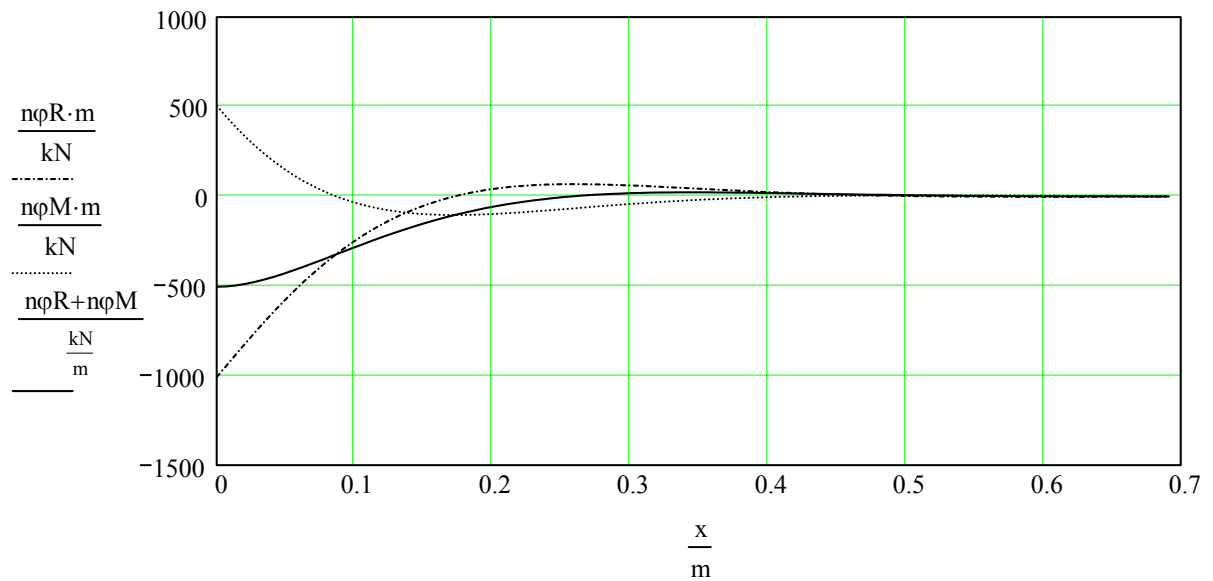
Umfangskraft

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

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







Bemessung Stahl: Auswertung der Spannungen

Meridianspannungen aus (Meridian-)Biegemoment (Innenseite)

$$\sigma_{x.R_i} := \frac{mxR_i \cdot 6}{t^2}$$

$$\sigma_{x.M_i} := \frac{mxM_i \cdot 6}{t^2}$$

Schubspannungen aus Querkraft entlang des Meridians

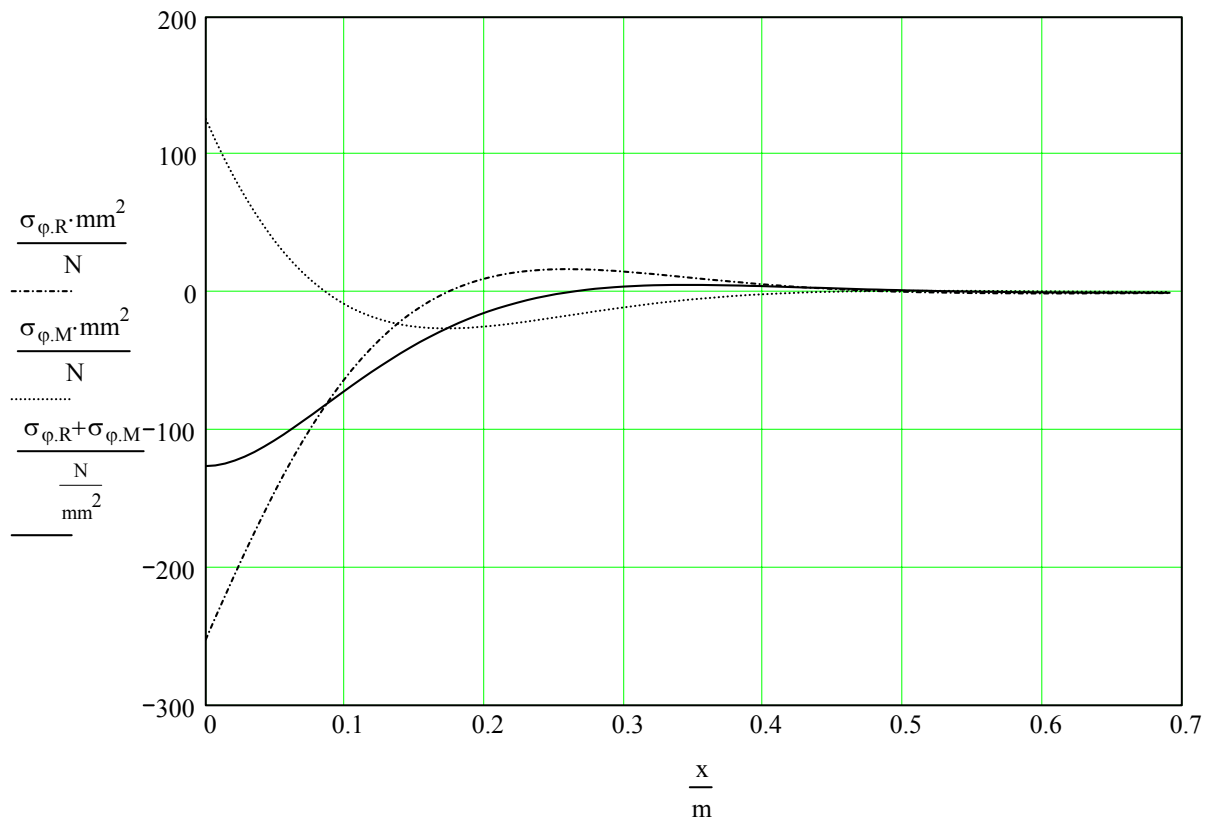
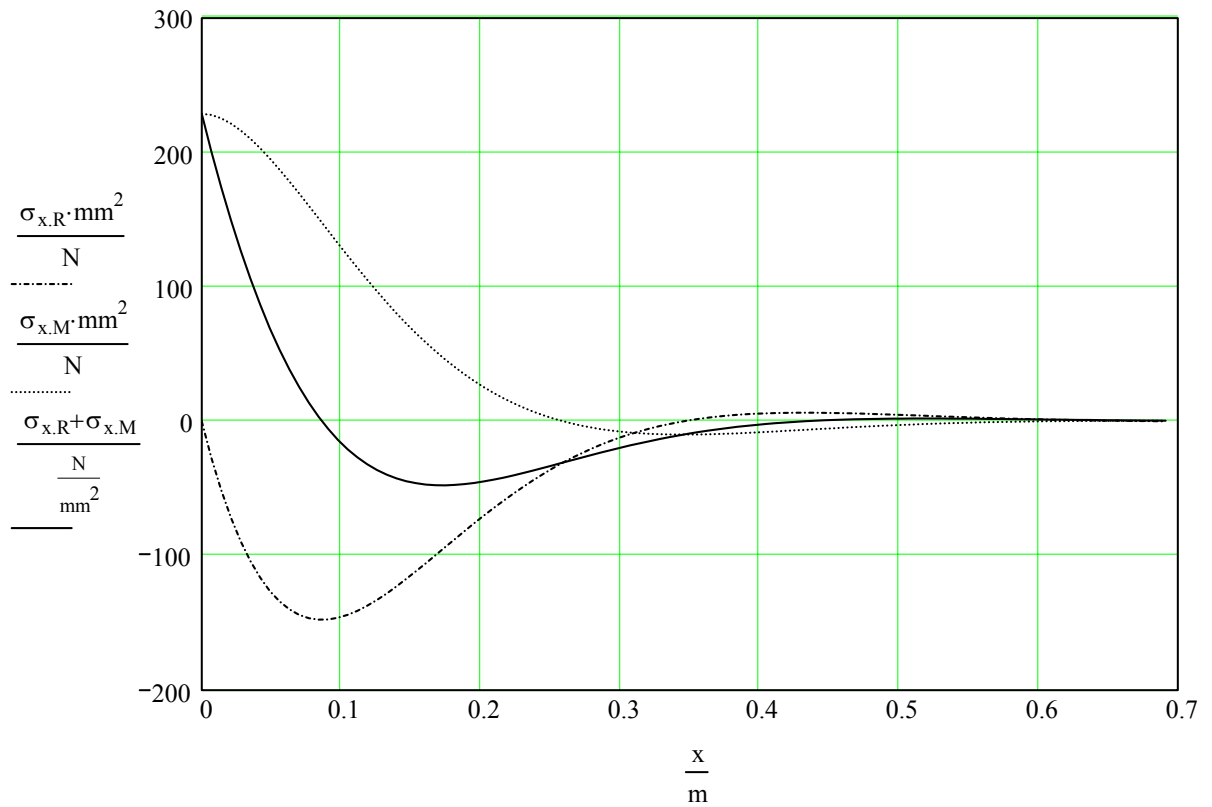
$$\tau_{x.R_i} := \frac{qxR_i}{t} \cdot \frac{3}{2}$$

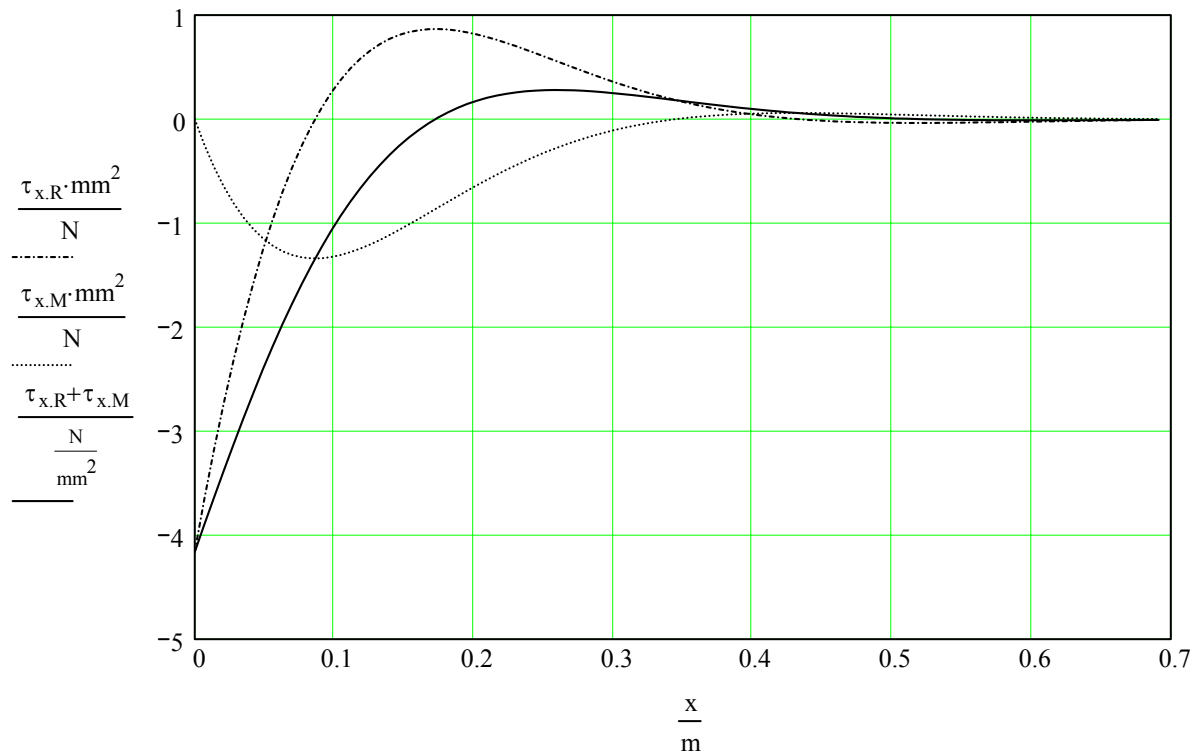
$$\tau_{x.M_i} := \frac{qxM_i}{t} \cdot \frac{3}{2}$$

Umfangsspannungen

$$\sigma_{\phi.R_i} := \frac{n\phi R_i}{t}$$

$$\sigma_{\phi.M_i} := \frac{n\phi M_i}{t}$$





Bemessung Stahl: Auswerten der Vergleichsspannung

Meridianspannungen (Innenseite)

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

Meridianspannungen (Schalenmittelfläche)
aber: Eigengewicht der Behälterwand,
Dachlasten (Schnee), Kippmoment aus Wind ...

Null

Meridianspannungen (Außenseite)

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

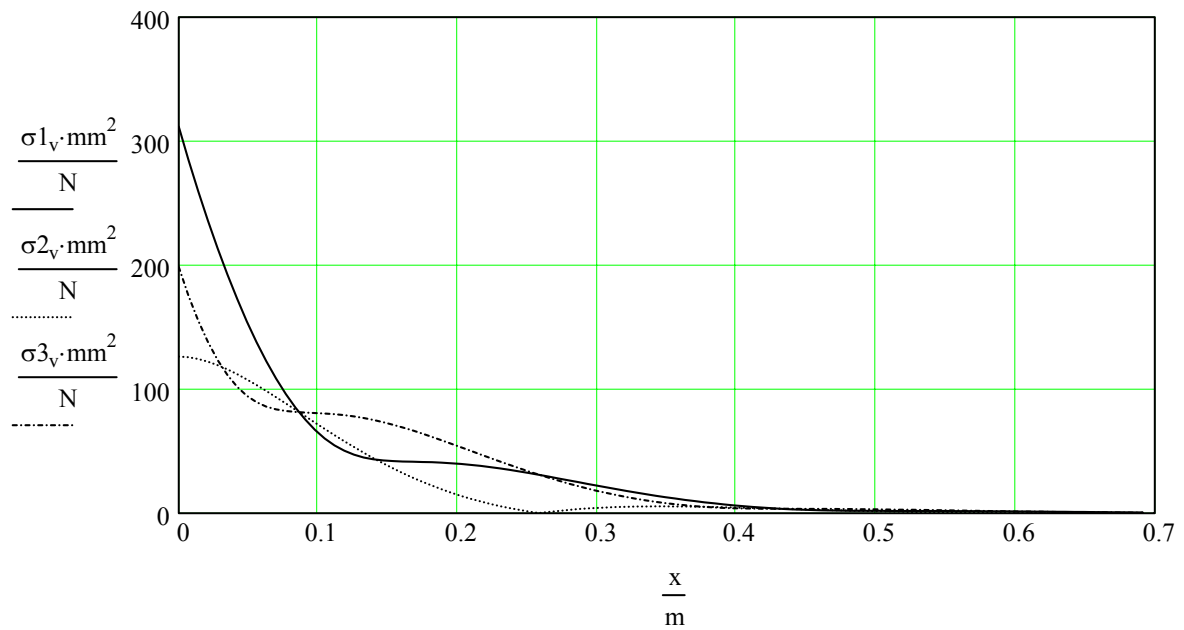
Umfangsspannungen sind innen, mittig, außen gleich
Umfangsbiegemomente werden hier vernachlässigt
Achtung: diese sind μ mal so groß wie die Meridianbiegemomente !

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

Vergleichsspannung - Innenseite: $\sigma_{1_{v_i}} := \sqrt{(\sigma_{1_{x_i}})^2 - \sigma_{1_{x_i}} \cdot \sigma_{\varphi_i} + (\sigma_{\varphi_i})^2}$

Vergleichsspannung - Mittelfläche: $\sigma_{2_{v_i}} := \sqrt{(\sigma_{\varphi_i})^2}$

Vergleichsspannung - Außenseite: $\sigma_{3_{v_i}} := \sqrt{(\sigma_{3_{x_i}})^2 - \sigma_{3_{x_i}} \cdot \sigma_{\varphi_i} + (\sigma_{\varphi_i})^2}$



Beulnachweis nach DIN 18800 Teil 4 für Axial- und Innendruck

(Formular Z-Beul-axial_05-09-26.mcd)

Geometrie

Radius	$R := \frac{10.00\text{m}}{2}$	$R = 5000\text{mm}$
Wanddicke		$T := 5.0\text{mm}$
Länge		$L := 10.00\text{m}$

Werkstoff

E-Modul		$E := 2.1 \cdot 10^5 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
Streckgrenze		$f_y := 240 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Lasten

Dachlast Schnee		$s := 0.75 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
Dachlast Eigengewicht (geschätzt)		$g := 0.50 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
ständiger Innendruck	$p := 10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot 30\text{mm}$	$p = 0.30 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

Parameter

geometrische Schlankheit	$RT := \frac{R}{T}$	$RT = 1000$
Längenverhältnis	$LR := \frac{L}{R}$	$LR = 2.00$

Mittellange und kurze Kreiszyylinder

Bedingung nach Gl. 27	$GL27 := 0.5 \cdot \sqrt{RT}$	$GL27 = 15.81$
-----------------------	-------------------------------	----------------

$$\text{Bedingung} := \begin{cases} \text{"erfüllt"} & \text{if } LR \leq GL27 \\ \text{"nicht erfüllt"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Bedingung = "erfüllt"

Beiwert nach Gl. 28 $C_{x,28} := 1 + \frac{1.5}{LR^2 \cdot RT}$ $C_{x,28} = 1.000$

Halbwellenlänge der **e**lastischen Schachbrettbeule

$L_{H,Schach} := 3.456 \cdot \sqrt{R \cdot T}$ $L_{H,Schach} = 546 \text{ mm}$

Halbwellenlänge der **e**lastischen Ringbeule

$L_{H,Ring} := 1.728 \cdot \sqrt{R \cdot T}$ $L_{H,Ring} = 273 \text{ mm}$

Halbwellenlänge der **p**lastischen Ringbeule - identisch mit der Biegestörhalbwelle

$L_{H,pl} := 2.444 \cdot \sqrt{R \cdot T}$ $L_{H,pl} = 386 \text{ mm}$

Lange Kreiszyylinder

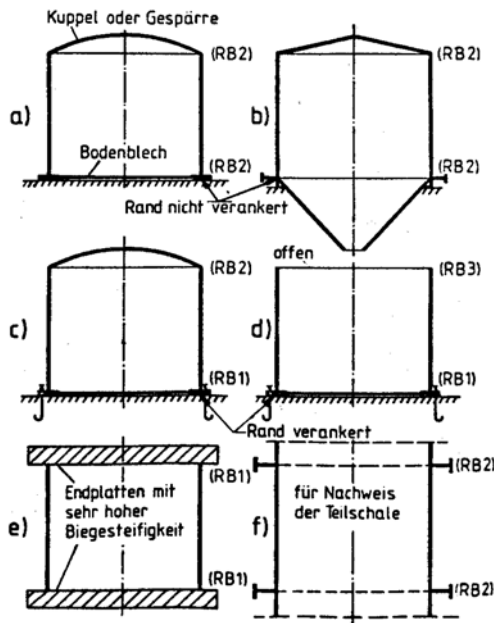


Tabelle 1. **Beiwerte η zur Ermittlung der idealen Axialbeulspannungen bei langen Kreiszyindern**

Fall	Kombination der Randbedingungen nach Abschnitt 4.1, Element 403	Beiwert η
1	RB 1 RB 1	6
2	RB 2 RB 1	3
3	RB 2 RB 2	1

Beiwert aus Tabelle 1 für Randbedingungen aus Bild 11

$\eta := 3$

Bild 11. Konstruktive Erläuterungen und Beispiele zu den Randbedingungen

Bedingung nach Gl. 29 $GL_{29} := 0.5 \cdot \sqrt{RT}$ $GL_{29} = 15.81$

Bedingung := $\begin{cases} \text{"erfüllt"} & \text{if } LR > GL_{29} \\ \text{"nicht erfüllt"} & \text{otherwise} \end{cases}$

Bedingung = "nicht erfüllt"

Beiwert nach Gl. 30 $C_{x,30} := 1 - \frac{0.4 \cdot LR \cdot \sqrt{\frac{1}{RT}} - 0.2}{\eta}$ $C_{x,30} = 1.058$

Begrenzung $C_{x,30} := \text{wenn}(C_{x,30} < 0.6, 0.6, C_{x,30})$ $C_{x,30} = 1.058$

Maßgebender Beiwert

$C_x := \text{wenn}(LR \leq GL27, C_{x,28}, \text{wenn}(LR > GL29, C_{x,30}, \text{"Fehler"}))$ $C_x = 1.000$

Ideale Beulspannung nach Gl. 26

$\sigma_{xSi} := 0.605 \cdot C_x \cdot \frac{E}{RT}$ $\sigma_{xSi} = 127 \frac{N}{mm^2}$

mechanische Schlankheit $\lambda := \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{xSi}}}$ $\lambda = 1.374$

Abminderungsfaktoren nach Gl. 8 - "sehr imperfektionsempfindlich"

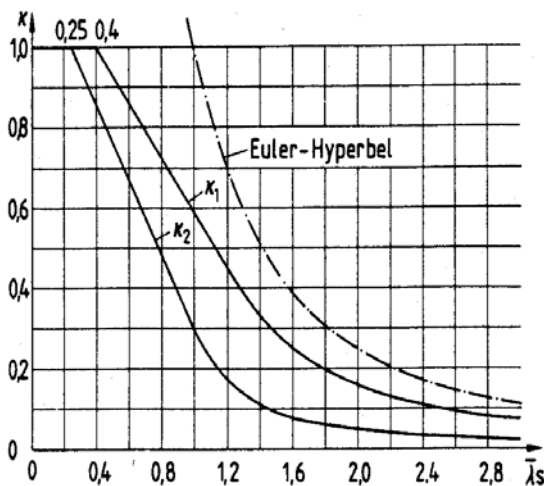


Bild 2. Abminderungsfaktoren κ (bezogene reale Beulspannungen) für Schalenbeulen (Grundbeulkurven)

$\kappa_{2a} := 1$

$\kappa_{2b} := 1.233 - 0.933 \cdot \lambda$

$\kappa_{2b} = -0.049$

$\kappa_{2c} := \frac{0.3}{\lambda^3}$

$\kappa_{2c} = 0.116$

$\kappa_{2d} := \frac{0.2}{\lambda^2}$

$\kappa_{2d} = 0.106$

$\kappa_2 := \text{wenn}(\lambda \leq 0.25, \kappa_{2a}, \text{wenn}(\lambda \leq 1, \kappa_{2b}, \text{wenn}(\lambda \leq 1.5, \kappa_{2c}, \kappa_{2d})))$ $\kappa_2 = 0.116$

Beullasterhöhende Wirkung des Innendruckes

$$\text{Innendruckparameter nach Gl. 53} \quad p_{\text{quer}} := \frac{p}{E} \cdot RT^2 \quad p_{\text{quer}} = 0.001$$

$$\text{Korrekturfaktor für den Innendruck nach Gl. 53} \quad F_a := 1$$

$$F_b := 1 + 1.2 \cdot \lambda \cdot p_{\text{quer}}^{0.38} \cdot \frac{\lambda - 0.7}{0.3} \quad F_b = 1.307$$

$$F_c := 1 + 1.2 \cdot \lambda \cdot p_{\text{quer}}^{0.38} \quad F_c = 1.137$$

$$F := \text{wenn}(\lambda \leq 0.7, F_a, \text{wenn}(\lambda \leq 1, F_b, F_c)) \quad F = 1.137$$

entspricht der Steigerung der Beullast infolge des Innendruckes

$$\kappa_{2q} := \kappa_2 \cdot F \quad \kappa_{2q} = 0.131$$

Reale Beulspannung nach Gl. 4

$$\sigma_{xS.R.k} := \kappa_{2q} \cdot f_y \quad \sigma_{xS.R.k} = 31.5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Teilsicherheitsbeiwerte nach Gl. 13

$$\gamma_{Ma} := 1.1$$

$$\gamma_{Mb} := 1.1 \cdot \left(1 + 0.318 \cdot \frac{\lambda - 0.25}{1.75} \right) \quad \gamma_{Mb} = 1.325$$

$$\gamma_{Mc} := 1.45$$

$$\gamma_M := \text{wenn}(\lambda \leq 0.25, \gamma_{Ma}, \text{wenn}(\lambda \leq 2, \gamma_{Mb}, \gamma_{Mc})) \quad \gamma_M = 1.325$$

Grenzbeulspannung nach Gl. 9

$$\sigma_{xS.R.d} := \frac{\sigma_{xS.R.k}}{\gamma_M} \quad \sigma_{xS.R.d} = 23.8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Bemessungswert der Dach-Flächenlast

Der Innendruck wird nur 1,0-fach angesetzt, da er hinsichtlich des Beulens entlastend wirkt

$$q_d := 1.35 \cdot g + 1.5 \cdot s - 1.0 \cdot p \qquad q_d = 1.50 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Gesamte Dach-Gesamtlast

$$N_d := q_d \cdot \pi \cdot R^2 \qquad N_d = 118 \text{ kN}$$

nicht vergessen: Aufbauten, Verkehr ...

Längsspannung aus Dachlast

$$\sigma_{x,d} := \frac{N_d}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot T} \qquad \sigma_{x,d} = 0.75 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Ausnutzungsgrad

$$\eta := \frac{\sigma_{x,d}}{\sigma_{xS.R,d}} \qquad \eta = 0.031$$

Beulnachweis nach DIN 18800 Teil 4 für Außendruck

(Formular Z-Beul-aussen_05-10-23.mcd)

Geometrie

Radius	$R := \frac{10m}{2}$	$R = 5000 \text{ mm}$
Wanddicke		$T := 5 \text{ mm}$
Länge		$L := 10.00 \text{ m}$

Werkstoff

E-Modul		$E := 2.1 \cdot 10^5 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
Streckgrenze		$f_{y,k} := 240 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Lasten

Gleichmäßiger Außendruck bzw. innerer Unterdruck (Wind siehe weiter unten)

$$p := 10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot 300 \text{ mm} \qquad p = 3.00 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Parameter

geometrische Schlankheit	$RT := \frac{R}{T}$	$RT = 1000$
Längenverhältnis	$LR := \frac{L}{R}$	$LR = 2.00$
Längenparameter (Tab. 2)	$L_{\text{quer}} := LR \cdot \sqrt{RT}$	$L_{\text{quer}} = 63$

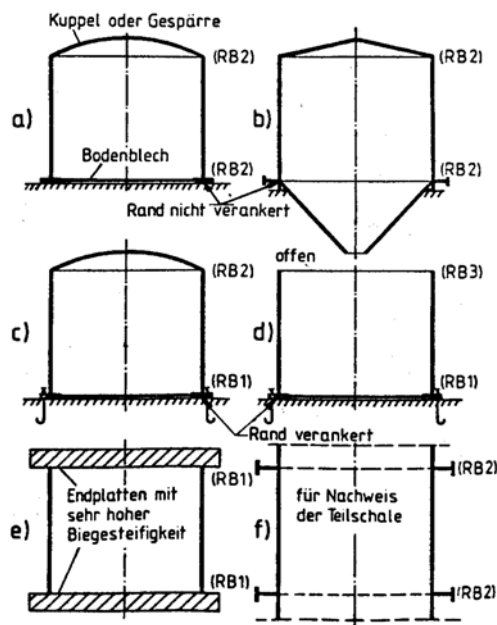


Bild 11. Konstruktive Erläuterungen und Beispiele zu den Randbedingungen

Tabelle 2. Beiwerte C_φ und C_φ^*

Fall	Kombination der Randbedingungen nach Abschnitt 4.1, Element 403	Beiwert C_φ	Beiwert C_φ^*
1	RB 1 RB 1	1,5	$1,5 + \frac{10,0}{\bar{l}^2} - \frac{5,0}{\bar{l}^3}$
2	RB 2 RB 1	1,25	$1,25 + \frac{8,0}{\bar{l}^2} - \frac{4,0}{\bar{l}^3}$
3	RB 2 RB 2	1,0	$1,0 + \frac{3,0}{\bar{l}^{1,35}}$
4	RB 3 RB 1	0,6	$0,6 + \frac{1,0}{\bar{l}^2} - \frac{0,3}{\bar{l}^3}$
5	RB 3 RB 2	In diesen Fällen darf $\sigma_{\varphi Si}$ unabhängig von der Zylinderlänge mit Gleichung (36) und $C_\varphi = 0$ bestimmt werden.	
6	RB 3 RB 3		

$$\bar{l} = \frac{l}{r} \sqrt{\frac{r}{t}}$$

Zutreffende Kombination von RB aus Tab. 2 wählen:

Fall := 2

Werte aus Tabelle 2:

Fall 1:	$C_{\varphi_1} := 1.5$	$C_{\varphi.stern_1} := 1.5 + \frac{10}{L_{quer}^2} - \frac{5}{L_{quer}^3}$	$C_{\varphi.stern_1} = 1.50$
Fall 2:	$C_{\varphi_2} := 1.25$	$C_{\varphi.stern_2} := 1.25 + \frac{8}{L_{quer}^2} - \frac{4}{L_{quer}^3}$	$C_{\varphi.stern_2} = 1.25$
Fall 3:	$C_{\varphi_3} := 1.0$	$C_{\varphi.stern_3} := 1.0 + \frac{3}{L_{quer}^{1.35}}$	$C_{\varphi.stern_3} = 1.01$
Fall 4:	$C_{\varphi_4} := 0.6$	$C_{\varphi.stern_4} := 0.6 + \frac{1}{L_{quer}^2} - \frac{0.3}{L_{quer}^3}$	$C_{\varphi.stern_4} = 0.60$
Fall 5:	$C_{\varphi_5} := 0$	$C_{\varphi.stern_5} := 0$	$C_{\varphi.stern_5} = 0.00$
Fall 6:	$C_{\varphi_6} := 0$	$C_{\varphi.stern_6} := 0$	$C_{\varphi.stern_6} = 0.00$

Mittellange und kurze Kreiszyylinder

Bedingung nach Gl. 33 $GL33 := 1.63 \cdot C_{\varphi_{Fall}} \cdot \sqrt{RT}$

$GL33 = 64.43$

$$\text{Bedingung} := \begin{cases} \text{"erfüllt"} & \text{if } LR \leq GL33 \\ \text{"nicht erfüllt"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$\text{Bedingung} = \text{"erfüllt"}$

Ideale Beulspannung nach Gl. 34

$$\sigma_{\varphi Si, \text{mittel}} := 0.92 \cdot C_{\varphi, \text{stern}_{Fall}} \cdot \frac{E}{LR} \cdot \left(\frac{1}{RT}\right)^{1.5}$$

$$\sigma_{\varphi Si, \text{mittel}} = 3.82 \frac{N}{mm^2}$$

Zugehörige Umfangswellenzahl nach Diss. Greiner
hier zitiert nach Diss. Binder

vorausgesetzt sind "große" Umfangswellenzahlen, für die gilt $n^2 = n^2 - 1$

$$n_{Si, \text{mittel}} := 2.74 \sqrt{C_{\varphi, \text{stern}_{Fall}} \cdot \frac{1}{LR} \cdot \sqrt{RT}}$$

$$n_{Si, \text{mittel}} = 12.2$$

Lange Kreiszyylinder

Bedingung nach Gl. 35 $GL35 := 1.63 \cdot C_{\varphi_{Fall}} \cdot \sqrt{RT}$

$GL35 = 64.43$

$$\text{Bedingung} := \begin{cases} \text{"erfüllt"} & \text{if } LR > GL35 \\ \text{"nicht erfüllt"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$\text{Bedingung} = \text{"nicht erfüllt"}$

Ideale Beulspannung nach Gl. 36

$$\sigma_{\varphi Si, \text{lang}} := E \cdot \left(\frac{1}{RT}\right)^2 \cdot \left[0.275 + 2.03 \cdot \left(\frac{C_{\varphi_{Fall}}}{LR \cdot \sqrt{\frac{1}{RT}}} \right)^4 \right]$$

$$\sigma_{\varphi Si, \text{lang}} = 65048 \frac{N}{mm^2}$$

Maßgebende Beulspannung

$$\sigma_{\varphi Si} := \text{wenn} \left(LR \leq GL33, \sigma_{\varphi Si, \text{mittel}}, \text{wenn} \left(LR > GL35, \sigma_{\varphi Si, \text{lang}}, 9999 \frac{N}{mm^2} \right) \right)$$

$\sigma_{\varphi Si} = 3.82 \frac{N}{mm^2}$

mechan. Schlankheit (Gl. 2) $\lambda := \sqrt{\frac{f_{y,k}}{\sigma_{\varphi Si}}}$

$$\lambda = 7.922$$

Abminderungsfaktoren nach Gl. 7 (vgl. Elm 420)

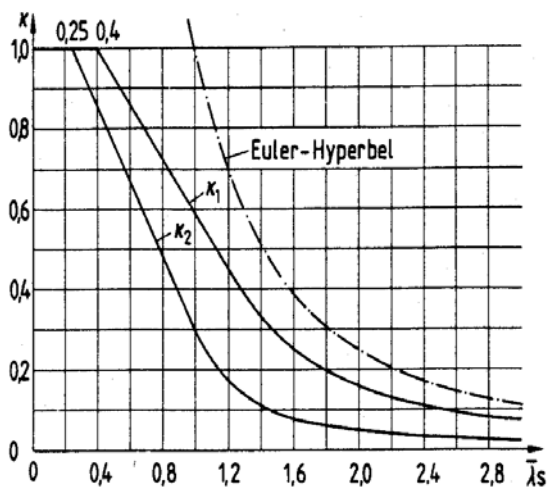


Bild 2. Abminderungsfaktoren κ (bezogene reale Beulspannungen) für Schalenbeulen (Grundbeulkurven)

$$\begin{aligned} \kappa_{1a} &:= 1 \\ \kappa_{1b} &:= 1.274 - 0.686 \cdot \lambda \\ \kappa_{1c} &:= \frac{0.65}{\lambda^2} \end{aligned}$$

$$\kappa_1 := \text{wenn}(\lambda \leq 0.40, \kappa_{1a}, \text{wenn}(\lambda \leq 1.2, \kappa_{1b}, \kappa_{1c})) \quad \kappa_1 = 0.010$$

Reale Beulspannung nach Gl. 5

$$\sigma_{\varphi S.R.k} := \kappa_1 \cdot f_{y.k} \quad \sigma_{\varphi S.R.k} = 2.49 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Teilsicherheitsbeiwert nach Gl. 12

$$\gamma_M := 1.1$$

Grenzbeulspannung nach Gl. 10

$$\sigma_{\varphi S.R.d} := \frac{\sigma_{\varphi S.R.k}}{\gamma_M} \quad \sigma_{\varphi S.R.d} = 2.26 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Ausnutzungsgrad der idealen Beulspannung (hier nur informativ)

$$\sigma_{\varphi S.k} := p \cdot RT \quad \sigma_{\varphi S.k} = 3.0 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\eta := \frac{\sigma_{\varphi S.k}}{\sigma_{\varphi Si}} \quad \eta = 0.784$$

Ersatz-Windbelastung nach Elm 424

Beiwert Gl. 47 $\delta := 0.46 \cdot \left(1 + 0.1 \cdot \sqrt{C_{\varphi_{\text{Fall}}} \cdot \frac{1}{LR} \cdot \sqrt{RT}} \right)$ $\delta = 0.665$

$$\delta := \min(\delta, 1) \quad \delta = 0.665$$

Größter Druckwert im Staupunkt
aus DIN 1055, je nach Höhe der Belüftung

$$q_w := 0.80 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Gleichmäßiger Außendruck als Ersatzlast für den ungleichmäßig verteilten
Winddruck

$$q_1 := \delta \cdot q_w \quad q_1 = 0.532 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Zusätzlicher innerer Unterdruck bei offenen oder belüfteten Behältern

$$q_2 := 0.6 \cdot q_w \quad q_2 = 0.480 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Bemessungswert des Manteldruckes

Achtung: hier nur die Einwirkungen kombinieren, die gemeinsam auftreten
können

Beispiel 1:

Geschlossener Behälter mit Betriebsunterdruck und Ersatzwinddruck,
aber OHNE inneren Unterdruck aus Windsog

$$q_{1d} := 1.5 \cdot 0.9q_1 + 0.0q_2 + 1.35 \cdot p \quad q_{1d} = 4.77 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Umfangsspannung $\sigma_{1\varphi S.d} := q_{1d} \cdot RT$ $\sigma_{1\varphi S.d} = 4.77 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Beulnachweis -
Ausnutzungsgrad $\eta_1 := \frac{\sigma_{1\varphi S.d}}{\sigma_{\varphi S.R.d}}$ $\eta_1 = 2.110$

Beispiel 2:

Offener Behälter mit Ersatzwinddruck und innerem Unterdruck aus Windsog
aber OHNE Betriebsunterdruck

$$q_{2d} := 1.5q_1 + 1.5q_2 + 0.0 \cdot p \quad q_{2d} = 1.52 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Umfangsspannung $\sigma_{2\varphi S.d} := q_{2d} \cdot RT$ $\sigma_{2\varphi S.d} = 1.52 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Beulnachweis -
Ausnutzungsgrad $\eta_2 := \frac{\sigma_{2\varphi S.d}}{\sigma_{\varphi S.R.d}}$ $\eta_2 = 0.671$

FEM

0 Inhalt

0	Inhalt	1
1	Allgemeines	1
2	Elemente	2
3	Netzeinteilung	2
3.1	Membranzustand	2
3.2	Biegestörung	3
3.3	Beulformen aus Axiallast – elastisch	3
3.4	Beulformen aus Axiallast – plastisch	4
3.5	Beulformen aus Außendruck – elastisch	4
4	Festigkeitsberechnungen	5
5	Stabilitätsberechnungen	5
6	Aufgaben	6
6.1	Druckbehälter	6
6.2	Schmutzwassertank	6
7	Literatur	7

1 Allgemeines

Bei einfachen rotationssymmetrischen Behältern ist der Einsatz der FEM im allgemeinen nicht erforderlich. Die benötigten "Hand-Rechenverfahren" werden in der Vorlesung behandelt.

Bei Behältern mit komplizierterer Geometrie oder nicht-rotationssymmetrischen Lastfällen kann es sinnvoll sein, mit der FEM zu arbeiten. Im vorliegenden Modul werden dazu Anleitungen gegeben. Grundkenntnisse der FEM werden dabei vorausgesetzt.

2 Elemente

Grundsätzlich wird empfohlen, möglichst mit viereckigen Elementen zu arbeiten.

4-Knoten-Elemente

können lineare Verläufe der Kraft- und Verformungsgrößen zwischen den Knoten abbilden.

8-Knoten-Elemente

können parabelförmige Verläufe der Kraft- und Verformungsgrößen zwischen den Knoten abbilden. Das bedeutet höhere Genauigkeit bei gleichen Elementabmessungen, aber mehr Unbekannte im Gleichungssystem und damit höhere Rechenzeiten.

Die folgenden Ausführungen gelten für 4-Knoten-Elemente, sie können sinngemäß auf 8-Knoten-Elemente übertragen werden.

3 Netzeinteilung

3.1 Membranzustand

In Bereichen des Behälters, in denen sich Verformungs- und Schnittgrößen nur wenig ändern (z.B. Zylinder unter Innendruck mit ausreichend Abstand von den Rändern), kann eine grobe Netzeinteilung gewählt werden.

In Umfangsrichtung nimmt man gerne eine 12er, 24er oder 36er Teilung, bei letzterer ergibt sich dann ein Umfangswinkel von 10° je Element.

In Längsrichtung wählt man die Elemente so, daß das Seitenverhältnis der Elemente möglichst bei 1 liegt (quadratische Elemente).

Hinweis:

ANSYS – SHELL181 gibt z.B. ab einem Seitenverhältnis von 20 Fehlermeldungen aus.

Beispiel:

Stahlbehälter $D = 10 \text{ m}$; $H = 10 \text{ m}$; Wanddicke 5 mm ;

Der Behälter wird mit FE gerechnet, weil einige größere Stutzen und Mannlöcher nachzuweisen sind.

Lastfall Innendruck;

Umfangsteilung gewählt: $N_{\varphi} = 36$; $\varphi = 10^{\circ}$; $L_{\varphi} = 872$ mm
Längsteilung gewählt: $N_x = 10$; $L_x = 1000$ mm
Seitenverhältnis des Elements: $L_x / L_{\varphi} = 1,15$

3.2 Biegestörung

Im Bereich von Biegestörungen der Behälterwand, z.B. an gehaltenen Rändern, oder Stützenanschlüssen, treten z.T. schroffe Änderungen der Verformungs- und Kraftgrößen auf. Will man diese Effekte grob erfassen, sollte man mindestens 5 Elemente je Biegestör-Halbwelle verwenden.

Beispiel:

Stahlbehälter $D = 10$ m; Wanddicke 5 mm;

Der Behälter wird mit FE gerechnet, weil einige größere Stützen und Mannlöcher nachzuweisen sind.

Länge der Biegestörhalbwelle (siehe Rechenblatt Z-Stoer-R+M):

$$L_{H,Biege} = 2,44 * \sqrt{(R*T)}$$

$$L_{H,Biege} = 2,44 * \sqrt{(5000 \text{ mm} * 5 \text{ mm})} = 386 \text{ mm}$$

$$\text{Höchst-Elementlänge: } 386 \text{ mm} / 5 = 77 \text{ mm}$$

Längsteilung gewählt: $L_x = 50$ mm; auf einer Länge von 1000 mm

Umfangsteilung gewählt: $N_{\varphi} = 360$; $\varphi = 1^{\circ}$; $L_{\varphi} = 87$ mm

Seitenverhältnis des Elements: $L_x / L_{\varphi} = 1,74$

3.3 Beulformen aus Axiallast – elastisch

Die Netzeinteilung muß auf die zu erwartende Eigenform bzw. Beulform abgestimmt sein.

Beispiel:

Stahlbehälter $D = 10$ m; $H = 10$ m; Wanddicke 5 mm;

Der Behälter wird mit FE gerechnet, weil einige größere Stützen und Mannlöcher nachzuweisen sind.

Länge der "Schachbrettbeulen" (siehe Rechenblatt Z-Beul-axial):

$$L_{H,Schach} = 3,46 * \sqrt{(R*T)}$$

$$L_{H,Schach} = 3,46 * \sqrt{(5000 \text{ mm} * 5 \text{ mm})} = 547 \text{ mm}$$

$$\text{Höchst-Elementlänge: } 547 \text{ mm} / 5 = 109 \text{ mm}$$

Längsteilung gewählt: $L_x = 100$ mm;

Umfangsteilung gewählt: $N_{\varphi} = 360$; $\varphi = 1^{\circ}$; $L_{\varphi} = 87$ mm

Seitenverhältnis des Elements: $L_x / L_{\varphi} = 1,15$

Hinweis 1:

Bei Beulberechnungen wird dringend empfohlen, die Rechnung alternativ mit der halben Elementgröße (d.h. der vierfachen Anzahl der Elemente) durchzuführen, um abschätzen zu können, wie groß der Fehler zur "tatsächlichen" Beullast ist.

Hinweis 2:

Es gibt noch eine Ringbeulform unter Axiallast, die maßgebend werden kann. Deren Halbwellenlänge ist halb so groß wie die der Schachbrettbeule (siehe Rechenblatt Z-Beul-axial). Auch aus diesem Grund sollte ein Testlauf mit der halben Elementgröße durchgeführt werden.

3.4 Beulformen aus Axiallast – plastisch

In Bezug auf die Schalenschlankheit λ zeigen Werte größer als 1 elastisches Beulen an. Für Werte, die von 1 abnehmen, wird das Muster zunehmend grobwelliger, die Schachbrettbeulen degenerieren zu immer flacheren Rauten, im hochplastischen Bereich geht die Beulform in die Verformungsfigur der Biegestörung über.

3.5 Beulformen aus Außendruck – elastisch

Unter Außendruck bilden sich in jedem Schalenfeld, d.h. zwischen zwei ausreichend starken Umfangssteifen, Beulen aus, die in Längsrichtung des Zylinders von Rand zu Rand reichen. Die Umfangszahl der Beulen hängt vom R/T-Verhältnis und vom L/R-Verhältnis der Schale ab.

Beispiel:

Stahlbehälter $D = 30$ m; $H = 6$ m; Wanddicke 2 mm; Abstand der Ringsteifen 1200 mm.

Der Behälter wird mit FE gerechnet, weil er hinsichtlich des R/T-Verhältnisses durch DIN 18800-4 nicht mehr erfaßt wird.

Anzahl der Umfangsvollwellen (siehe Rechenblatt Z-Beul-aussen): $N_{\varphi, \text{voll}} = 100$;

Anzahl der Umfangshalbwellen

$N_{\varphi} = 200$; $\varphi = 1,8^\circ$; $L_{\varphi} = 471$ mm

Höchst-Elementlänge: $471 \text{ mm} / 5 = 94$ mm

Umfangsteilung gewählt: $N_{\varphi} = 1200$; $\varphi = 0,3^\circ$; $L_{\varphi} = 79$ mm

Längsteilung gewählt: $L_x = 100$ mm;

Seitenverhältnis des Elements: $L_x / L_{\varphi} = 1,27$

Hinweis:

Diese Elemententeilung ist in Längsrichtung zu grob, um die Biegestörung richtig zu erfassen.

4 Festigkeitsberechnungen

Alternativ je nach Aufgabenstellung und geforderter "Genauigkeit", d.h. Realitätsnähe.

- Lineare Berechnungen, d.h. Geometrie und Werkstoff "arbeiten" linear.
- Nichtlineare Berechnungen mit plastischem Werkstoffgesetz (ausnutzen plastischer Querschnittsreserven)
- Nichtlineare Berechnungen mit geometrischer Nichtlinearität (Theorie II. und III. Ordnung, bei dünnwandigen Schalen empfohlen)

5 Stabilitätsberechnungen

In Anlehnung an DIN 18800 Teil 4 bzw. DASt-Ri 017:

- Lineare Berechnung von Eigenwert (= Verzweigungslast) und Eigenform (= Beulmuster).
Am Beulmuster wird die Plausibilität des ermittelten Eigenwertes geprüft.
Die errechnete Verzweigungslast entspricht der idealen Beulspannung $\sigma_{\phi, Si}$ oder $\sigma_{x, Si}$.
Aus diesem Wert müssen über das Verfahren in DIN 18800-4 die reale Beulspannung und die Grenzbeulspannung ermittelt werden.
- Nichtlineare Berechnung eines Durchschlagpunktes oder einer Verzweigungslast.
Dazu sind geometrische Imperfektionen anzusetzen. Hierzu gibt es bis jetzt weltweit noch keine Norm, verschiedene mögliche Varianten und deren Einfluß auf das Ergebnis sind in Knoedel/Ummenhofer (1996) aufgeführt.
Die errechnete Versagenslast entspricht der realen Beulspannung nach DIN 18800-4, möglicherweise auch schon der Grenzbeulspannung, das muß jedoch im Einzelfall bewertet werden.

Achtung, hier irrt das ANSYS-Handbuch: auch beim Ansatz von Imperfektionen können unter der Durchschlagslast Verzweigungspunkte auftreten (Knoedel/Ummenhofer 2004).

Wichtiger Hinweis für die Variante "Nichtlineare Berechnungen":

Vor der Modellierung des eigentlichen Aufgabenstellung modelliert man ein möglichst ähnliches, aber stark abstrahiertes Schalentragwerk, das man auch nach DIN 18800-4 "von Hand" nachweisen kann. Mit den FE-Berechnungen probiert man, ähnliche Ergebnisse wie von Hand zu erhalten.

6 Aufgaben

6.1 Druckbehälter

$D = 2500$ mm; $T = 25$ mm; $L = 8000$ mm; gewölbte Böden; Werkstoff S355;

Stutzen im zylindrischen Teil mit $d = 500$ mm; $t = 5$ mm; $l = 2000$ mm;

Innendruck 30 bar.

- Entwerfen Sie für den zylindrischen Teil und den Stutzen ein FE-Netz, mit dem sie den Anschlußbereich des Stutzens nachweisen können.
- Skizzieren Sie das Netz. Wie viele Elemente sind insgesamt ca. erforderlich?

6.2 Schmutzwassertank

Aufstellung im Freien;

$D = 15$ m; $H = 4,80$ m; Ringsteifenabstand 1200 mm; Werkstoff 1.4301;

An jeder Ringsteife wechselt die Wanddicke, die unterste beträgt 6 mm, die oberste 2 mm.

- a) Für den unteren Behälterrand sind genaue Beanspruchungen aus der Wasserfüllung und ggfs. weiteren maßgebenden Lastfällen zu ermitteln.
- b) Für den obersten Schuß und die Versteifungsringe ist die Stabilität gegen Bemessungswind zu untersuchen.
- Welche Symmetrien können jeweils ausgenutzt werden?

- Bestimmen Sie jeweils die Höchstlänge der Elemente in Umfangs- und Längsrichtung. (Modellierung der Ringe braucht nicht untersucht zu werden)
- Skizzieren sie eine sinnvolle Elementeteilung für das ganze Modell.
- Wie groß ist jeweils die Gesamtzahl der Elemente

7 Literatur

- [1] DIN 18800: Stahlbauten.
Teil 4: Stabilitätsfälle, Schalenbeulen. November 1990.
- [2] DASt Richtlinie 017: Beulsicherheitsnachweise für Schalen – spezielle Fälle – . Entwurf 1992. Deutscher Ausschuß für Stahlbau, Stahlbau-Verlagsgesellschaft.
- [3] Knoedel, P., Ummenhofer, T.: Substitute Imperfections for the Prediction of Buckling Loads in Shell Design. Proceedings, Imperfections in Metal Silos - Measurement, Characterisation and Strength Analysis, pp. 87-101. BRITE/EURAM concerted action CA-Silo Working Group 3: Metal Silo Structures. International Workshop, INSA, Lyon, 19.04.96.
- [4] Ummenhofer, T., Knoedel, P.: Modelling of Boundary Conditions for Cylindrical Steel Structures in Natural Wind. Paper No. 57 in Papadrakakis, M., Samartin, A., Onate, E. (eds.): Proc., Fourth Int. Coll. on Computational Methods for Shell and Spatial Structures IASS-IACM, June 4-7, 2000, Chania-Crete, Greece.
- [5] Knoedel, P., Ummenhofer, Th.: Design of Squat Steel Tanks with $R/T > 5000$. TP056 in Motro, R. (ed.): Proc., IASS Symposium: Shell and Spatial Structures from Models to Realization, Montpellier, 20-24 September 2004.

Zylinder - Verträglichkeit mit unendlich steifer Bodenplatte

(Quelle: Girkmann Flächentragwerke Abs. 197; Formular Z-Vertraeg_Beton_05-09-26.mcd)

Geometrie

Radius $a := 5.0\text{m}$

Wanddicke $t := 30\text{cm}$

Werkstoff

Stahl - E-Modul $E := 30000 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2}$

Querdehnzahl $\mu := 0.3$

Parameter

Plattensteifigkeit $K := \frac{E \cdot t^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)}$ $K = 74176 \text{ kNm}$

Wellenlängenparameter $\lambda := \frac{1}{\sqrt{a \cdot t}} \cdot \sqrt[4]{3 \cdot (1 - \mu^2)}$ $\lambda = 1.05 \frac{1}{\text{m}}$

Halbwellenlänge (=Abstand der Wendepunkte in der Biegelinie)

$\Lambda := \frac{\pi}{\lambda}$ $\Lambda = 2993 \text{ mm}$

Verformungen aus dem (freigeschnittenen) Membranspannungszustand:

Radiale Verformung $w_0 := 6.8\text{mm}$

Tangentenverdrehung (näherungsweise) $\chi_0 := 0 \frac{\text{mm}}{\text{mm}}$

Verträglichkeitsbedingung:

Bestimme für den freigeschnittenen Rand durch Rechnen (oder Probieren !) die Größen Ringkraft R und Kreppelmoment M so, daß sie Summe der Radialverschiebungen w und die Summe der Tangentenverdrehungen χ (chi) aus dem Membranspannungszustand und den Störgrößen jeweils Null ergibt.

$$w = w_R + w_M + w_0 \quad \text{gleich Null}$$

$$\chi = \chi_R + \chi_M + \chi_0 \quad \text{gleich Null}$$

Bereitstellen der Randgrößen für $x = 0$ aus den Arbeitsblättern Z-Stoer-R und Z-Stoer-M

(aus technischen Gründen als Koeffizientenmatrix geschrieben)

	R	M	Mem	
Gleichung 1	$\left(\frac{-1}{2 \cdot K \cdot \lambda^3} \quad \frac{1}{2 \cdot K \cdot \lambda^2} \quad w_0 \right)$			gleich Null
Gleichung 2	$\left(\frac{1}{2 \cdot K \cdot \lambda^2} \quad \frac{-1}{K \cdot \lambda} \quad \chi_0 \right)$			gleich Null
Gleichung 2 durch λ dividiert ergibt Gleichung 2a	$\left(\frac{1}{2 \cdot K \cdot \lambda^3} \quad \frac{-1}{K \cdot \lambda^2} \quad \frac{\chi_0}{\lambda} \right)$			gleich Null
Gleichungen 1 und 2a addiert ergibt Gleichung 3	$\left(0 \quad \frac{1}{2 \cdot K \cdot \lambda^2} + \frac{-1}{K \cdot \lambda^2} \quad w_0 + \frac{\chi_0}{\lambda} \right)$			gleich Null
Hauptnenner bilden und zusammen fassen ergibt Gleichung 3a	$\left(0 \quad \frac{-1}{2 \cdot K \cdot \lambda^2} \quad w_0 + \frac{\chi_0}{\lambda} \right)$			gleich Null
Nach M auflösen	$M := \left(w_0 + \frac{\chi_0}{\lambda} \right) \cdot 2 \cdot K \cdot \lambda^2$		$M = 1111 \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$	
M in Gleichung 2 einsetzen ergibt Gleichung 4	$\left[\frac{1}{2 \cdot K \cdot \lambda^2} \quad 0 \quad \chi_0 - \frac{\left(w_0 + \frac{\chi_0}{\lambda} \right) \cdot 2 \cdot K \cdot \lambda^2}{K \cdot \lambda} \right]$			gleich Null
Kürzen ergibt Gleichung 4a	$\left[\frac{1}{2 \cdot K \cdot \lambda^2} \quad 0 \quad \chi_0 - \left(w_0 + \frac{\chi_0}{\lambda} \right) \cdot 2 \cdot \lambda \right]$			gleich Null
Nach R auflösen	$R := \left[\left(w_0 + \frac{\chi_0}{\lambda} \right) \cdot 2 \cdot \lambda - \chi_0 \right] \cdot 2 \cdot K \cdot \lambda^2$		$R = 2332 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$	

Zylinder unter Randstörung - Radiale Ringlast plus Krepelmoment

(Quelle: Girkmann Flächentragwerke Abs. 197; Formular Z-Stoer-R+M_Beton_05-09-26.mcd)

Geometrie

Radius $a := 5.0\text{m}$

Wanddicke $t := 30\text{cm}$

Werkstoff

E-Modul $E := 30000 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2}$

Querdehnzahl $\mu := 0.3$

Parameter

Plattensteifigkeit $K := \frac{E \cdot t^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)}$ $K = 74176 \text{ kNm}$

Wellenlängenparameter $\lambda := \frac{1}{\sqrt{a \cdot t}} \cdot \sqrt[4]{3 \cdot (1 - \mu^2)}$ $\lambda = 1.05 \frac{1}{\text{m}}$

Halbwellenlänge (=Abstand der Wendepunkte in der Biegelinie)

$\Lambda := \frac{\pi}{\lambda}$ $\Lambda = 2993 \text{ mm}$

Vorbereiten der graphischen Darstellung

start := 0mm end := 1.5 Λ Npts := 100 i := 1..Npts

step := $\frac{\text{end} - \text{start}}{\text{Npts} - 1}$ $x_i := \text{start} + \text{step} \cdot (i - 1)$

Randstörgrößen

Radiale, nach innen gerichtete Ringlast $R := 2332 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Krepelmoment, nach außen drehend $M := 1111 \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$

Schnittgrößen

Radiale Verformung

$$wR_i := \frac{-R}{2 \cdot K \cdot \lambda^3} \cdot e^{-\lambda \cdot x_i} \cdot \cos(\lambda \cdot x_i)$$

$$wM_i := \frac{M}{2 \cdot K \cdot \lambda^2} \cdot e^{-\lambda \cdot x_i} \cdot (\cos(\lambda \cdot x_i) - \sin(\lambda \cdot x_i))$$

Tangenten-Neigung

$$\chi_{xR_i} := \frac{R}{2 \cdot K \cdot \lambda^2} \cdot e^{-\lambda \cdot x_i} \cdot (\cos(\lambda \cdot x_i) + \sin(\lambda \cdot x_i))$$

$$\chi_{xM_i} := \frac{-M}{K \cdot \lambda} \cdot e^{-\lambda \cdot x_i} \cdot \cos(\lambda \cdot x_i)$$

Biegemoment (Meridian)

$$m_{xR_i} := \frac{-R}{\lambda} \cdot e^{-\lambda \cdot x_i} \cdot \sin(\lambda \cdot x_i)$$

$$m_{xM_i} := M \cdot e^{-\lambda \cdot x_i} \cdot (\cos(\lambda \cdot x_i) + \sin(\lambda \cdot x_i))$$

Querkraft (Meridianrichtung)

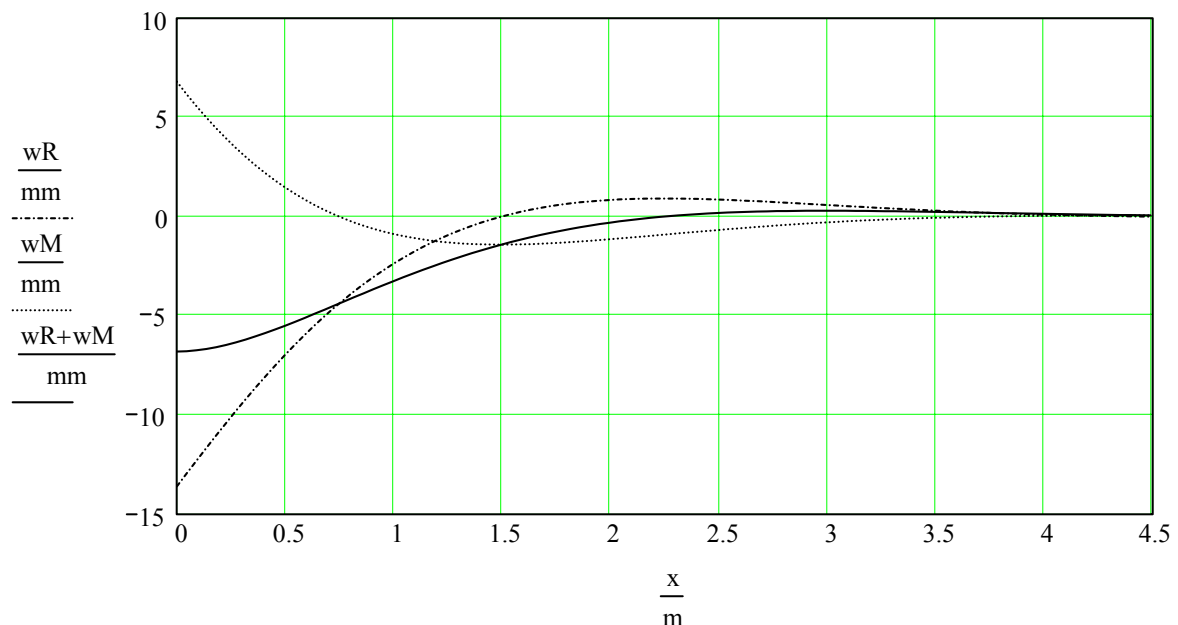
$$q_{xR_i} := -R \cdot e^{-\lambda \cdot x_i} \cdot (\cos(\lambda \cdot x_i) - \sin(\lambda \cdot x_i))$$

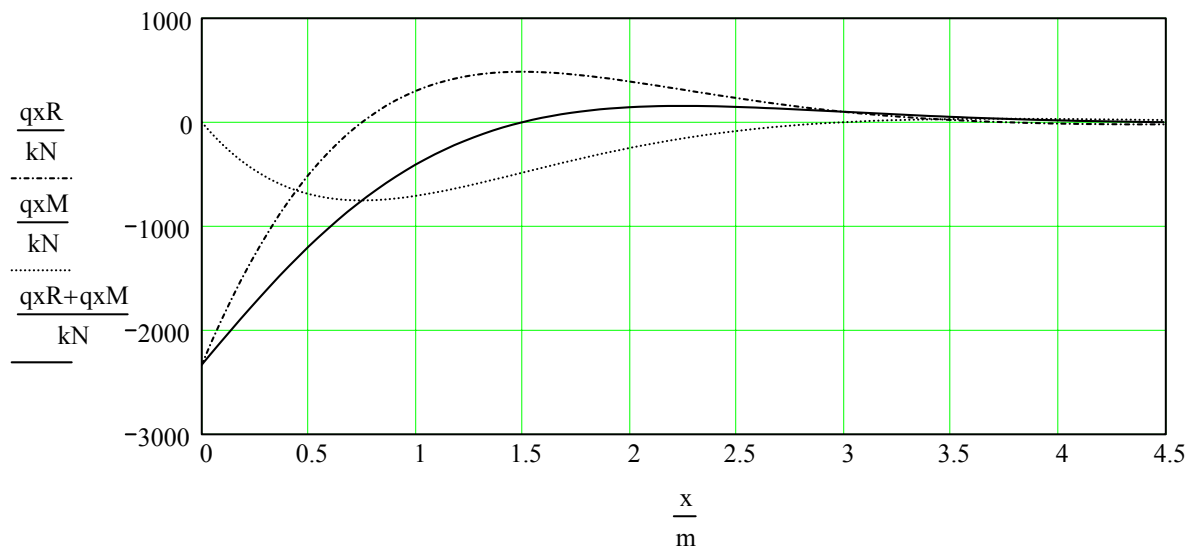
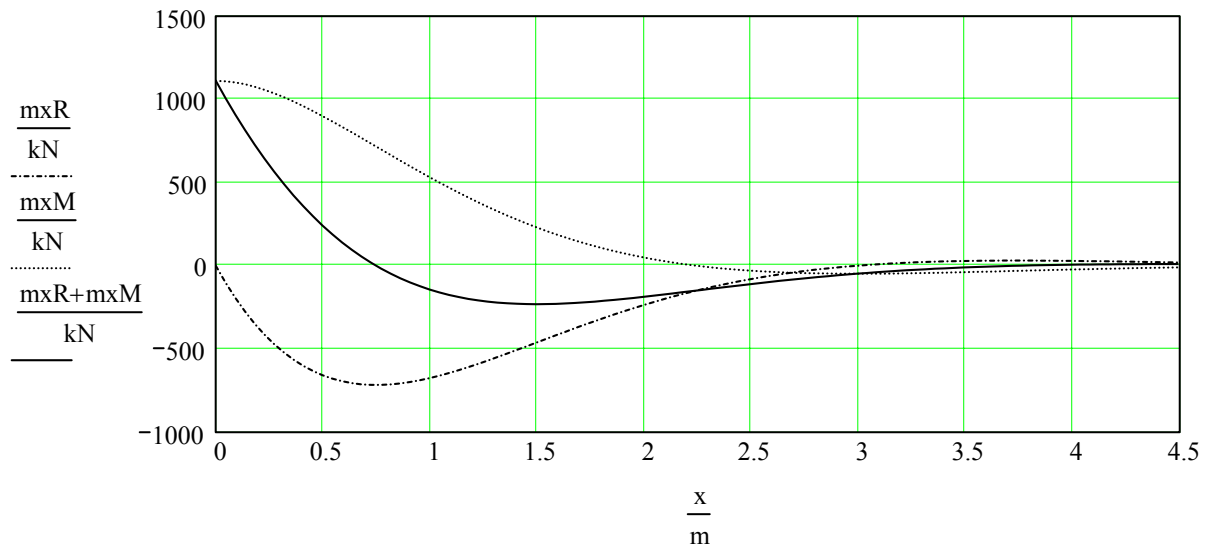
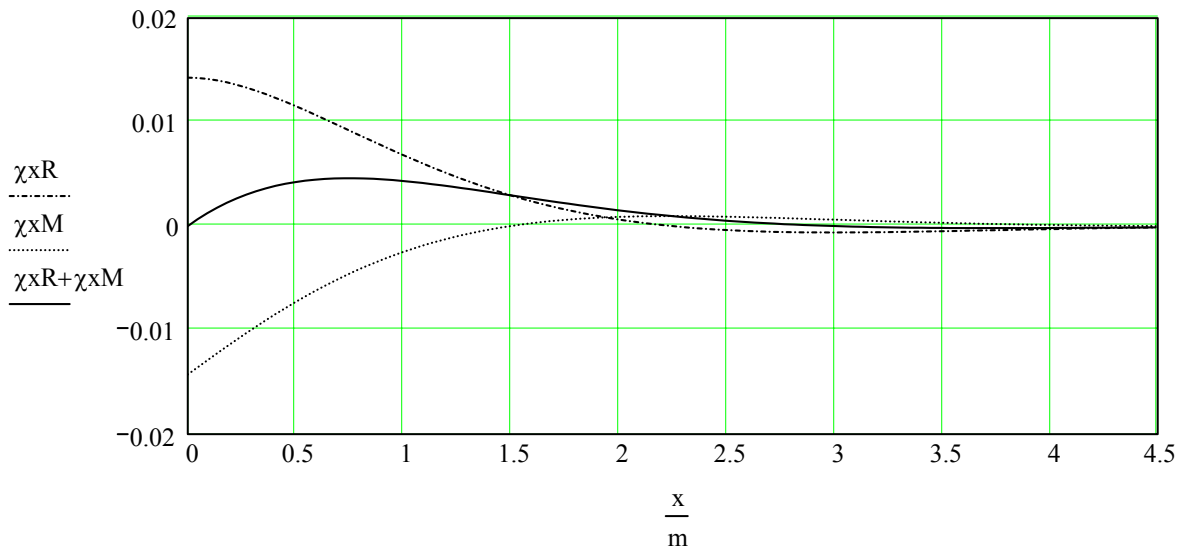
$$q_{xM_i} := -2 \cdot \lambda \cdot M \cdot e^{-\lambda \cdot x_i} \cdot \sin(\lambda \cdot x_i)$$

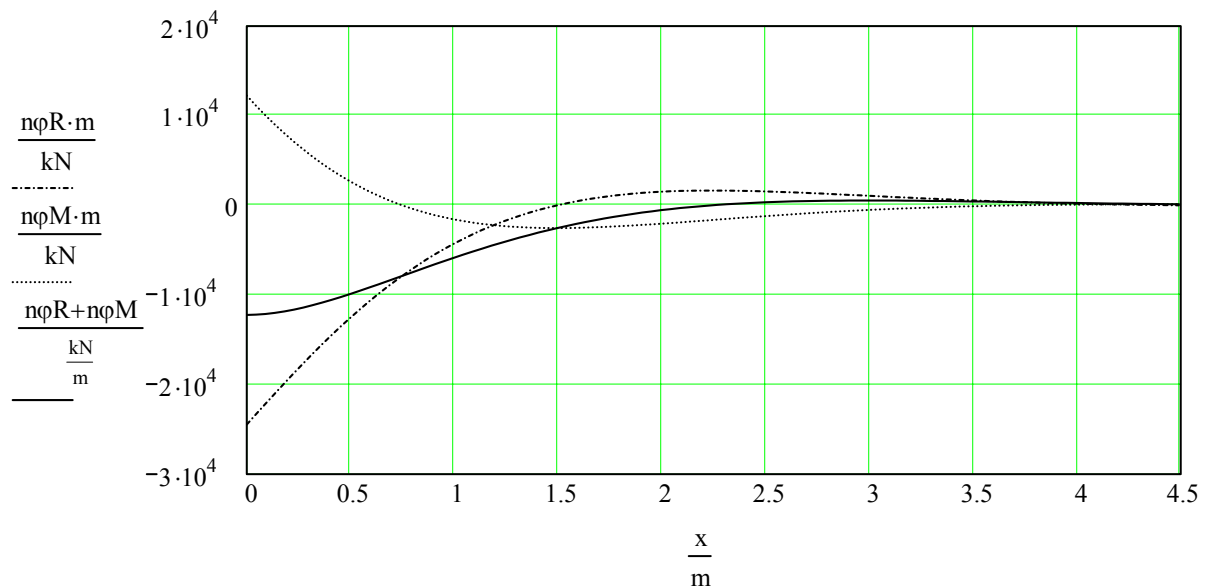
Umfangskraft

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

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







Bemessung Stahlbeton: Ermitteln der Längsbewehrung

Die folgenden Verweise beziehen sich auf DIN 1045-1:2001-07 bzw. Rußwurm, D., Fabritius, E.: Bewehren von Stahlbetontragwerken nach DIN 1045-1:2001-07. Institut für Stahlbetonbewehrung e.V., München 2002. download unter www.betonstahlmatten.de.

konstruktiv gewählt: Zug- und Druckbewehrung

Geometrie

Wanddicke wie oben gewählt:	$h := t$	$h = 30 \text{ cm}$
Betondeckung gewählt (symmetrisch)		$d_{1,2} := 5 \text{ cm}$
Statische Höhe	$d := h - d_{1,2}$	$d = 25 \text{ cm}$

Werkstoff

Betongüte gewählt (Tab. 9)	C 25/30
Nennwert der Druckfestigkeit (Tab. 9)	$f_{ck} := 25 \frac{N}{mm^2}$
Abminderungsfaktor für Langzeiteinwirkung (Gl. 67)	$\alpha := 0.85$

Material-Teilsicherheitsbeiwert (Tab. 2) $\gamma_c := 1.5$

Bemessungswert der Druckfestigkeit (Gl. 67)

$$f_{cd} := \alpha \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad f_{cd} = 14.2 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Betonstahl gewählt BSt 500

Streckgrenze (Tab. 11) $f_{yk} := 500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Material-Teilsicherheitsbeiwert (Tab. 2) $\gamma_s := 1.15$

Bemessungswert der Fließgrenze (Bild 27)

- Verfestigung nach Abs. 9.2.4 mit $f_{th,cal}$ wird nicht verwendet

$$f_{yd} := \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \quad f_{yd} = 435 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Schnittgrößen

Bemessungsmoment aus der Summe der Randstörgrößen

$$m_{Eds} := (m_x R_1 + m_x M_1) \cdot 1.35 \quad m_{Eds} = 1500 \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$$

Bezogenes Moment (RU Tafel 3.2.3)

$$\mu_{Eds} := \frac{m_{Eds}}{d^2 \cdot f_{cd}} \quad \mu_{Eds} = 1.69$$

ist größer als Tabellenwerte: **größere Wanddicke erforderlich**

Nulllinienlage gewählt für geringe Druckkräfte: $x_{lim} := 0.45$

Index für Bewehrungslage: $j := 1..2$
1 = Zugseite; 2 = Druckseite

Stahlspannung abgelesen
(RU Tafel 3.2.3 Kopfzeilen)

$$\sigma_{sd} := \begin{pmatrix} 437 \\ -389 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Lage der Druckbewehrung $\frac{d_{1,2}}{d} = 0.20$

Mech. Bewehrungsgrad für $\mu E_{ds} = 0,55$ abgelesen (RU Tafel 3.2.3)

$$\omega := \begin{pmatrix} 0.6817 \\ 0.3174 \end{pmatrix}$$

erf. Bewehrung $a_{s_j} := \omega_j \cdot d \cdot \frac{f_{cd}}{\sigma_{sd_j}}$ $a_s = \begin{pmatrix} 55 \\ -29 \end{pmatrix} \frac{\text{cm}^2}{\text{m}}$

Bemessung Stahlbeton: Ermitteln der Umfangsbewehrung

konstruktiv gewählt: symmetrische Bewehrung innen und außen

Schnittgrößen

Bemessungsnormalkraft aus der Summe der Randstörgrößen

$$n_{\varphi,d} := (n_{\varphi}R_1 + n_{\varphi}M_1) \cdot 1.35 \quad n_{\varphi,d} = -16520 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Druckkraft -
daher keine Bewehrung zum Abdecken der Randstörung erforderlich

Bemessung Stahlbeton: Ermitteln der Querkraftbewehrung

Bemessungsquerkraft aus der Summe der Randstörgrößen

$$V_{Ed} := |(q_x R_1 + q_x M_1) \cdot 1.35| \quad V_{Ed} = 3148 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Tragfähigkeit ohne Querkraftbewehrung (Gl. 70)

Betongüte (Gl. 71) $\eta_1 := 1.0$

Einfluß der Bauteilhöhe (Gl. 71)

$$\kappa := 1 + \sqrt{\frac{200\text{mm}}{d}} \quad \kappa = 1.89$$

Begrenzung: $\kappa := \text{wenn}(\kappa > 2,2, \kappa)$ $\kappa = 1.89$

Längsbewehrungsgrad (Gl. 71)

$$\rho_L := \frac{a_{s1}}{d} \quad \rho_L = 0.022$$

Begrenzung:

$$\rho_L := \text{wenn}(\rho_L > 0.02, 0.02, \rho_L) \quad \rho_L = 0.020$$

$$V_{Rd.ct} := 0.10 \cdot \kappa \cdot \eta_1 \cdot \left(100 \cdot \rho_L \cdot \frac{f_{ck}}{\frac{N}{mm^2}} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot d \cdot \frac{N}{mm^2} \quad V_{Rd.ct} = 174 \frac{kN}{m}$$

Fachwerkmodell

Neigung der Druckstreben - vereinfacht nach Abs. 10.3.4 (5)

$$\theta := \text{acot}(1.2) \quad \theta = 40 \text{ Grad}$$

Innerer Hebelarm - aus RU Tafel 3.2.3 abgelesen

$$\zeta := 0.813$$

$$z := \zeta \cdot d$$

$$z = 203 \text{ mm}$$

Erforderliche Querkraftbewehrung rechtwinklig zum Meridian -
Fließbeginn der Bewehrung (rückwärts aus Gl. 75)

$$a_{V.s} := \frac{V_{Ed}}{f_{yd} \cdot z \cdot \cot(\theta)} \quad a_{V.s} = 297 \frac{cm^2}{m^2}$$

Sprechweise: aV Quadratzentimeter Bügelschenkel je m2 Behälterwand

Grenzwert der Querkrafttragfähigkeit - Druckstrebenbruch (Gl. 76)

$$\alpha_c := 0.75 \cdot \eta_1 \quad \alpha_c = 0.75$$

$$V_{Rd.max} := \frac{z \cdot \alpha_c \cdot f_{cd}}{\cot(\theta) + \tan(\theta)} \quad V_{Rd.max} = 1062 \frac{kN}{m}$$

Übungsaufgaben zur Prüfungsvorbereitung

Die folgenden Übungsaufgaben sollen dazu dienen, praxisnahe mit dem vermittelten Stoff umzugehen. Die Aufgaben entsprechen dabei in Umfang und Schwierigkeitsgrad den Prüfungsaufgaben.

Hinweis:

Falls nicht anders angegeben, sind die angegebenen Einwirkungen Gebrauchszustände. Auch die Schnittgrößen und Spannungen sollen auf Gebrauchslastniveau angegeben werden.

1. Skizzieren Sie an den neben-/untenstehenden Behältern die Freischnitte, die geführt werden müssen, um die Membranzustände berechnen zu können.

2. Gegeben ist ein zylindrischer stehender Behälter mit folgenden Abmessungen:

Durchmesser $D = 8,50 \text{ m}$

Höhe $H = 5,00 \text{ m}$

Der Behälter ist für eine flüssiges Medium mit $\gamma = 10 \text{ kN/m}^3$ auszulegen.

Berechnen Sie den maximalen Innendruck p_i [kN/m^2] bei einer Füllhöhe von 4,50 m.

3. Gegeben ist ein zylindrischer stehender Behälter mit den Maßen aus Aufgabe 2:

Berechnen Sie die maximale Umfangszugkraft $n\phi$ [kN/m]

Falls Sie für Aufgabe 2 keine Lösung ermittelt haben, verwenden Sie $p_i = 50 \text{ kN/m}^2$

4. Gegeben ist ein zylindrischer stehender Behälter mit den Angaben aus Aufgabe 3:
Ermitteln Sie die Umfangszugspannung σ_φ [N/mm²], wenn der Behälter aus Stahlblech mit einer Wanddicke von 8 mm gefertigt ist.
Falls Sie für Aufgabe 3 keine Lösung ermittelt haben, verwenden Sie $n\varphi = 350$ kN/m

5. Gegeben ist ein zylindrischer stehender Behälter mit den Angaben aus Aufgabe 4:
Ermitteln Sie die maximale Radienvergrößerung w_0 [mm]
Falls Sie für Aufgabe 4 keine Lösung ermittelt haben, verwenden Sie $\sigma_\varphi = 30$ N/mm²

6. Gegeben ist ein zylindrischer stehender Behälter mit den Angaben aus Aufgabe 3:
Ermitteln Sie die erforderliche Umfangsbewehrung a_s [cm²/m], wenn aus Gründen der Risseverteilung die Bewehrung nur mit 100 N/mm² ausgenutzt werden soll.
Falls Sie für Aufgabe 3 keine Lösung ermittelt haben, verwenden Sie $n\varphi = 350$ kN/m

7. Gegeben ist ein zylindrischer stehender Behälter mit den Angaben aus Aufgabe 5:
Ermitteln Sie die Randstörgrößen R und M für die Zylinderschale.
Näherungsweise ist anzunehmen, daß die Zylinderschale starr an eine unendlich steife Bodenplatte angeschlossen wird.
Falls Sie für Aufgabe 5 keine Lösung ermittelt haben, verwenden sie $w_0 = 1,0$ mm

8. Gegeben ist ein zylindrischer stehender Behälter mit den Angaben aus Aufgabe 7:
Ermitteln sie die maximalen Werte für $n\varphi = f(R,M)$ und $m_x = f(R,M)$ für die Zylinderschale. Skizzieren Sie den Verlauf der genannten Größen entlang eines ca. 1 m Langen Meridianbereiches.
Falls Sie für Aufgabe 7 keine Lösung ermittelt haben, verwenden Sie
 $R = 3,3$ kN/m und $M = 0,25$ kNm/m

9. Gegeben ist ein zylindrischer stehender Behälter mit den Angaben aus Aufgabe 8:
Ermitteln Sie die maximalen Spannungen σ_x [N/mm²] und σ_φ [N/mm²] jeweils für die Innen- und Außenseite der Schalenwand.
Falls Sie für Aufgabe 8 keine Lösung ermittelt haben, verwenden Sie
 $n\varphi = -300$ kN/m $m_x = +0,65$ kNm/m

10. Gegeben ist ein zylindrischer stehender Behälter mit den Angaben aus Aufgabe 8:

Ermitteln Sie die maximalen Vergleichsspannungen σ_v [N/mm²] jeweils für die Innen- und Außenseite der Schalenwand.

Falls Sie für Aufgabe 9 keine Lösung ermittelt haben, verwenden Sie

$$\sigma_{x,\text{innen}} = + 57 \text{ N/mm}^2 \quad \sigma_{\varphi} = -18 \text{ N/mm}^2$$

11. Gegeben ist ein zylindrischer stehender Behälter mit den Angaben aus Aufgabe 6:

Ermitteln Sie die maximale Radienvergrößerung w_0 [mm]

Falls Sie für Aufgabe 6 keine Lösung ermittelt haben, verwenden Sie $a_s = 10 \text{ cm}^2/\text{m}$

Schriftliche Prüfung am 10.07.2006

Musterlösung

Erreichbare Punktzahl: 37,5 (entspr. 117 %); erreichte Punkte

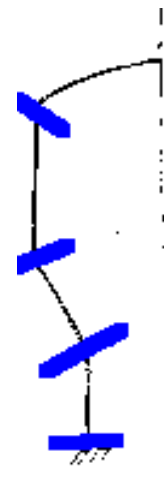
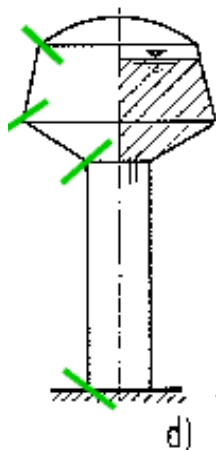
(Unterschrift Prüfer)

Name, Vorname, Matrikelnummer:

Hinweis:

Falls nicht anders angegeben, sind die angegebenen Einwirkungen Gebrauchszustände.
Auch die Schnittgrößen und Spannungen sind auf Gebrauchslastniveau anzugeben.
Geben Sie alle Ergebnisse mit (mindestens) 3 Ziffern Genauigkeit an.

1. Skizzieren Sie an den untenstehenden Behältern die Freischnitte (jeweils nur auf einer Seite der Symmetrieachse), die geführt werden müssen, um die Membranzustände berechnen zu können.



Ergebnis (1P)

2. Gegeben ist ein zylindrischer stehender Behälter mit folgenden Abmessungen:
Durchmesser $D = 7,80 \text{ m}$
Höhen $H_{\text{zyl}} = 12,70 \text{ m}$; $H_{\text{füll}} = 12,50 \text{ m}$
Flüssiges Medium $\gamma = 10 \text{ kN/m}^3$

Berechnen Sie die maximale Umfangszugkraft $n\varphi$ [kN/m] für einen maximalen Innendruck $p_{i,innen} = 125 \text{ kN/m}^2$

Lösung: $n\varphi = p_i \cdot R = 125 \text{ kN/m}^2 \cdot 7,80 \text{ m} / 2 = 488 \text{ kN/m}$

Ergebnis (1P):

3. Gegeben ist ein zylindrischer stehender Behälter mit den Angaben aus Aufgabe 2:
Ermitteln Sie die Umfangszugspannung $\sigma\varphi$ [N/mm²], wenn der Behälter aus Stahlblech (S 235 JR mit $f_{y,k} = 240 \text{ N/mm}^2$; $E_{k} = 2,1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$; $\mu = 0,3$) mit einer Wanddicke von 4,0 mm gefertigt ist.

Falls Sie für Aufgabe 2 keine Lösung ermittelt haben, verwenden Sie $n\varphi = 920 \text{ kN/m}$

Lösung: $\sigma\varphi = n\varphi / T = 488 \text{ N/mm} / 4 \text{ mm} = 122 \text{ N/mm}^2$

Ersatzlösung: $\sigma\varphi = n\varphi / T = 920 \text{ N/mm} / 4 \text{ mm} = 230 \text{ N/mm}^2$

Ergebnis (1P):

4. Gegeben ist ein zylindrischer stehender Behälter mit den Angaben aus Aufgabe 3:

Ermitteln Sie die maximale Radienvergrößerung w_0 [mm]

Falls Sie für Aufgabe 3 keine Lösung ermittelt haben, verwenden Sie $\sigma\varphi = 195 \text{ N/mm}^2$

Lösung: $w_0 = R \cdot \sigma\varphi / E = 7800 \text{ mm} / 2 \cdot 122 \text{ N/mm}^2 / 2,1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2 = 2,27 \text{ mm}$

Ersatzlösung: $w_0 = R \cdot \sigma\varphi / E = 7800 \text{ mm} / 2 \cdot 195 \text{ N/mm}^2 / 2,1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2 = 3,62 \text{ mm}$

Ergebnis (1P):

5. Gegeben ist ein zylindrischer stehender Beton-Behälter (C30/37 mit $f_{c,k} = 30 \text{ MN/m}^2$; $E_{k} = 34000 \text{ MN/m}^2$; $\mu = 0,3$) mit den Schnittgrößen aus Aufgabe 2:

Ermitteln Sie die erforderliche Gesamt-Umfangsbewehrung a_s [cm²/m], wenn aus Gründen der Risseverteilung die Bewehrung im Gebrauchszustand nur mit 175 N/mm^2 ausgenutzt werden soll.

Falls Sie für Aufgabe 2 keine Lösung ermittelt haben, verwenden Sie $n\varphi = 920 \text{ kN/m}$

Lösung: $a_s = n\varphi / \sigma_{zul} = 488 \text{ kN/m} / 17,5 \text{ kN/cm}^2 = 27,9 \text{ cm}^2 / \text{m}$

Ersatzlösung: $a_s = n\varphi / \sigma_{zul} = 920 \text{ kN/m} / 17,5 \text{ kN/cm}^2 = 52,6 \text{ cm}^2 / \text{m}$

Ergebnis (1P):

6. Gegeben ist ein zylindrischer stehender Behälter mit den Angaben aus Aufgabe 5:
Legen Sie die Verteilung der Umfangsbewehrung auf die Innen- und Außenfläche der Behälterwand fest.

Lösung: $a_{s,innen} = 14,0 \text{ cm}^2 / \text{m}; \quad a_{s,außen} = 14,0 \text{ cm}^2 / \text{m}$

Ersatzlösung: $a_{s,innen} = 26,3 \text{ cm}^2 / \text{m}; \quad a_{s,außen} = 26,3 \text{ cm}^2 / \text{m}$

Ergebnis (1P):

7. Gegeben ist ein zylindrischer stehender Behälter mit den Angaben aus Aufgabe 5:
Warum wird bei Betonbehältern nicht die ganze Umfangsbewehrung in der Mitte der
Wand angeordnet? Begründen Sie in Stichworten.

Lösung: ... unplanmäßige Biegebeanspruchung in der Wand abdecken

Ergebnis (1P):
.....

8. Gegeben ist ein zylindrischer stehender Behälter mit den Angaben aus Aufgabe 4:
Ermitteln Sie die Randstörgrößen R und M für die Zylinderschale.
Näherungsweise ist anzunehmen, daß die Zylinderschale starr an eine unendlich steife
Bodenplatte angeschlossen wird.

Falls Sie für Aufgabe 4 keine Lösung ermittelt haben, verwenden sie $w_0 = 4,75 \text{ mm}$

Lösung: $K = 1,23 \text{ kNm}$ $\lambda = 10,3 * 1/m$
 $R = 12,2 \text{ kN/m ...}$ $M = 0,592 \text{ kNm/m}$

Ersatzlösung: $R = 25,5 \text{ kN/m ...}$ $M = 1,238 \text{ kNm/m}$

Ergebnis (4P):

9. Gegeben ist ein zylindrischer stehender Behälter mit den Angaben aus Aufgabe 8:
Ermitteln sie die extremalen Werte (Maximum und Minimum) für $n\varphi = f(R,M)$ und
 $m_x = f(R,M)$ für die Zylinderschale. Skizzieren Sie den Verlauf der genannten Größen
entlang eines ca. 1 m langen Meridianbereiches.

Falls Sie für Aufgabe 8 keine Lösung ermittelt haben, verwenden Sie

$R = 25,5 \text{ kN/m}$ und $M = 1,238 \text{ kNm/m}$

Lösung: $n\varphi = -490 \text{ kN/m} \text{ ./} +21,2 \text{ kN/m}$ $m_x = +0,592 \text{ kNm/m} \text{ ./} -0,12 \text{ kNm/m}$

Ersatzlösung: $n\varphi = -1024 \text{ kN/m} \text{ ./} +44,2 \text{ kN/m}$ $m_x = +1,238 \text{ kNm/m} \text{ ./} -0,26 \text{ kNm/m}$
(betragsmäßige Minima aus Kurvenverlauf im Skript abschätzen)

Ergebnis (4P):

10. Zusatzfrage: Warum braucht man die in der vorigen Aufgabe ermittelten Schnittgrößen
bei üblichen Stahlbehältern nicht zu berücksichtigen? (erläutern Sie in Stichworten)

Lösung: weil die üblichen Fußanschlüsse eher biegeweich als biegesteif sind

Ergebnis (2P):

11. Gegeben ist ein zylindrischer stehender Behälter mit den Angaben aus Aufgabe 8:
Skizzieren Sie einen sinnvollen biegesteifen Anschluß des Behälters an die Bodenplatte;
nehmen Sie an, daß im Behälter ein körniges, unempfindliches Medium gelagert wird.
Bemaßen Sie die Bauteildicken mit Zirka-Maßen. (2P)

12. Gegeben ist ein zylindrischer stehender Behälter mit dem Anschluß aus Aufgabe 11:
Skizzieren Sie einen alternativen Anschluß, mit dem der Behältermantel eher biegeweich ("gelenkig") als biegesteif an die Bodenplatte angeschlossen wird. Bemaßen Sie die Bauteildicken mit Zirka-Maßen. (2P)

13. Gegeben ist ein zylindrischer stehender Behälter mit dem Anschluß aus Aufgabe 12:
Beantworten Sie folgende Fragen (es genügen jeweils 2 Stichworte):

Worin liegt der Vorteil des Anschlusses?

Lösung: konstruktiv einfacher, kleinere Kräfte

Ergebnis (1P):

Welche Einschränkungen bedeutet der Anschluß für den Behälter bzw. das gelagerte Medium?

Lösung: Flüssigkeiten und feinkörnige Medien scheiden aus

Ergebnis (1P):

14. Gegeben ist ein zylindrischer stehender Behälter mit den Angaben aus Aufgabe 3:
Der Behälter ist durch eine steife Dachscheibe geschlossen und innendruckfrei. Der untere Rand ist ausreichend verankert.

Führen Sie den Beulnachweis für Axialdruck nach DIN 18800 Teil 4 im Bemessungszustand für einen Bemessungswert der Dachlast von $F_d = 250 \text{ kN}$, die Eigenlast des Zylindermantels wird vernachlässigt.

Es handelt sich um einen "mittellangen Zylinder" nach Gl. 27.

Ergebnisse:

Behälterumfang U (0,5 P):

. Lösung: $U = \pi * 7,80 \text{ m} = 24,50 \text{ m}$.

Bemessungswert der Längsspannung $\sigma_{x,d}$ (1P):

. Lösung: $\sigma_{x,d} = 250000 \text{ N} / (24500 \text{ mm} * 4 \text{ mm}) = 2,55 \text{ N/mm}^2$.

Beiwert C_x (1P):

. Lösung: $C_x = 1,000$.

Halbwellenlänge der elastischen Ringbeule $L_{H,Ring}$ (maßgebend) (1P):

.....

. Lösung: $L_{H,Ring} = 216 \text{ mm}$.

Ideale Beulspannung $\sigma_{x,Si}$ (1P):

. Lösung: $\sigma_{x,Si} = 130 \text{ N/mm}^2$.

Schlankheit λ (1P):

. Lösung: $\lambda = 1,36$.

Abminderungsfaktor κ_2 (1P):

- . Lösung: $\kappa_2 = 0,120$.
Reale Beulspannung $\sigma_{x,S,R,k}$ (1P):
. Lösung: $\sigma_{x,S,R,k} = 28,8 \text{ N/mm}^2$.
Teilsicherheitsbeiwert γ_M (1P):
. Lösung: $\gamma_M = 1,32$.
Grenzbeulspannung $\sigma_{x,S,R,d}$ (1P):
. Lösung: $\sigma_{x,S,R,d} = 21,8 \text{ N/mm}^2$.
Ausnutzungsgrad η (1P):
. Lösung: $\eta = 2,55 \text{ N/mm}^2 / 21,8 \text{ N/mm}^2 = 0,117$.

15. Gegeben ist ein zylindrischer stehender Behälter mit den Angaben aus Aufgabe 14:
Warum muß man diesen Beulsicherheitsnachweis führen, obwohl er immer zu so kleinen Ausnutzungsgraden führt?
Lösung: weil man das Ergebnis für den Interaktionsnachweis braucht
Ergebnis (2P):

16. Gegeben ist ein zylindrischer stehender Behälter mit den Angaben aus Aufgabe 14:
Legen Sie die Elemententeilung für einen Beulnachweis mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode fest. Welche Länge dürfen die Elemente in Längsrichtung maximal haben, damit sinnvolle Ergebnisse zu erwarten sind? Welche Länge der Elemente wählen Sie in Umfangsrichtung des Behälters?
Lösung:
Halbwellenlänge in Längsrichtung: 216 mm (aus Aufgabe 14)
Elementlänge höchstens 1/5 der Halbwellenlänge: $216 \text{ mm} / 5 = 43 \text{ mm}$
Längsteilung $12700 \text{ mm} / 43 \text{ mm} = 295$; gewählt: 300 Elemente; Länge = ca. 42,3 mm
Umfangsteilung: $24500 \text{ mm} / (2 * 43 \text{ mm}) = 285$; gewählt: 300 Elemente; Länge ca. 81,7 mm, Seitenverhältnis ca. 1/1,9 (die Welligkeit in Umfangsrichtung beim Schachbrettbeulen ist damit abgedeckt)
Ergebnis (2P):
.....
.....