

Statische Berechnung

für einen Flachbodenbehälter

aus Polyethylen PE 100

| | |
|-----------------|--|
| Lagermedium: | Kaliumborat |
| Aufstellung: | Außerhalb von Gebäuden |
| Auftragsnummer: | Testauftrag |
| Fabriknummer: | |
| Auftraggeber: | Testauftraggeber1 Testauftraggeber2 |
| Betreiber: | Testbetreiber |
| Aufstellort: | Testort |

Diese statische Berechnung wurde aufgestellt von:

Kunststoff- und Behälterbau
Müller, Meier und Partner
Teststraße 1
12345 Testort

31. Oktober 2011

Datum

Unterschrift

Diese statische Berechnung wurde mit der Software Calveta DVS 2205-2, Version 5.8 beta, erstellt.

© W. Waltemath, Furkastraße 3A, D-12107 Berlin

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Vorbemerkung | 3 |
| 1.1 | Allgemeines | 3 |
| 1.2 | Lagermedium | 3 |
| 1.3 | Bauart, Aufstellung, Betrieb | 3 |
| 1.4 | Sicherheitsbeiwerte | 4 |
| 2 | Abmessungen | 4 |
| 2.1 | Behälter | 4 |
| 2.2 | Stützen | 4 |
| 3 | Werkstoff | 5 |
| 3.1 | Dichte | 5 |
| 3.2 | Temperaturabhängige Kenngrößen | 5 |
| 3.3 | Abminderungsfaktor A2 | 6 |
| 3.4 | Schweißfaktoren | 6 |
| 4 | Belastungen | 6 |
| 4.1 | Eigenlast | 6 |
| 4.2 | Über- und Unterdrücke | 7 |
| 4.3 | Schneelast | 8 |
| 4.4 | Windlast | 8 |
| 4.5 | Belastung aus Anbauten | 9 |
| 5 | Axialspannungen im Zylinder | 9 |
| 5.1 | Axialspannungen aus den einzelnen Lastfällen | 10 |
| 5.2 | Axialspannungen aus Lastfallkombinationen | 10 |
| 6 | Nachweise | 11 |
| 6.1 | Nachweis des Kegeldaches | 11 |
| 6.2 | Nachweis des Zylindermantels | 17 |
| 6.3 | Nachweis des Bodens | 21 |
| 6.4 | Nachweis der Verankerung | 22 |
| 6.5 | Nachweis der Tragösen | 23 |
| 7 | Zusammenfassung | 24 |

1 Vorbemerkung

1.1 Allgemeines

Grundlage dieser statischen Berechnung ist die Richtlinie des Deutschen Verbands für Schweißtechnik DVS 2205-2.

Die in dieser statischen Berechnung verwendeten Abkürzungen entsprechen der Richtlinie DVS 2205-2. Um wiederkehrende Rechengänge zu vermeiden und um die Übersichtlichkeit zu erhöhen, werden in Abschnitt 6 (Nachweise) Hilfswerte ϕ definiert. Diese Hilfswerte sind in Richtlinie DVS 2205-2 nicht enthalten.

Es wird eine sorgfältige, den Regeln der Technik entsprechende Fertigung, ein sorgsamer Transport und eine einwandfreie Aufstellung der Behälter vorausgesetzt. Insbesondere ist auf ein ebenes Fundament zu achten. Der Behälterboden muss vollständig auf dem Fundament aufliegen. Die statische Auslegung des Fundaments ist nicht Gegenstand dieser Berechnung.

1.2 Lagermedium

Der Behälter dient zur Lagerung von Kaliumborat

Als maximale Dichte der Lagerflüssigkeit wird $\rho_F = 1,090 \text{ g/cm}^3$ angesetzt. Dies entspricht einem spezifischen Gewicht (Wichte) von $\gamma_F = 10,69 \text{ kN/m}^3$.

Es wird ein maximaler Füllungsgrad von 95,0 % gewählt.

Somit beträgt das Füllvolumen $V_F = 9,22 \text{ m}^3$.

Das Füllvolumen wird erreicht bei einer Füllhöhe $h_F = 2935 \text{ mm}$.

1.3 Bauart, Aufstellung, Betrieb

Als Werkstoff für den Behälter wird PE 100 verwendet. Es wird für die vorgesehene Gebrauchsdauer und Betriebstemperatur eine ausreichende Widerstandsfähigkeit des Behälterwerkstoffes gegenüber dem Lagermedium vorausgesetzt.

Für den Lagerbehälter wird eine Gebrauchsdauer von 25 Jahren angesetzt. Die rechnerische Betriebstemperatur beträgt $T_M = 20^\circ\text{C}$.

Die Aufstellung erfolgt außerhalb von Gebäuden. Die anzusetzenden Schnee- und Windlasten sind in den Abschnitten 4.3 und 4.4 angegeben.

Der Behälter ist belüftet. Ein langzeitiger innerer Über- oder Unterdruck kann sich deshalb nicht aufbauen.

Im Behälter muss eine Restfüllhöhe von $h_{RF} \geq 41 \text{ mm}$ verbleiben (siehe Abschnitt 6.3).

Das Behälterdach wird in Form eines Kegels ausgeführt. Die Verbindung Dach/Zylinder erfolgt entsprechend DVS 2205-2, Bild 13.

Der Zylindermantel wird mit konstanter Wanddicke aus verschweißten Tafeln hergestellt.

Die Verbindung Zylinder/Boden erfolgt entsprechend DVS 2205-2, Bild 12.

Der Behälter wird entsprechend DVS 2205-2, Bild 10, mit 4 Prätzen verankert.

1.4 Sicherheitsbeiwerte

Für die Spannungs- und Stabilitätsnachweise (siehe Abschnitt 6) werden folgende Teilsicherheitsbeiwerte angesetzt:

$$\begin{aligned}\gamma_{F1} &= 1,35 && \text{bei Einwirkung aus Eigengewicht, Füllung, Montage} \\ \gamma_{F2} &= 1,50 && \text{bei Einwirkung aus Über- und Unterdruck, Wind, Schnee} \\ \gamma_{F3} &= 0,90 && \text{bei Beanspruchung verringerndes Eigengewicht} \\ \\ \gamma_I &= 1,20 && \text{Wichtungsbeiwert für Belastungsfall II} \\ \gamma_M &= 1,10 && \text{Teilsicherheitsbeiwert des Widerstandes bzw. der Beanspruchbarkeit}\end{aligned}$$

2 Abmessungen

2.1 Behälter

2.1.1 Hauptabmessungen

$$\begin{array}{llll} \text{Innendurchmesser} & d & = & 2\,000 \text{ mm} \\ \text{Zylinderhöhe} & h_Z & = & 3\,000 \text{ mm} \quad (\text{bis Unterkante Kegeldach}) \\ \text{Höhe des Kegeldaches} & h_D & = & 268 \text{ mm} \\ \hline \text{Gesamthöhe} & h & = & 3\,268 \text{ mm} \\ \\ \text{Dachneigung} & \alpha_D & = & 15^\circ \\ & \kappa & = & 75^\circ \end{array}$$

2.1.2 Wanddicken

$$\begin{array}{ll} \text{Dach} & s_D = 12 \text{ mm} \\ \text{Zylinder} & s_Z = 15 \text{ mm} \\ \text{Boden} & s_B = 6 \text{ mm} \end{array}$$

2.1.3 Rauminhalt

$$\begin{array}{ll} \text{Rauminhalt des Zylinders} & V_Z = 9,42 \text{ m}^3 \\ \text{Rauminhalt des Kegeldaches} & V_D = 0,28 \text{ m}^3 \\ \hline \text{Gesamter Rauminhalt (100 \% -Volumen)} & V_{tot} = 9,71 \text{ m}^3 \\ \\ \text{Max. nutzbares Volumen (95 \% -Volumen)} & V_{95\%} = 9,22 \text{ m}^3 \end{array}$$

2.2 Stutzen

2.2.1 Stutzen im Dach

Der größte im Dach vorhandene Stutzen hat einen Außendurchmesser von $d_A = 630$ mm. Evtl. weitere im Dach vorhandene Stutzen haben auf den statischen Nachweis keinen Einfluss.

Der für den Spannungsnachweis des Kegeldaches (siehe Abschnitt 6.1.1) benötigte Verschwächungswert beträgt nach DVS 2205-2, Gleichung (34):

$$v_A = \frac{0,75}{1 + \frac{d_A}{2 \cdot \sqrt{(d + s_D) \cdot s_D}}} = \frac{0,75}{1 + \frac{630}{2 \cdot \sqrt{(2000 + 12) \cdot 12}}} = 0,248 \quad (1)$$

2.2.2 Stützen im Zylinder

Der für den Spannungsnachweis des Zylinders (siehe Abschnitt 6.2.1) benötigte Verschwächungswert beträgt nach DVS 2205-2, Gleichung (34):

$$v_{A N,i} = \frac{0,75}{1 + \frac{d_A}{2 \cdot \sqrt{(d + s_Z) \cdot s_Z}}} \quad \text{mit } d = 2000 \text{ mm} \quad (2)$$

Die Auswertung der Gleichung (2) erfolgt tabellarisch. In der folgenden Tabelle bedeuten:

- d_A = Außendurchmesser der Öffnung
- x = Abstand der Stützenmitte von der Oberkante des Bodens
- s_Z = Zylinderwanddicke im Bereich der Öffnung
- $v_{A N,i}$ = Verschwächungswert

| Nr. | Bezeichnung | d_A | x | s_Z | $v_{A N,i}$ |
|-----|-------------|--------|--------|-------|-------------|
| N1 | - keine - | 300 mm | 500 mm | 15 mm | 0,403 |

Die Wanddicke der Stützen muss mindestens SDR 11 (ehemals Druckstufe PN 10) entsprechen. Der Abstand des Öffnungsrandes von einer Schweißnaht muss mindestens 100 mm betragen.

3 Werkstoff

3.1 Dichte

Als Dichte des Werkstoffes PE 100 wird angesetzt: $\rho = 0,960 \text{ g/cm}^3$

3.2 Temperaturabhängige Kenngrößen

Die temperaturabhängigen Werkstoffkennwerte sind in der folgenden Tabelle angegeben. Die Festigkeiten K und der E-Modul E sind außerdem von der Beanspruchungsdauer abhängig. Es bedeutet:

- K_K und E_K \Rightarrow Kurzzeitig = 6 Minuten = 0,1 Stunden (z.B. Windlast)
- K_M \Rightarrow Mittellang = 3 Monate = 2190 Stunden (z.B. Schneelast)
- K_L \Rightarrow Langzeitig = 25 Jahre = 219000 Stunden (z.B. Eigenlast)

Für die verschiedenen Temperaturen und Beanspruchungszeiten erhält man die angegebenen Zeitstandfestigkeiten K aus der Richtlinie DVS 2205-1, Beiblatt 8

Der Kurzzeit-E-Modul E_K entspricht der Richtlinie DVS 2205-2, Tabelle 6.

Der Abminderungsfaktor A_1 zur Berücksichtigung der Zähigkeit entspricht der DIN EN 1778 bzw. der Richtlinie DVS 2205-1, Tabelle 2 (dort als A_4 bezeichnet).

Tabelle 1: Temperaturabhängige Kenngrößen

| Temperatur °C | Zeitstandfestigkeit [N/mm ²] | | | E-Modul | Abmind.-Faktor |
|------------------|--|-------|-------|----------------------------|----------------|
| | K_K | K_M | K_L | E_K [N/mm ²] | A_1 |
| 0,0 | 17,58 | 13,60 | 12,09 | 1 100 | 1,00 |
| 20,0 | 14,77 | 11,43 | 10,15 | 800 | 1,00 |
| 35,0 | 11,61 | 8,99 | 7,99 | 470 | 1,00 |
| 50,0 | 9,34 | 7,23 | 5,27 | 270 | 1,00 |

3.3 Abminderungsfaktor A2

Der Abminderungsfaktor für den Einfluss der Lagerflüssigkeit auf den Werkstoff beträgt für die Betriebstemperatur $T_M = 20^\circ\text{C}$:

$A_2 = 1,00$ (für Spannungsnachweise, in den DIBt-Medienlisten als A_{2B} bezeichnet)

$A_{2I} = 1,00$ (für Stabilitätsnachweise)

3.4 Schweißfaktoren

3.4.1 Dach

Schweißverfahren für die Radialnaht im Kegeldach: Warmgas-Extrusionsschweißen

Nach DVS 2205-1 gilt: Schweißfaktor langfristig: $f_S = 0,60$

Schweißfaktor kurzzeitig: $f_Z = 0,80$

3.4.2 Zylinder

Der Zylinder wird aus Tafeln zusammengeschweißt.

Schweißverfahren für die Längsnähte im Zylindermantel: Heizelementstumpfschweißen

Nach DVS 2205-1 gilt: Schweißfaktor langfristig: $f_S = 0,80$

Schweißfaktor kurzzeitig: $f_Z = 0,90$

4 Belastungen

4.1 Eigenlast

4.1.1 Eigenlast Dach

Für Stützen im Dach o.ä. wird folgende Ersatzflächenlast berücksichtigt:

$$g_A = 0,00 \text{ kN/m}^2$$

Flächenlast:

$$g_D = \frac{s_D \cdot \rho \cdot g \cdot 10^{-6}}{\sin \kappa} + g_A \cdot 10^{-3}$$

$$g_D = \frac{12 \cdot 0,960 \cdot 9,81 \cdot 10^{-6}}{\sin 75,0} + 0,00 \cdot 10^{-3} = 0,00012 \text{ N/mm}^2 \quad (3)$$

Gesamtlast:

$$G_D = g_D \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 0,00012 \cdot \frac{\pi \cdot 2000^2}{4} = 367 \text{ N} \quad (4)$$

4.1.2 Eigenlast Zylinder

$$G_Z = \pi \cdot (d + s_Z) \cdot h_Z \cdot s_Z \cdot \rho \cdot g \cdot 10^{-6}$$

$$G_Z = \pi \cdot (2000 + 15,0) \cdot 3000 \cdot 15,0 \cdot 0,960 \cdot 9,81 \cdot 10^{-6} = 2682 \text{ N} \quad (5)$$

4.1.3 Eigenlast Boden

Zur näherungsweisen Berücksichtigung des Bodendurchmessers wird die mit dem Zylinder-Innendurchmesser ermittelte Eigenlast um 5 % erhöht (Faktor 1,05).

$$G_B = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot s_B \cdot \rho \cdot g \cdot 10^{-6}}{4} \cdot 1,05$$

$$G_B = \frac{\pi \cdot 2000^2 \cdot 6,0 \cdot 0,960 \cdot 9,81 \cdot 10^{-6}}{4} \cdot 1,05 = 177 \text{ N} \quad (6)$$

4.1.4 Eigenlast des gesamten Behälters

$$G_E = G_D + G_Z + G_B = 367 + 2682 + 177 = 3227 \text{ N} \quad (7)$$

4.2 Über- und Unterdrücke

Langzeitige Über- oder Unterdrücke können nicht auftreten, da der Behälter frei belüftet wird.

Bei Außenaufstellung ist folgender Unterdruck aus Windsog (kurzzeitig) zu berücksichtigen:

$$p_{uS} = 0,60 \cdot q_{max} \cdot 10^{-3} = 0,60 \cdot 0,59 \cdot 10^{-3} = 0,00035 \text{ N/mm}^2 \quad (8)$$

Tabelle 2: Über- und Unterdrücke

| | innerer Überdruck | innerer Unterdruck |
|------------|--|---|
| langzeitig | $p_{\ddot{u}} = 0,00000 \text{ N/mm}^2$ | $p_u = 0,00000 \text{ N/mm}^2$ |
| kurzzeitig | $p_{\ddot{u}K} = 0,00050 \text{ N/mm}^2$ (5,0 mbar) | $p_{uK} = 0,00030 \text{ N/mm}^2$ (3,0 mbar) |
| | | $p_{uS} = 0,00035 \text{ N/mm}^2$ |

4.3 Schneelast

Der Behälter wird in einem Gebiet aufgestellt, das der Schneelastzone 2 entsprechend zuzuordnen ist. Nach gilt für die Schneelastzone 2 und für eine Aufstellhöhe bis 285 m über dem Meersniveau eine Schneelast auf dem Boden

$$s_k = 0,85 \text{ kN/m}^2 \text{ (Mindestwert)}$$

Der Formbeiwert für Kegel- und Flachdächer beträgt $\mu_1 = 0,8$. Als Schneelast auf dem Dach wird damit angesetzt:

$$p_S = \mu_1 \cdot s_k = 0,8 \cdot 0,85 = 0,68 \text{ kN/m}^2 = 0,00068 \text{ N/mm}^2$$

4.4 Windlast

4.4.1 Geschwindigkeitsdruck

Nach DIN 1055 Bild A.1 gilt für die Windzone 2 und für eine Aufstellhöhe bis 800 m über NN ein Geschwindigkeitsdruck

$$q_{ref} = 0,39 \text{ kN/m}^2$$

Der Abstand des Behälterbodens von OK-Gelände beträgt: $h_B = 0,00 \text{ m}$

Damit gilt: Abstand OK-Behälter / OK-Gelände

$$z = h_B + h = 0,00 + 3,27 = 3,27 \text{ m} \quad (9)$$

Bei Aufstellung im Binnenland (Mischprofil der Geländekategorien II und III) beträgt entsprechend Abschnitt 10.3 der Böengeschwindigkeitsdruck an der Oberkante des Behälters (für $z \leq 7 \text{ m}$):

$$q_{max} = 1,5 \cdot q_{ref} = 1,5 \cdot 0,39 = 0,59 \text{ kN/m}^2 \quad (10)$$

Der Böengeschwindigkeitsdruck wird konstant über die gesamte Behälterhöhe angenommen.

4.4.2 Radialsymmetrische Ersatzlast

Für die Ermittlung der radialsymmetrischen Ersatzbelastung gilt:

$$C^* = 1,0 \quad \text{für den Behälter mit Dach (siehe DVS 2205-2, Abschnitt 4.2.2.2)}$$

$$s_Z = 15,0 \text{ mm} \quad \text{(siehe Abschnitt 2.1)}$$

$$\delta = 0,46 \cdot \left(1 + 0,1 \cdot \sqrt{C^* \cdot \frac{d}{2 \cdot h_Z} \cdot \sqrt{\frac{d}{2 \cdot s_Z}}} \right) \leq 0,60$$

$$\delta = 0,46 \cdot \left(1 + 0,1 \cdot \sqrt{1,0 \cdot \frac{2000}{2 \cdot 3000} \cdot \sqrt{\frac{2000}{2 \cdot 15,0}}} \right) = 0,54 \quad (11)$$

$$p_{eu} = \delta \cdot q_{max} \cdot 10^{-3} = 0,54 \cdot 0,59 \cdot 10^{-3} = 0,00031 \text{ N/mm}^2 \quad (12)$$

4.4.3 Biegemomente infolge Windlast

Formbeiwert für Windlast auf Zylinder und Dach $c_{f1} = 0,8$

Anbauten sind nicht vorhanden, so dass kein Biegemoment aus einer Windlast auf Anbauten entstehen kann.

Für Wind auf das Kegeldach gilt:

Die Windangriffsfläche des Kegeldaches wird näherungsweise wie folgt berücksichtigt:

$$A_D = h_D \cdot d \cdot 10^{-6} = 268 \cdot 2000 \cdot 10^{-6} = 0,54 \text{ m}^2 \quad (13)$$

Die auf das Kegeldach wirkende Windlast beträgt somit:

$$F_D = c_{f1} \cdot q_{max} \cdot A_D = 0,8 \cdot 0,59 \cdot 0,54 = 0,25 \text{ kN} \quad (14)$$

Für Wind auf den Zylinder gilt:

Der Außendurchmesser des Zylinders beträgt:

$$d_{Außen} = d + 2 \cdot s_Z = 2000 + 2 \cdot 15,0 = 2030 \text{ mm} \quad (15)$$

In der folgenden Tabelle bedeuten:

- M_W = Biegemoment an der Unterkante des Zylinders ...
- $M_W(\text{Anbau})$ = ... infolge Windlast auf Anbauten
- $M_W(\text{Dach})$ = ... infolge Windlast auf Dach
- $M_W(\text{Zyli})$ = ... infolge Windlast auf Zylinder
- M_W = $M_W(\text{Anbau}) + M_W(\text{Dach}) + M_W(\text{Zyli})$

Tabelle 3: Biegemomente infolge Windlast

| Schuss i | Wanddicke s_Z | Zylinderhöhe h_Z | $M_W(\text{Anbau})$ kN · m | $M_W(\text{Dach})$ kN · m | $M_W(\text{Zyli})$ kN · m | M_W kN · m |
|-------------|--------------------|-----------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------|
| 1 | 15 mm | 3000 mm | 0,000 | 0,786 | 4,275 | 5,061 |

4.5 Belastung aus Anbauten

Anbaulasten (z.B. aus Bühnen oder Rührwerken) sind nicht vorhanden.

5 Axialspannungen im Zylinder

Für den Nachweis der Axialstabilität des Zylinders (siehe Abschnitt 6.2.4) werden die axialen Druckspannungen an der Unterkante des Zylinders benötigt.

5.1 Axialspannungen aus den einzelnen Lastfällen

$$\begin{aligned}
 \text{aus Eigenlast:} \quad \sigma_G &= \frac{G_D + G_Z}{\pi \cdot d \cdot s_Z} = \frac{367 + 2\,682}{\pi \cdot 2\,000 \cdot 15} = 0,032 \text{ N/mm}^2 \\
 \text{aus Unterdruck,} & \\
 \text{langzeitig:} \quad \sigma_{pu} &= \frac{p_u \cdot d}{4 \cdot s_Z} = \frac{0,000\,00 \cdot 2\,000}{4 \cdot 15} = 0,000 \text{ N/mm}^2 \\
 \text{aus Unterdruck,} & \\
 \text{kurzzeitig:} \quad \sigma_{puK} &= \frac{p_{uK} \cdot d}{4 \cdot s_Z} = \frac{0,000\,30 \cdot 2\,000}{4 \cdot 15} = 0,010 \text{ N/mm}^2 \\
 \text{aus Unterdruck,} & \\
 \text{infolge Windsog:} \quad \sigma_{puS} &= \frac{p_{uS} \cdot d}{4 \cdot s_Z} = \frac{0,000\,35 \cdot 2\,000}{4 \cdot 15} = 0,010 \text{ N/mm}^2 \\
 \text{aus Schnee auf} & \\
 \text{Dach:} \quad \sigma_S &= \frac{p_S \cdot d}{4 \cdot s_Z} = \frac{0,000\,68 \cdot 2\,000}{4 \cdot 15} = 0,023 \text{ N/mm}^2 \\
 \text{aus Windlast:} \quad \sigma_W &= \frac{4 \cdot M_W \cdot 10^3}{\pi \cdot d^2 \cdot s_Z} = \frac{4 \cdot 5\,061 \cdot 10^3}{\pi \cdot 2\,000^2 \cdot 15} = 0,107 \text{ N/mm}^2
 \end{aligned}$$

5.2 Axialspannungen aus Lastfallkombinationen

Folgende Lastfälle werden untersucht:

LF 1: Mit Unterdruck

$$\begin{aligned}
 \Sigma\sigma_{d1.1} &= \gamma_{F1} \cdot \sigma_G + \gamma_{F2} \cdot \left(\max(\sigma_{puK}, \sigma_{puS}) + 0,7 \cdot \sigma_S + \frac{\sigma_W}{1,2} \right) & (16a) \\
 &= 1,35 \cdot 0,032 + 1,50 \cdot \left(0,010 + 0,7 \cdot 0,023 + \frac{0,107}{1,2} \right) = \underline{0,219 \text{ N/mm}^2}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Sigma\sigma_{d1.2} &= \gamma_{F1} \cdot \sigma_G + \gamma_{F2} \cdot (\sigma_{puK} + \sigma_S) & (16b) \\
 &= 1,35 \cdot 0,032 + 1,50 \cdot (0,010 + 0,023) = \underline{0,092 \text{ N/mm}^2}
 \end{aligned}$$

LF 2: Ohne Unterdruck

$$\begin{aligned}
 \Sigma\sigma_{d2.1} &= \gamma_{F1} \cdot \sigma_G + \gamma_{F2} \cdot \left(0,7 \cdot \sigma_S + \frac{\sigma_W}{1,2} \right) & (17a) \\
 &= 1,35 \cdot 0,032 + 1,50 \cdot \left(0,7 \cdot 0,023 + \frac{0,107}{1,2} \right) = \underline{0,202 \text{ N/mm}^2}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Sigma\sigma_{d2.2} &= \gamma_{F1} \cdot \sigma_G + \gamma_{F2} \cdot \sigma_S & (17b) \\
 &= 1,35 \cdot 0,032 + 1,50 \cdot 0,023 = \underline{0,078 \text{ N/mm}^2}
 \end{aligned}$$

6 Nachweise

6.1 Nachweis des Kegeldaches

6.1.1 Spannungsnachweis (nach innen gerichtete Lasten)

Hilfswerte

$$\begin{aligned} A &= -0,000\,103 \cdot \alpha_D^2 + 0,007\,825 \cdot \alpha_D - 1,777\,1 \\ &= -0,000\,103 \cdot 15^2 + 0,007\,825 \cdot 15 - 1,777\,1 = -1,682\,9 \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} B &= -0,000\,433 \cdot \alpha_D^2 + 0,008\,115 \cdot \alpha_D - 0,187\,0 \\ &= -0,000\,433 \cdot 15^2 + 0,008\,115 \cdot 15 - 0,187\,0 = -0,162\,7 \end{aligned} \quad (19)$$

$$Exp1 = A \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot s_D}{d}\right) + B = -1,682\,9 \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot 12}{2000}\right) - 0,162\,7 = 7,280\,5 \quad (20)$$

$$\phi D_1 = e^{Exp1} \cdot A_2 \cdot \gamma_I = e^{7,280\,5} \cdot 1,00 \cdot 1,20 = 1\,742 \quad (21)$$

$$\phi D_2 = 0,5 \cdot \frac{d}{s_D} \cdot \frac{A_2 \cdot \gamma_I}{\cos \kappa} = 0,5 \cdot \frac{2000}{12} \cdot \frac{1,00 \cdot 1,20}{\cos 75} = 386 \quad (22)$$

Die Berechnung der Beanspruchung in den folgenden Abschnitten erfolgt für die ...

...Schweißnaht: Nach DVS 2205-2, Abschnitt 4.1.6.1, Gleichungen (27) bis (29)

...Öffnung: Nach DVS 2205-2, Abschnitt 4.1.7, Gleichung (35)

a) Winterlastfall

Langzeitige Belastung

$$p_{DL,d} = \gamma_{F1} \cdot g_D + \gamma_{F2} \cdot p_u = 1,35 \cdot 0,000\,12 + 1,50 \cdot 0,000\,00 = 0,000\,16 \text{ N/mm}^2 \quad (23)$$

Beanspruchung im Bereich der Schweißnaht:

$$K_{L,d} = \frac{p_{DL,d} \cdot A_1 \cdot \phi D_1}{f_{sD}} = \frac{0,000\,16 \cdot 1,00 \cdot 1\,742}{0,60} = 0,46 \text{ N/mm}^2 \quad (24)$$

Beanspruchung im Bereich der Öffnung:

$$K_{L,d} = \frac{p_{DL,d} \cdot A_1 \cdot \phi D_2}{v_A} = \frac{0,000\,16 \cdot 1,00 \cdot 386}{0,248} = 0,25 \text{ N/mm}^2 \quad (25)$$

Der Bemessungswert der Zeitstandfestigkeit für die Temperatur $T_D = 20 \text{ °C}$ beträgt:

$$K_{L,d}^* = \frac{K_L^*}{\gamma_M} = \frac{10,15}{1,10} = 9,23 \text{ N/mm}^2 \quad (26)$$

Mittellange Belastung

$$p_{DM,d} = \gamma_{F2} \cdot p_S = 1,50 \cdot 0,000\,68 = 0,001\,02 \text{ N/mm}^2 \quad (27)$$

Beanspruchung im Bereich der Schweißnaht:

$$K_{M,d} = \frac{p_{DM,d} \cdot A_1 \cdot \phi D_1}{f_{sD}} = \frac{0,001\,02 \cdot 1,00 \cdot 1\,742}{0,60} = 2,96 \text{ N/mm}^2 \quad (28)$$

Beanspruchung im Bereich der Öffnung:

$$K_{M,d} = \frac{p_{DM,d} \cdot A_1 \cdot \phi D_2}{v_A} = \frac{0,001\,02 \cdot 1,00 \cdot 386}{0,248} = 1,59 \text{ N/mm}^2 \quad (29)$$

Der Bemessungswert der Zeitstandfestigkeit für die Temperatur 0 °C beträgt:

$$K_{M,d}^* = \frac{K_{M,d}^*}{\gamma_M} = \frac{13,60}{1,10} = 12,37 \text{ N/mm}^2 \quad (30)$$

Kurzzeitige Belastung

$$\begin{aligned} p_{DK1} &= p_S + p_{uK} = 0,000\,68 + 0,000\,30 = 0,000\,98 \text{ N/mm}^2 \\ p_{DK2} &= 0,7 \cdot p_S + p_{uS} = 0,7 \cdot 0,000\,68 + 0,000\,35 = 0,000\,83 \text{ N/mm}^2 \\ p_{DK} &= \max(p_{DK1}, p_{DK2}) = 0,000\,98 \text{ N/mm}^2 \end{aligned} \quad (31)$$

$$\Sigma p_{DK,d} = \gamma_{F1} \cdot g_D + \gamma_{F2} \cdot p_{DK} = 1,35 \cdot 0,000\,12 + 1,50 \cdot 0,000\,98 = 0,001\,63 \text{ N/mm}^2 \quad (32)$$

Beanspruchung im Bereich der Schweißnaht:

$$\Sigma K_{K,d} = \frac{\Sigma p_{DK,d} \cdot A_1 \cdot \phi D_1}{f_{zD}} = \frac{0,001\,63 \cdot 1,00 \cdot 1\,742}{0,80} = 3,54 \text{ N/mm}^2 \quad (33)$$

Beanspruchung im Bereich der Öffnung:

$$\Sigma K_{K,d} = \frac{\Sigma p_{DK,d} \cdot A_1 \cdot \phi D_2}{v_A} = \frac{0,001\,63 \cdot 1,00 \cdot 386}{0,248} = 2,54 \text{ N/mm}^2 \quad (34)$$

Der Bemessungswert der Zeitstandfestigkeit für die Temperatur 0 °C beträgt:

$$K_{K,d}^* = \frac{K_{K,d}^*}{\gamma_M} = \frac{17,58}{1,10} = 15,98 \text{ N/mm}^2 \quad (35)$$

Nachweise für das Kegeldach im Bereich der Schweißnaht:

Nachweis 1 entsprechend DVS 2205-2, Gleichung (13):

$$\eta_1 = \frac{K_{L,d}}{K_{L,d}^*} + \frac{K_{M,d}}{K_{M,d}^*} = \frac{0,46}{9,23} + \frac{2,96}{12,37} = 0,289 < 1,0 \quad \Rightarrow \text{Nachweis erbracht}$$

Nachweis 2 entsprechend DVS 2205-2, Gleichung (15):

$$\eta_2 = \frac{\Sigma K_{K,d}}{K_{K,d}^*} = \frac{3,54}{15,98} = 0,222 < 1,0 \quad \Rightarrow \text{Nachweis erbracht}$$

Nachweise für das Kegeldach im Bereich der Öffnung:

Nachweis 1 entsprechend DVS 2205-2, Gleichung (13):

$$\eta_1 = \frac{K_{L,d}}{K_{L,d}^*} + \frac{K_{M,d}}{K_{M,d}^*} = \frac{0,25}{9,23} + \frac{1,59}{12,37} = 0,155 < 1,0 \quad \Rightarrow \text{Nachweis erbracht}$$

Nachweis 2 entsprechend DVS 2205-2, Gleichung (15):

$$\eta_2 = \frac{\Sigma K_{K,d}}{K_{K,d}^*} = \frac{2,54}{15,98} = 0,159 < 1,0 \quad \Rightarrow \text{Nachweis erbracht}$$

b) Sommerlastfall

Langzeitige Belastung

$$p_{DL,d} = \gamma_{F1} \cdot g_D + \gamma_{F2} \cdot p_u = 1,35 \cdot 0,000\,12 + 1,50 \cdot 0,000\,00 = 0,000\,16 \text{ N/mm}^2 \quad (36)$$

Beanspruchung im Bereich der Schweißnaht:

$$K_{L,d} = \frac{p_{DL,d} \cdot A_1 \cdot \phi D_1}{f_{sD}} = \frac{0,000\,16 \cdot 1,00 \cdot 1\,742}{0,60} = 0,46 \text{ N/mm}^2 \quad (37)$$

Beanspruchung im Bereich der Öffnung:

$$K_{L,d} = \frac{p_{DL,d} \cdot A_1 \cdot \phi D_2}{v_A} = \frac{0,000\,16 \cdot 1,00 \cdot 386}{0,248} = 0,25 \text{ N/mm}^2 \quad (38)$$

Der Bemessungswert der Zeitstandfestigkeit für die Temperatur $T_{D^*} = 35,0 \text{ °C}$ beträgt:

$$K_{L,d}^* = \frac{K_L^*}{\gamma_M} = \frac{7,99}{1,10} = 7,26 \text{ N/mm}^2 \quad (39)$$

Mittellange Belastung Eine mittellange Belastung ist bei Außenaufstellung im Sommer nicht vorhanden.

Kurzzeitige Belastung

$$\begin{aligned} p_{uK} &= 0,000\,30 \text{ N/mm}^2 \\ p_{uS} &= 0,000\,35 \text{ N/mm}^2 \\ p_{DK} &= \max(p_{uK}, p_{uS}) = 0,000\,35 \text{ N/mm}^2 \end{aligned} \quad (40)$$

$$\Sigma p_{DK,d} = \gamma_{F1} \cdot g_D + \gamma_{F2} \cdot p_{DK} = 1,35 \cdot 0,000\,12 + 1,50 \cdot 0,000\,35 = 0,000\,68 \text{ N/mm}^2 \quad (41)$$

Beanspruchung im Bereich der Schweißnaht:

$$\Sigma K_{K,d} = \frac{\Sigma p_{DK,d} \cdot A_1 \cdot \phi D_1}{f_{zD}} = \frac{0,000\,68 \cdot 1,00 \cdot 1\,742}{0,80} = 1,49 \text{ N/mm}^2 \quad (42)$$

Beanspruchung im Bereich der Öffnung:

$$\Sigma K_{K,d} = \frac{\Sigma p_{DK,d} \cdot A_1 \cdot \phi D_2}{v_A} = \frac{0,000\,68 \cdot 1,00 \cdot 386}{0,248} = 1,07 \text{ N/mm}^2 \quad (43)$$

Der Bemessungswert der Zeitstandfestigkeit für die Temperatur 50 °C beträgt:

$$K_{K,d}^* = \frac{K_K^*}{\gamma_M} = \frac{9,34}{1,10} = 8,49 \text{ N/mm}^2 \quad (44)$$

Nachweise für das Kegeldach im Bereich der Schweißnaht:

Nachweis 1 entsprechend DVS 2205-2, Gleichung (13):

$$\eta_1 = \frac{K_{L,d}}{K_{L,d}^*} + \frac{K_{M,d}}{K_{M,d}^*} = \frac{0,46}{7,26} + \frac{0,00}{12,37} = 0,063 < 1,0 \quad \Rightarrow \text{Nachweis erbracht}$$

Nachweis 2 entsprechend DVS 2205-2, Gleichung (15):

$$\eta_2 = \frac{\Sigma K_{K,d}}{K_{K,d}^*} = \frac{1,49}{8,49} = 0,176 < 1,0 \quad \Rightarrow \text{Nachweis erbracht}$$

Nachweise für das Kegeldach im Bereich der Öffnung:

Nachweis 1 entsprechend DVS 2205-2, Gleichung (13):

$$\eta_1 = \frac{K_{L,d}}{K_{L,d}^*} + \frac{K_{M,d}}{K_{M,d}^*} = \frac{0,25}{7,26} + \frac{0,00}{12,37} = 0,034 < 1,0 \quad \Rightarrow \text{Nachweis erbracht}$$

Nachweis 2 entsprechend DVS 2205-2, Gleichung (15):

$$\eta_2 = \frac{\Sigma K_{K,d}}{K_{K,d}^*} = \frac{1,07}{8,49} = 0,126 < 1,0 \quad \Rightarrow \text{Nachweis erbracht}$$

6.1.2 Spannungsnachweis (nach außen gerichtete Lasten)

Hilfswerte

$$\begin{aligned} C &= 1,30 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha_D^2 - 0,000\,97 \cdot \alpha_D - 1,405\,4 \\ &= 1,30 \cdot 10^{-5} \cdot 15^2 - 0,000\,97 \cdot 15 - 1,405\,4 = -1,417\,0 \end{aligned} \quad (45)$$

$$\begin{aligned} D &= 0,000\,265 \cdot \alpha_D^2 - 0,045\,74 \cdot \alpha_D + 1,562\,2 \\ &= 0,000\,265 \cdot 15^2 - 0,045\,74 \cdot 15 + 1,562\,2 = 0,935\,7 \end{aligned} \quad (46)$$

$$Exp2 = C \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot s_D}{d}\right) + D = -1,4170 \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot 12}{2000}\right) + 0,9357 = 7,2030 \quad (47)$$

$$\phi D_2 = 386 \quad (\text{siehe Abschnitt 6.1.1}) \quad (48)$$

$$\phi D_3 = e^{Exp2} \cdot A_2 \cdot \gamma_I = e^{7,2030} \cdot 1,00 \cdot 1,20 = 1612 \quad (49)$$

Der Spannungsnachweis bei Außenaufstellung ist für nach außen gerichtete Lasten nur für den Sommerlastfall zu führen.

Langzeitige Belastung

$$p_{DL,d} = \gamma_{F2} \cdot p_{\ddot{u}} - \gamma_{F3} \cdot g_D = 1,50 \cdot 0,00000 - 0,90 \cdot 0,00012 < 0,0 \text{ N/mm}^2 \quad (50)$$

Beanspruchung im Bereich des Daches:

$$K_{L,d} = p_{DL,d} \cdot A_1 \cdot \phi D_3 = 0,00000 \cdot 1,00 \cdot 1612 = 0,00 \text{ N/mm}^2 \quad (51)$$

Beanspruchung im Bereich der Öffnung:

$$K_{L,d} = \frac{p_{DL,d} \cdot A_1 \cdot \phi D_2}{v_A} = \frac{0,00000 \cdot 1,00 \cdot 386}{0,248} = 0,00 \text{ N/mm}^2 \quad (52)$$

Mittellange Belastung Eine mittellange Belastung ist bei Außenaufstellung im Sommer nicht vorhanden.

Kurzzeitige Belastung

$$\Sigma p_{DK,d} = \gamma_{F2} \cdot p_{\ddot{u}k} - \gamma_{F3} \cdot g_D = 1,50 \cdot 0,00050 - 0,90 \cdot 0,00012 = 0,00064 \text{ N/mm}^2 \quad (53)$$

Beanspruchung im Bereich des Daches:

$$\Sigma K_{K,d} = \Sigma p_{DK,d} \cdot A_1 \cdot \phi D_3 = 0,00064 \cdot 1,00 \cdot 1612 = 1,04 \text{ N/mm}^2 \quad (54)$$

Beanspruchung im Bereich der Öffnung:

$$\Sigma K_{K,d} = \frac{\Sigma p_{DK,d} \cdot A_1 \cdot \phi D_2}{v_A} = \frac{0,00064 \cdot 1,00 \cdot 386}{0,248} = 1,01 \text{ N/mm}^2 \quad (55)$$

Der Bemessungswert der Zeitstandfestigkeit für die Temperatur 50 °C beträgt:

$$K_{K,d}^* = \frac{K_K^*}{\gamma_M} = \frac{9,34}{1,10} = 8,49 \text{ N/mm}^2 \quad (56)$$

Nachweis für das Kegeldach:

Nachweis 1 entsprechend DVS 2205-2, Gleichung (13):

$$\eta_1 = \frac{K_{L,d}}{K_{L,d}^*} + \frac{K_{M,d}}{K_{M,d}^*} = \frac{0,00}{7,26} + \frac{0,00}{12,37} = 0,000 < 1,0 \quad \Rightarrow \text{Nachweis erbracht}$$

Nachweis 2 entsprechend DVS 2205-2, Gleichung (15):

$$\eta_2 = \frac{\Sigma K_{K,d}}{K_{K,d}^*} = \frac{1,04}{8,49} = 0,122 < 1,0 \quad \Rightarrow \text{Nachweis erbracht}$$

Nachweise für das Kegeldach im Bereich der Öffnung:

Nachweis 1 entsprechend DVS 2205-2, Gleichung (13):

$$\eta_1 = \frac{K_{L,d}}{K_{L,d}^*} + \frac{K_{M,d}}{K_{M,d}^*} = \frac{0,00}{7,26} + \frac{0,00}{12,37} = 0,000 < 1,0 \quad \Rightarrow \text{Nachweis erbracht}$$

Nachweis 2 entsprechend DVS 2205-2, Gleichung (15):

$$\eta_2 = \frac{\Sigma K_{K,d}}{K_{K,d}^*} = \frac{1,01}{8,49} = 0,118 < 1,0 \quad \Rightarrow \text{Nachweis erbracht}$$

6.1.3 Stabilitätsnachweis des Kegeldaches

Hilfswerte

$$\phi D_3 = \frac{d}{4 \cdot \cos \kappa \cdot s_D} = \frac{2000}{4 \cdot \cos 75 \cdot 12} = 161,0 \quad (57)$$

$$\phi D_4 = \frac{2,68}{\gamma_M} \cdot \sin \kappa \cdot \sqrt{\cos \kappa} \cdot \left(\frac{s_D}{d} \right)^{1,5}$$

$$\phi D_4 = \frac{2,68}{1,10} \cdot \sin 75 \cdot \sqrt{\cos 75} \cdot \left(\frac{12}{2000} \right)^{1,5} = 0,000556 \quad (58)$$

a) Winterlastfall

Temperatur: 0,0 C

Kurzzeit E-Modul: $E_K = 1100 \text{ N/mm}^2$

Belastung: $\Sigma p_d = 0,00163 \text{ N/mm}^2$

vorh. Spannung: $\Sigma \sigma_d = \Sigma p_d \cdot \phi D_3 = 0,00163 \cdot 161,0 = 0,2621 \text{ N/mm}^2$

kritische Spannung: $\sigma_{k,d} = E_K \cdot \phi D_4 = 1100 \cdot 0,000556 = 0,6121 \text{ N/mm}^2$

Nachweis entsprechend DVS 2205-2, Gleichung (56):

$$\eta = \frac{A_{2I} \cdot \gamma_I \cdot \Sigma \sigma_d}{\sigma_{k,d}} = \frac{1,00 \cdot 1,20 \cdot 0,2621}{0,6121} = 0,514 < 1,0 \quad \Rightarrow \text{Nachweis erbracht}$$

b) Sommerlastfall

Temperatur: 50,0 C

Kurzzeit E-Modul: $E_K = 270 \text{ N/mm}^2$

Belastung: $\Sigma p_d = 0,00068 \text{ N/mm}^2$

vorh. Spannung: $\Sigma \sigma_d = \Sigma p_d \cdot \phi D_3 = 0,00068 \cdot 161,0 = 0,1102 \text{ N/mm}^2$

kritische Spannung: $\sigma_{k,d} = E_K \cdot \phi D_4 = 270 \cdot 0,000556 = 0,1502 \text{ N/mm}^2$

Nachweis entsprechend DVS 2205-2, Gleichung (56):

$$\eta = \frac{A_{2I} \cdot \gamma_I \cdot \Sigma \sigma_d}{\sigma_{k,d}} = \frac{1,00 \cdot 1,20 \cdot 0,1102}{0,1502} = 0,880 < 1,0 \quad \Rightarrow \text{Nachweis erbracht}$$

6.2 Nachweis des Zylindermantels

6.2.1 Spannungsnachweis in Umfangsrichtung

Der Spannungsnachweis des Zylinders in Umfangsrichtung wird entsprechend DVS 2205-2, Abschnitt 4.1.3.1, geführt.

a) Randfaserdehnung

Die aus dem Biegen der Tafeln entstehenden Spannungen im Zylindermantel können vernachlässigt werden, wenn die aus dem Biegen entstehende Randfaserdehnung den Wert

$$\varepsilon_{\text{Grenz}} = 1,000 \% \quad (\text{siehe DVS 2205-2, Tabelle 1})$$

nicht überschreitet. Bei Überschreitung dieses Wertes werden die Tafeln warm verformt.

Aus dem Biegen der Tafeln entsteht folgende Dehnung an der äußeren Tafeloberfläche:

$$\varepsilon_{\text{vorh}} = \frac{s_Z}{d} \cdot 100 = \frac{10}{2000} \cdot 100 = 0,750 \% < \varepsilon_{\text{Grenz}} \Rightarrow \text{Warm oder kalt verformen}$$

Beim folgenden Spannungsnachweis können die aus dem Biegen der Tafeln entstehenden Spannungen also vernachlässigt werden.

b) Spannungsnachweis

Die wirksame Wandtemperatur beträgt $T_Z = T_M = 20,0 \text{ C}$

Hilfswert

$$\phi Z_1 = 0,5 \cdot d \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot \gamma_I = 0,5 \cdot 2000 \cdot 1,00 \cdot 1,00 \cdot 1,20 = 1200 \text{ mm} \quad (59)$$

b1) Nachweis an der Unterkante des Zylinders

Der Überdruck an der Unterkante des Zylinders aus dem Füllmedium beträgt:

$$p_{\text{stat}} = \rho_F \cdot g \cdot h_F \cdot 10^{-6} = 1,090 \cdot 9,81 \cdot 2935 \cdot 10^{-6} = 0,03137 \text{ N/mm}^2 \quad (60)$$

Die vorhandene Umfangsspannung an der Unterkante des Zylinders beträgt:

$$\begin{aligned} \text{langzeitig: } K_{L,d} &= \frac{\gamma_{F1} \cdot p_{\text{stat}} + \gamma_{F2} \cdot p_{\text{ü}}}{s_Z \cdot f_s} \cdot \phi Z_1 \\ &= \frac{1,35 \cdot 0,03137 + 1,50 \cdot 0,00000}{15,0 \cdot 0,8} \cdot 1200 = 4,24 \text{ N/mm}^2 \end{aligned} \quad (61)$$

$$\begin{aligned} \text{kurzzeitig: } \Sigma K_{K,d} &= \frac{\gamma_{F1} \cdot p_{\text{stat}} + \gamma_{F2} \cdot p_{\text{üK}}}{s_Z \cdot f_z} \cdot \phi Z_1 \\ &= \frac{1,35 \cdot 0,03137 + 1,50 \cdot 0,00050}{15,0 \cdot 0,9} \cdot 1200 = 3,83 \text{ N/mm}^2 \end{aligned} \quad (62)$$

Beanspruchungen aus Einwirkungen mittlerer Einwirkdauer treten bei diesem Nachweis nicht auf.

Der Bemessungswert der Zeitstandfestigkeit für die Temperatur 20,0 °C beträgt:

$$\text{langzeitig: } K_{L,d}^* = \frac{K_L^*}{\gamma_M} = \frac{10,15}{1,10} = 9,23 \text{ N/mm}^2 \quad (63)$$

$$\text{kurzzeitig: } K_{K,d}^* = \frac{K_L^*}{\gamma_M} = \frac{14,77}{1,10} = 13,42 \text{ N/mm}^2 \quad (64)$$

Nachweis 1 entsprechend DVS 2205-2, Gleichung (13):

$$\eta_1 = \frac{K_{L,d}}{K_{L,d}^*} + \frac{K_{M,d}}{K_{M,d}^*} = \frac{4,24}{9,23} + \frac{0,00}{10,39} = 0,459 < 1,0 \quad \Rightarrow \text{Nachweis erbracht}$$

Nachweis 2 entsprechend DVS 2205-2, Gleichung (15):

$$\eta_2 = \frac{\Sigma K_{K,d}}{K_{K,d}^*} = \frac{3,83}{13,42} = 0,285 < 1,0 \quad \Rightarrow \text{Nachweis erbracht}$$

b2) Nachweis an der Unterkante des Stutzens N1

Der Überdruck an der Unterkante des Stutzens aus dem Füllmedium beträgt:

$$p_{\text{stat}} = \rho_F \cdot g \cdot h_F \cdot 10^{-6} = 1,090 \cdot 9,81 \cdot 2\,585 \cdot 10^{-6} = 0,027\,63 \text{ N/mm}^2 \quad (65)$$

Die vorhandene Umfangsspannung im Zylinder an der Unterkante eines Stutzens beträgt:

$$\begin{aligned} \text{langzeitig: } K_{L,d} &= \frac{\gamma_{F1} \cdot p_{\text{stat}} + \gamma_{F2} \cdot p_{\ddot{u}}}{s_Z \cdot v_{A,N1}} \cdot \phi Z_1 \\ &= \frac{1,35 \cdot 0,027\,63 + 1,50 \cdot 0,000\,00}{15,0 \cdot 0,403} \cdot 1\,200 = 7,41 \text{ N/mm}^2 \end{aligned} \quad (66)$$

$$\begin{aligned} \text{kurzzeitig: } \Sigma K_{K,d} &= \frac{\gamma_{F1} \cdot p_{\text{stat}} + \gamma_{F2} \cdot p_{\ddot{u}K}}{s_Z \cdot v_{A,N1}} \cdot \phi Z_1 \\ &= \frac{1,35 \cdot 0,027\,63 + 1,50 \cdot 0,000\,50}{15,0 \cdot 0,403} \cdot 1\,200 = 7,56 \text{ N/mm}^2 \end{aligned} \quad (67)$$

Beanspruchungen aus Einwirkungen mittlerer Einwirkdauer treten bei diesem Nachweis nicht auf.

Nachweis 1 entsprechend DVS 2205-2, Gleichung (13):

$$\eta_1 = \frac{K_{L,d}}{K_{L,d}^*} + \frac{K_{M,d}}{K_{M,d}^*} = \frac{7,41}{9,23} + \frac{0,00}{10,39} = 0,803 < 1,0 \quad \Rightarrow \text{Nachweis erbracht}$$

Nachweis 2 entsprechend DVS 2205-2, Gleichung (15):

$$\eta_2 = \frac{\Sigma K_{K,d}}{K_{K,d}^*} = \frac{7,56}{13,42} = 0,563 < 1,0 \quad \Rightarrow \text{Nachweis erbracht}$$

6.2.2 Spannungsnachweis in Längsrichtung

Der Spannungsnachweis des Zylinders in Längsrichtung wird entsprechend DVS 2205-2, Abschnitt 4.1.3.2, nur für den Übergang Zylinder/Boden geführt.

Hilfswerte

$$\phi Z_2 = \frac{A_1 \cdot A_2 \cdot \gamma_I}{s_{ZF}} = \frac{1,00 \cdot 1,00 \cdot 1,20}{15,0} = 0,080 \text{ mm}^{-1} \quad (68)$$

$$\phi Z_3 = \frac{\gamma_{F3} \cdot (G_D + G_Z)}{\pi \cdot d} = \frac{0,90 \cdot (367 + 2\,682)}{\pi \cdot 2\,000} = 0,437 \text{ N/mm} \quad (69)$$

$$\phi Z_4 = \frac{4 \cdot \gamma_{F2} \cdot M_W \cdot 10^3}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 1,50 \cdot 5\,061 \cdot 10^3}{\pi \cdot 2\,000^2} = 2,417 \text{ N/mm} \quad (70)$$

$$\begin{aligned} \phi Z_5 &= \gamma_{F1} \cdot p_{stat} + \gamma_{F2} \cdot p_{\ddot{u}} \\ &= 1,35 \cdot 0,031\,37 + 1,50 \cdot 0,000\,00 = 0,042\,35 \text{ N/mm}^2 \end{aligned} \quad (71)$$

$$\begin{aligned} \phi Z_6 &= \gamma_{F1} \cdot p_{stat} + \gamma_{F2} \cdot p_{\ddot{u}k} \\ &= 1,35 \cdot 0,031\,37 + 1,50 \cdot 0,000\,50 = 0,043\,10 \text{ N/mm}^2 \end{aligned} \quad (72)$$

Der Faktor C beträgt nach DVS 2205-2, Tabelle 2:

$$C = 1,20$$

Die vorhandenen langzeitigen Zugspannungen an der Unterkante des Zylinders betragen:

$$\begin{aligned} K_{L,d} &= \left(C \cdot \phi Z_5 \cdot \frac{d}{2} + \gamma_{F2} \cdot p_{\ddot{u}} \cdot \frac{d}{4} - \phi Z_3 \right) \cdot \phi Z_2 \\ &= \left(1,20 \cdot 0,042\,35 \cdot \frac{2\,000}{2} + 1,50 \cdot 0,000\,00 \cdot \frac{2\,000}{4} - 0,437 \right) \cdot 0,080 \\ &= 4,03 \text{ N/mm}^2 \end{aligned} \quad (73)$$

Beanspruchungen aus Einwirkungen mittlerer Einwirkdauer treten bei diesem Nachweis nicht auf.

$$K_{M,d} = 0,00 \text{ N/mm}^2 \quad (74)$$

Die vorhandenen kurzzeitigen Zugspannungen an der Unterkante des Zylinders betragen:

$$\begin{aligned} \Sigma K_{K,d} &= \left(C \cdot \phi Z_6 \cdot \frac{d}{2} + \gamma_{F2} \cdot p_{\ddot{u}k} \cdot \frac{d}{4} + \phi Z_4 - \phi Z_3 \right) \cdot \phi Z_2 \\ &= \left(1,20 \cdot 0,043\,10 \cdot \frac{2\,000}{2} + 1,50 \cdot 0,000\,50 \cdot \frac{2\,000}{4} + 2,417 - 0,437 \right) \cdot 0,080 \\ &= 4,33 \text{ N/mm}^2 \end{aligned} \quad (75)$$

Nachweis 1 entsprechend DVS 2205-2, Gleichung (13):

$$\eta_1 = \frac{K_{L,d}}{K_{L,d}^*} + \frac{K_{M,d}}{K_{M,d}^*} = \frac{4,03}{9,23} + \frac{0,00}{10,39} = 0,437 < 1,0 \quad \Rightarrow \text{Nachweis erbracht}$$

Nachweis 2 entsprechend DVS 2205-2, Gleichung (15):

$$\eta_2 = \frac{\Sigma K_{K,d}}{K_{K,d}^*} = \frac{4,33}{13,42} = 0,322 < 1,0 \quad \Rightarrow \text{Nachweis erbracht}$$

Für die Berechnung der Mindest-Bodendicke (siehe Abschnitt 6.3.1) wird die statisch erforderliche Wanddicke des Zylinders am Übergang zum Boden benötigt.

Durch Umformung von Gleichung (22) der DVS-Richtlinie erhält man:

$$s_{ZF}^* = \frac{K_{L,d}}{K_{L,d}^*} \cdot s_{ZF} = \frac{4,03}{9,23} \cdot 15,0 = 6,6 \text{ mm} \quad (76)$$

6.2.3 Manteldruckstabilität

Der Stabilitätsnachweis in Umfangsrichtung für den Zylinder mit konstanter Wanddicke wird nach DVS 2205-2, Absatz 4.2.2.2 durchgeführt.

Der maßgebliche Unterdruck ist aus den folgenden Unterdrücken zu ermitteln:

$$\begin{aligned} p_u &= 0,000\ 00 \text{ N/mm}^2 \\ p_{uK} &= 0,000\ 30 \text{ N/mm}^2 \\ p_{uS} + p_{eu} &= 0,000\ 35 + 0,000\ 31 = 0,000\ 66 \text{ N/mm}^2 \\ \Sigma p_d &= \gamma_{F2} \cdot \max(p_u, p_{uK}, p_{uS} + p_{eu}) \\ &= 1,50 \cdot 0,000\ 66 = 0,001\ 00 \text{ N/mm}^2 \end{aligned} \quad (77)$$

Der kritische Manteldruck des Zylinders beträgt:

$$\begin{aligned} p_{kM,d} &= 0,67 \cdot C^* \cdot \frac{E_K^{20^\circ C} \cdot r}{\gamma_M \cdot h_Z} \cdot \left(\frac{s_Z}{r} \right)^{2,5} \\ &= 0,67 \cdot 1,0 \cdot \frac{800 \cdot 1\ 000}{1,10 \cdot 3\ 000} \cdot \left(\frac{15}{1\ 000} \right)^{2,5} = 0,004\ 48 \text{ N/mm}^2 \end{aligned} \quad (78)$$

$C^* = 1,0$ gilt für den Behälter mit Dach

Nachweis entsprechend DVS 2205-2, Gleichung (50):

$$\eta_M = \frac{A_{2I} \cdot \gamma_I \cdot \Sigma p_d}{p_{kM,d}} = \frac{1,00 \cdot 1,20 \cdot 0,001\ 00}{0,004\ 48} = 0,267 < 1,0 \quad \Rightarrow \text{Nachweis erbracht}$$

6.2.4 Axialstabilität des Zylinders

Der Stabilitätsnachweis in Axialrichtung wird entsprechend DVS 2205-2, Abschnitt 4.2.2.1, an der Unterkante des Zylinders durchgeführt.

Hilfsgröße nach DVS 2205-2, Gleichung (48):

$$\alpha = \frac{0,7}{\sqrt{\frac{E_K^{20^\circ C}}{E_L^{20^\circ C}} \cdot \left(1 + \frac{r}{100 \cdot s_Z}\right)}} = \frac{0,7}{\sqrt{\frac{800}{235} \cdot \left(1 + \frac{1000}{100 \cdot 15,0}\right)}} = 0,294 \quad (79)$$

Die Beulspannung wird nach DVS 2205-2 Gleichung (47) berechnet

$$\sigma_{k,d} = \alpha \cdot 0,62 \cdot \frac{E_K^{20^\circ C} \cdot s_Z}{\gamma_M \cdot r} = 0,294 \cdot 0,62 \cdot \frac{800 \cdot 15,0}{1,10 \cdot 1000} = 1,988 \text{ N/mm}^2 \quad (80)$$

Als oberer Grenzwert für die Beulspannung wird festgelegt: $\sigma_k = K_K^* = 14,77 \text{ N/mm}^2$

Nachweis entsprechend DVS 2205-2, Gleichung (49):

$$\eta_A = \frac{A_{2I} \cdot \gamma_I \cdot \Sigma \sigma_d}{\sigma_{k,d}} = \frac{1,00 \cdot 1,20 \cdot 0,219}{1,988} = 0,132 < 1,0 \Rightarrow \text{Nachweis erbracht}$$

mit $\Sigma \sigma_d$ aus Abschnitt 5.2, Lastfall 1 (Größtwert aus LF 1.1 und LF 1.2)

6.2.5 Interaktion Manteldruckstabilität/Axialstabilität

Für den Interaktionsnachweis wird die Ausnutzung ohne Berücksichtigung der Längsspannungen infolge Unterdruck benötigt (also ohne Berücksichtigung von p_u , p_{uK} , p_{uS} und p_{eu}).

$$\eta_A = \frac{A_{2I} \cdot \gamma_I \cdot \Sigma \sigma_d}{\sigma_{k,d}} = \frac{1,00 \cdot 1,20 \cdot 0,202}{1,988} = 0,122 \quad (81)$$

mit $\Sigma \sigma_d$ aus Abschnitt 5.2, Lastfall 2 (Größtwert aus LF 2.1 und LF 2.2)

Nachweis entsprechend DVS 2205-2, Gleichung (53):

$$\eta = \eta_A^{1,25} + \eta_M^{1,25} = 0,122^{1,25} + 0,267^{1,25} = 0,264 < 1,0 \Rightarrow \text{Nachweis erbracht}$$

6.3 Nachweis des Bodens

6.3.1 Nachweis für den Lastfall Füllung

Boden und Zylinder werden mit Kehlnähten verbunden. Der Nachweis des Bodens für diesen Lastfall kann nach DVS 2205-2, Abschnitt 4.1.4.1 geführt werden.

Das Verhältnis zwischen Zylinderdurchmesser und statisch erforderlicher Zylinderwanddicke beträgt:

$$\frac{d}{s_{ZF}^*} = \frac{2000}{6,6} = 305 \quad (s_{ZF}^* \text{ siehe Abschnitt 6.2.2}) \quad (82)$$

Aus dem Diagramm (DVS 2205-2, Bild 8) wird abgelesen:

$$\delta_B = 0,80$$

Nachweis entsprechend DVS 2205-2, Abschnitt 4.1.4.1: (mit vorh $s_B = 6,0$ mm)

$$\begin{aligned} \min s_B &= \delta_B \cdot s_{ZF}^* = 0,80 \cdot 6,6 = 5,2 \text{ mm} \leq \text{vorh } s_B \Rightarrow \text{Nachweis erbracht} \\ \max s_B &= s_{ZF} = 15,0 \text{ mm} \geq \text{vorh } s_B \Rightarrow \text{Nachweis erbracht} \end{aligned}$$

6.3.2 Nachweis unverankerter Behälter mit Überdruck

Dieser Nachweis ist nicht erforderlich, da der Behälter verankert wird.

6.3.3 Nachweis für inneren Unterdruck

Der für diesen Nachweis wirksame Unterdruck beträgt:

$$\begin{aligned} p_u &= 0,000\,00 \text{ N/mm}^2 \\ p_{uK} &= 0,000\,30 \text{ N/mm}^2 \\ p_{\text{wirk}} &= \max(p_u, p_{uK}) = 0,000\,30 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Die Eigenlast des Bodens beträgt:

$$g_B = s_B \cdot \rho \cdot g \cdot 10^{-6} = 6,0 \cdot 0,960 \cdot 9,81 \cdot 10^{-6} = 5,648\,63 \cdot 10^{-5} \text{ N/mm}^2 \quad (83)$$

Die im Behälter zu verbleibende Restfüllhöhe kann folgendermaßen berechnet werden:

$$\begin{aligned} h_{RF} &= \frac{\gamma_{F2} \cdot p_{\text{wirk}} - \gamma_{F3} \cdot g_B}{\gamma_{F3} \cdot \rho \cdot g \cdot 10^{-6}} \\ &= \frac{1,50 \cdot 0,000\,30 - 0,90 \cdot 5,648\,63 \cdot 10^{-5}}{0,90 \cdot 1,090 \cdot 9,81 \cdot 10^{-6}} = 41 \text{ mm} \\ &\Rightarrow \text{Nachweis erbracht} \end{aligned} \quad (84)$$

Der Nachweis gilt als erbracht, wenn der vorgenannte Wert für h_{RF} nicht unterschritten wird.

6.4 Nachweis der Verankerung

6.4.1 Allgemeines

Es werden 4 Ankerpratzen angeordnet, die gleichmäßig über den Umfang verteilt werden.

$$z = 4$$

Als Pratzbreite wird gewählt:

$$b_{Pr} = 90 \text{ mm}$$

Die in den 3 folgenden Abschnitten aufgeführten Lastfälle sind zu untersuchen.

6.4.2 Lastfall 1: Kurzzeitiger Überdruck

Aufzunehmende Pratzkraft:

$$\begin{aligned}
 P_{1,d} &= \left(\frac{\gamma_{F2} \cdot p_{\ddot{u}K} \cdot \pi \cdot d^2}{4} - \gamma_{F3} \cdot (G_D + G_Z) \right) \cdot \frac{1}{z} \\
 &= \left(\frac{1,50 \cdot 0,00050 \cdot \pi \cdot 2000^2}{4} - 0,90 \cdot (367 + 2682) \right) \cdot \frac{1}{4} = -97 \text{ N}
 \end{aligned} \tag{85}$$

Die Pratzkraft ist negativ. Für diesen Lastfall ist daher eine Verankerung nicht erforderlich.

6.4.3 Lastfall 2: Langzeitiger Überdruck

Ein langzeitiger Überdruck im Behälter ist nicht vorhanden. Ein Nachweis für diesen Lastfall entfällt daher.

6.4.4 Lastfall 3: Windlast

Aufzunehmende Pratzkraft:

$$\begin{aligned}
 P_{3,d} &= \left(\frac{\gamma_{F2} \cdot 4 \cdot M_W}{d} \cdot 10^3 - \gamma_{F3} \cdot (G_D + G_Z) \right) \cdot \frac{1}{z} \\
 &= \left(\frac{1,50 \cdot 4 \cdot 5061}{2000} \cdot 10^3 - 0,90 \cdot (367 + 2682) \right) \cdot \frac{1}{4} = 3110 \text{ N}
 \end{aligned} \tag{86}$$

Aufnehmbare Pratzkraft:

$$\begin{aligned}
 P_{3,R} &= (b_{Pr} + s_B) \cdot s_B \cdot \frac{K_{K,d}^*}{2 \cdot A_1 \cdot \gamma_I} \\
 &= (90 + 6,0) \cdot 6,0 \cdot \frac{13,42}{2 \cdot 1,00 \cdot 1,20} = 3222 \text{ N}
 \end{aligned} \tag{87}$$

Nachweis entsprechend DVS 2205-2, Gleichung (36), für Medientemperatur $T_M = 20,0^\circ\text{C}$

$$\eta_3 = \frac{P_{3,d}}{P_{3,R}} = \frac{3110}{3222} = 0,965 < 1,0 \Rightarrow \text{Nachweis erbracht}$$

6.4.5 Ankerkraft

Aus der maximalen Pratzkraft der Lastfälle 1 bis 3 ($\max P = 3,11 \text{ kN}$) ist unter Berücksichtigung der Hebelarme die erforderliche Ankerkraft (z.B. für die Dübel) zu berechnen.

6.5 Nachweis der Tragösen

An dem Behälter werden 2 Tragösen entsprechend DVS 2205-2, Bild 11, befestigt. Zum Anheben des Behälters wird ein Parallelgehänge eingesetzt.

Die 1,5-fache Belastung (Stoßfaktor) an jeder Tragöse beträgt

$$F = \frac{1,5 \cdot \gamma_{F1} \cdot (G_E - G_A)}{2} = \frac{1,5 \cdot 1,35 \cdot (3\,227 - 0)}{2} = 3\,267 \text{ N} \quad (88)$$

Es ist nachzuweisen, dass diese Belastung kurzzeitig bei 20 °C getragen werden kann.

Die Dicke der Schweißnaht Tragöse/Zylinder beträgt:

$$a = 0,7 \cdot s_Z = 0,7 \cdot 15,0 = 10,5 \text{ mm} \quad (\text{umlaufend})$$

Schäkeldurchmesser:

$$d_{Sch} = 10,0 \text{ mm}$$

Lochdurchmesser in den Tragösen (zur Aufnahme des Schäkels):

$$d_L = 11,0 \text{ mm} (\leq 1,1 \cdot d_{Sch} = 11,0 \text{ mm} \text{ entsprechend DVS 2205-2, Gl. (40)})$$

Dicke der Tragösen (erf s_{Oe} = statisch erforderliche Dicke):

$$erf s_{Oe} = \frac{F \cdot A_1 \cdot \gamma_I}{2 \cdot d_{Sch} \cdot K_{K,d}^*} = \frac{3\,267 \cdot 1,00 \cdot 1,20}{2 \cdot 10,0 \cdot 13,42} = 14,6 \text{ mm} \quad (89)$$

$$\min s_{Oe} = s_Z = 15,0 \text{ mm}$$

$$\max s_{Oe} = 3 \cdot s_Z = 45,0 \text{ mm}$$

Für eine gewählte Dicke $s_{Oe} = 15,0 \text{ mm}$ gilt \Rightarrow **Nachweis erbracht**

Breite der Tragösen:

Schubspannung in der Quernaht beim Anheben des liegenden Behälters

$$b_{Oe,1} = \frac{F \cdot A_1 \cdot \gamma_I}{a \cdot f_Z \cdot K_{K,d}^*} = \frac{3\,267 \cdot 1,00 \cdot 1,20}{10,5 \cdot 0,8 \cdot 13,42} = 34,8 \text{ mm} \quad (90)$$

Augenstab

$$b_{Oe,2} = \frac{F \cdot A_1 \cdot \gamma_I}{s_{Oe} \cdot K_{K,d}^*} + \frac{7}{3} \cdot d_L = \frac{3\,267 \cdot 1,00 \cdot 1,20}{15,0 \cdot 13,42} + \frac{7}{3} \cdot 11,0 = 45,1 \text{ mm} \quad (91)$$

Für eine gewählte Breite $b_{Oe} = 50,0 \text{ mm}$ gilt \Rightarrow **Nachweis erbracht**

Höhe der Tragösen:

Die Mindesthöhe der Tragöse ist abhängig von der Tragösenform und beträgt:

$$h_{Oe} = 2,5 \cdot b_{Oe} = 2,5 \cdot 50,0 = 125,0 \text{ mm} \text{ für Tragöse mit unterer Ausrundung}$$

$$h_{Oe} = 2,0 \cdot b_{Oe} = 2,0 \cdot 50,0 = 100,0 \text{ mm für Tragöse mit eckigem Abschluss}$$

7 Zusammenfassung

Mit dieser statischen Berechnung werden die in der Richtlinie DVS 2205-2 beschriebenen Nachweise erbracht.