

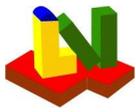


Inhaltsverzeichnis

No	Inhalt	Seiten
1	Gewölbte Böden unter innerem und äußerem Überdruck nach AD 2000 B3 (Mai 2011)	2
2	Gewölbte Böden unter innerem und äußerem Überdruck nach AD 2000 B3 (Mai 2011)	4
3	Gewölbte Böden und Kegelschalen unter innerem Überdruck ASME VIII UG-32 u. APPENDIX-1 BPVC 2015 Edition	6
4	Gewölbte Böden unter äußerem Überdruck ASME BPVC VIII UG-33 und App. 1, 2015 Edition	8
5	Schalen unter Innendruck DIN EN 13445-3/7:2016-12 + DIN EN 14025:2016-12	9
6	Ausschnitte in Zylindern, Kegeln und Kugeln nach AD 2000 B9 (2010-02) berichtigte Fassung 09.2016	12

Darstellung

Eingabewerte: 1.234 oder 1.234
Berechnete Werte: **1.234** oder **1.234**
Kritische Werte: **1.234** oder **1.234**
Schätzwerte: **1.234** oder **1.234**



Beispielausdruck Festigkeitsberechnung

2017

Gewölbte Böden unter innerem und äußerem Überdruck nach AD 2000 B3 (Mai 2011)

Klöpperboden unter innerem Überdruck

Grunddaten

Außendurchmesser Boden	D_a	1200 mm
Berechnungsdruck	p	12 bar
Probedruck	p'	15.6 bar
Maximaler Durchmesser außerhalb $0.6 \cdot D_a$ *)	d_i	0 mm

*) Für $d_i = 0$ liegen alle Ausschnitte vollständig innerhalb $0.6 \cdot D_a$ und können als Kugelausschnitte nach AD-B9 berechnet werden.

Werkstoff

Berechnungstemperatur	T	200 °C
Werkstoff		1.4571
Festigkeitskennwert	Betrieb	K 196 N/mm ²
Festigkeitskennwert	Prüfung	K' 250 N/mm ²
E-Modul bei Berechnungstemperatur		E 186000 N/mm ²
Sicherheitsbeiwert	Betrieb	S 1.5
Sicherheitsbeiwert	Prüfung	S' 1.05
Zuschlag für Wanddickenunterschreitung		c_1 0.5 mm
Korrosions- / Abnutzungszuschlag		c_2 0 mm
Schweißfaktor	v	1

Geometrie

Ausgeführte Wanddicke	s_e	10 mm
Ausgeführte Wanddicke Kalotte	s_K	10 mm
Kleinstmögliche ausgeführte Wanddicke Krempe *)	Betrieb	8.872 mm

*) für ausgeführte = erforderliche Wanddicke

Berechnungsbeiwert	β	2.941
Abklinglänge	x	100 mm
Bordhöhe	h	35 mm
Erforderliche Bordhöhe	h	30.11 mm
Wölbungshöhe	h_2	227.6 mm
Zulässiger unverstärkter Ausschnitt innerhalb $0.6 \cdot D_a$		216.9 mm
Innerer Kalottendurchmesser	D_i	2400 mm

Erforderliche Wanddicken

Erforderliche Wanddicke		8.603 mm
Erforderliche Wanddicke Krempe	Betrieb	8.603 mm
Erforderliche Wanddicke Krempe	Prüfung	6.281 mm
Erforderliche Wanddicke Kalotte	Betrieb	6.043 mm
Erforderliche Wanddicke Kalotte	Prüfung	4.457 mm

Gewichte/Volumen

Teilgewicht	1.218 kN
Betriebsgewicht	1.218 kN
Gewicht mit Wasserfüllung	3.244 kN
Volumen	0.2026 m ³

Bemerkungen



Gleichungen

Gültigkeitsbereich für Klöpperböden und Korbbogenböden

$$0.001 \leq \frac{s_e - c_1 - c_2}{D_a} = \frac{10 \text{ mm} - 0.5 \text{ mm} - 0 \text{ mm}}{1200 \text{ mm}} = 0.007917 \leq 0.1$$

Krempe oder Halbkugelanschluss, Betrieb

$$s = \frac{D_a \cdot p \cdot \beta}{40 \cdot \frac{K}{S} \cdot v} + c_1 + c_2 = \frac{1200 \text{ mm} \cdot 12 \text{ bar} \cdot 2.941}{40 \cdot \frac{196 \text{ N/mm}^2}{1.5} \cdot 1} + 0.5 \text{ mm} + 0 \text{ mm} = 8.603 \text{ mm}$$

Kalotte, Betrieb

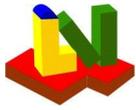
$$s = \frac{(D_i + 2 \cdot s_K) \cdot p}{40 \cdot \frac{K}{S} \cdot v + p} + c_1 + c_2 = \frac{(2400 \text{ mm} + 2 \cdot 10 \text{ mm}) \cdot 12 \text{ bar}}{40 \cdot \frac{196 \text{ N/mm}^2}{1.5} \cdot 1 + 12 \text{ bar}} + 0.5 \text{ mm} + 0 \text{ mm} = 6.043 \text{ mm}$$

Krempe oder Halbkugelanschluss, Probe

$$s = \frac{D_a \cdot p' \cdot \beta}{40 \cdot \frac{K'}{S'} \cdot v} + c_1 + c_2 = \frac{1200 \text{ mm} \cdot 15.6 \text{ bar} \cdot 2.941}{40 \cdot \frac{250 \text{ N/mm}^2}{1.05} \cdot 1} + 0.5 \text{ mm} + 0 \text{ mm} = 6.281 \text{ mm}$$

Kalotte, Probe

$$s = \frac{(D_i + 2 \cdot s_K) \cdot p'}{40 \cdot \frac{K'}{S'} \cdot v + p'} + c_1 + c_2 = \frac{(2400 \text{ mm} + 2 \cdot 10 \text{ mm}) \cdot 15.6 \text{ bar}}{40 \cdot \frac{250 \text{ N/mm}^2}{1.05} \cdot 1 + 15.6 \text{ bar}} + 0.5 \text{ mm} + 0 \text{ mm} = 4.457 \text{ mm}$$



Gewölbte Böden unter innerem und äußerem Überdruck nach AD 2000 B3 (Mai 2011)

Klöpferboden unter äußerem Überdruck

Außendurchmesser Boden	D_a	1200 mm
Äußerer Berechnungsdruck	p_a	2 bar
Äußerer Probedruck	p_a'	2.6 bar
Maximaler Durchmesser außerhalb $0.6 \cdot D_a$ *)	d_i	0 mm

*) Für $d_i = 0$ liegen alle Ausschnitte vollständig innerhalb $0.6 \cdot D_a$ und können als Kugelausschnitte nach AD-B9 berechnet werden.

Werkstoff

Berechnungstemperatur	T	200 °C	
Werkstoff	1.4571		
Festigkeitskennwert	Betrieb	K	196 N/mm ²
Festigkeitskennwert	Prüfung	K'	250 N/mm ²
Sicherheitsbeiwert	Betrieb	S	1.8
Sicherheitsbeiwert	Prüfung	S'	1.26
Zuschlag für Wanddickenunterschreitung	c_1	0.5 mm	
Korrosions- / Abnutzungszuschlag	c_2	0 mm	
E-Modul bei Berechnungstemperatur	E	186000 N/mm ²	
Schweißfaktor	v	1	

Geometrie

Ausgeführte Wanddicke	s_e	10 mm
Ausgeführte Wanddicke Kalotte	s_K	10 mm
Berechnungsbeiwert	β	2.941
Bordhöhe	h	35 mm
Erforderliche Bordhöhe	h	7.422 mm
Wölbungshöhe	h_2	227.6 mm

Ergebnisse für Betrieb

Maximal zulässiger Beuldruck	(nach 8.2.2)	13.12 bar
Erforderliche Wanddicke Krempe	(nach 8.2)	2.121 mm
Erforderliche Wanddicke Kalotte	(nach 8.1.1)	1.981 mm

Ergebnisse für Probe

Maximal zulässiger Beuldruck	(nach 8.2.2)	19.23 bar
Erforderliche Wanddicke Krempe	(nach 8.2)	1.656 mm
Erforderliche Wanddicke Kalotte	(nach 8.1.1)	2.009 mm
Sicherheitsbeiwert Kalotte für Probe (=2.4)	S'_{min}	2.4

Gewichte/Volumen

Teilgewicht	1.218 kN
Betriebsgewicht	1.218 kN
Gewicht mit Wasserfüllung	3.244 kN
Volumen	0.2026 m ³

Bemerkungen



Gleichungen

Gültigkeitsbereich für Klöpperböden und Korbbögenböden

$$0.001 \leq \frac{s_e - c_1 - c_2}{D_a} = \frac{10 \text{ mm} - 0.5 \text{ mm} - 0 \text{ mm}}{1200 \text{ mm}} = 0.007917 \leq 0.1$$

Krempen und Halbkugelanschlüsse, Betrieb nach 8.2

$$s = \frac{D_a \cdot p_a \cdot \beta}{40 \cdot \frac{K}{S} \cdot v} + c_1 + c_2 = \frac{1200 \text{ mm} \cdot 2 \text{ bar} \cdot 2.941}{40 \cdot \frac{196 \text{ N/mm}^2}{1.8} \cdot 1} + 0.5 \text{ mm} + 0 \text{ mm} = 2.121 \text{ mm}$$

Plastische Instabilität, Kalotte nach 8.1.1

$$s = \frac{(D_i + 2 \cdot S_k) \cdot p_a}{40 \cdot \frac{K}{S} + p_a} + c_1 + c_2 = \frac{(2400 \text{ mm} + 2 \cdot 10 \text{ mm}) \cdot 2 \text{ bar}}{40 \cdot \frac{196 \text{ N/mm}^2}{2.4} + 2 \text{ bar}} + 0.5 \text{ mm} + 0 \text{ mm} = 1.981 \text{ mm}$$

Elastisches Einbeulen, Betrieb

$$S_k = 3 + \frac{0.002}{\frac{(s_e - c_1 - c_2)}{R}} = 3 + \frac{0.002}{\frac{(10 \text{ mm} - 0.5 \text{ mm} - 0 \text{ mm})}{1200 \text{ mm}}} = 3.253$$

$$p_a \leq 3.66 \cdot \frac{E}{S_k} \cdot \left[\frac{s_e - c_1 - c_2}{R} \right]^2 \Leftrightarrow 13.12 \text{ bar} \leq 3.66 \cdot \frac{186000 \text{ N/mm}^2}{3.253} \cdot \left[\frac{10 \text{ mm} - 0.5 \text{ mm} - 0 \text{ mm}}{1200 \text{ mm}} \right]^2$$

Elastisches Einbeulen, Probe

$$S_k' = S_k \cdot \frac{2.2}{3} = 3.253 \cdot \frac{2.2}{3} = 2.385$$

$$p_a' \leq 3.66 \cdot \frac{E_{20}}{S_k'} \cdot \left[\frac{s_e - c_1 - c_2}{R} \right]^2 \Leftrightarrow 19.23 \text{ bar} \leq 3.66 \cdot \frac{200000 \text{ N/mm}^2}{2.385} \cdot \left[\frac{10 \text{ mm} - 0.5 \text{ mm} - 0 \text{ mm}}{1200 \text{ mm}} \right]^2$$



Beispielausdruck Festigkeitsberechnung

2017

Gewölbte Böden und Kegelschalen unter innerem Überdruck ASME VIII UG-32 u. APPENDIX-1 BPVC 2015 Edition

Bauform des Bodens

(1=Klöpfer-, 2=Korbbogen-, 3=Kugel-Torus, 4=Halbkugel, 5=elliptisch 2:1) 1

Klöpferboden

Auslegungsdruck	P_D	MPa	= p_D	bar
Zusatzdruck (hydrostat.)	D_P	MPa	= D_p	bar
Berechnungsdruck	P_0	1.2	MPa	= p_0 12 bar
Berechnungstemperatur			T_0	200 °C

Ausgeführte Wanddicke		t_e	10	mm
Zuschlag (Wanddicke)		c_1	0	mm
Zuschlag (Korrosion)		c_2	0	mm
Wanddicke ohne Zuschläge		t_0	10	mm

Außendurchmesser des zylindrischen Bords		D_0	1200	mm
Innendurchmesser des Bords		D	1180	mm
Außenradius der Kalotte	(= $D_0 - 2t_0$)	L_0	1210	mm
Innenradius der Kalotte		L	1200	mm
Innerer Krempenradius	(= $L_0 - t_0$)	r	120	mm
Schweißnahtfaktor		E	1	

Werkstoffdaten

Werkstoff 1.4571

Elastizitätsmodul		E_T	186000	MPa
Fließgrenze		S_y		MPa
Zul. Spannung reduzieren*) bei $R_{m20} > 485$ MPa?			Ja	(Ja/Nein)
Zugfestigkeit bei 20°C		R_{m20}	500	MPa
Zulässige Spannung				
bei Betriebstemperatur nach ASME-Tabelle		S_T	130.7	MPa
bei 20°C		S_{20}	142.9	MPa
nach UG-32(e) bzw. App. 1-4(c)		S	126.2	MPa

) Nach App. 1-4(c) muss für $R_{m20} > 485$ MPa (70 ksi) die zulässige Spannung reduziert werden auf $138 \cdot S_T / S_{20}$ (=20 ksi...).

Berechnung

Verhältnis		L/r	10	
Faktor		M	1.541	
Erforderliche Wanddicke ohne Zuschläge		t	8.796	mm
mit Zuschlägen (t_e 10 mm $\geq t$)		t^+	8.796	mm
Zulässiger Überdruck		P	1.364	MPa
Zulässiger Überdruck ohne hydrostat. Anteil		MAWP		bar

Geometrische Bedingungen

erfüllt

Festigkeit

Erforderliche Wanddicke für Ausschnitte nach UG-37(a), nomenclature für t_r

nach UG-32 mit $E=1$		$t(E=1)$	8.796	mm
nach Absatz (a) im Kalottenbereich		$t_1(E=1)$	5.71	mm

Zulässiger unverstärkter Ausschnittsdurchmesser d_A für geschweißte, gelötete und ausgehalste Ausschnitte nach UG 36(c)3

$d_A \leq 89$ mm (3.5 in.) für $t \leq 10$ mm (3/8 in.)
 $d_A \leq 60$ mm (2 3/8 in.) für $t > 10$ mm (3/8 in.)

Bemerkung



Beispielausdruck Festigkeitsberechnung

2017

Gleichungen

$$t = \frac{P_0 \cdot L \cdot M}{2 \cdot S \cdot E - 0.2 \cdot P_0} = \frac{1.2 \text{ MPa} \cdot 1200 \text{ mm} \cdot 1.541}{2 \cdot 126.2 \text{ MPa} \cdot 1 - 0.2 \cdot 1.2 \text{ MPa}} = 8.796 \text{ mm}$$

$$P = \frac{2 \cdot S \cdot E \cdot t_0}{L \cdot M + 0.2 \cdot t_0} = \frac{2 \cdot 126.2 \text{ MPa} \cdot 1 \cdot 10 \text{ mm}}{1200 \text{ mm} \cdot 1.541 + 0.2 \cdot 10 \text{ mm}} = 1.364 \text{ MPa}$$

Für Ausschnitte im Kalottenbereich mit

Ausschnittsinnendurchmesser	d_i	mm
Abstand der Ausschnittsmitte von der Bodenmitte	e	mm

Verfügbare Verstärkungsbreite nach UG37

Verfügbare Verstärkungsbreite der Kalotte	b'	mm
Durchmesser des Kalottenbereichs	d_{ka}	1049 mm
Bogenwinkel des Krepfenbereichs		64.2 °
Bogenlänge des Krepfenbereichs	b''	145.7 mm

$$d_{ka} = (2 \cdot L + t_e) \cdot (D/2 - r) / (L - r)$$

$$\varphi = \arccos((D/2 - r) / (L - r))$$

$$b' = (d_{ka} - d_i) / 2 - e$$

$$b'' = (r + t_e) \cdot \varphi$$



Gewölbte Böden unter äußerem Überdruck ASME BPVC VIII UG-33 und App. 1, 2015 Edition

Kugeltorus-Böden unter Außendruck

Äußerer Auslegungsdruck	P _D	MPa	= p _D	bar
Zusatzdruck (hydrostat.)	D _P	MPa	= D _p	bar
Berechnungsdruck	P ₀	0.2 N/mm ²	= p ₀	2 bar
Berechnungstemperatur			T ₀	200 °C
Ausgeführte Wanddicke			t _e	10 mm
Zuschlag (Wanddicke)			c ₁	0 mm
Zuschlag (Korrosion)			c ₂	0 mm
Wanddicke ohne Zuschläge			t ₀	10 mm
Außendurchmesser d. zylindrischen Bords			D ₀	1200 mm
Typ des Bodens (1=Klöpferboden, 2=Korbbogenboden 3=Torisphärisch, 4=Halbkugel)				1
Klöpferboden				
Außenradius d. Kalotte			R ₀	1210 mm
Innerer Krempenradius			r	120 mm
Werkstoff	1.4571			
Normstreckgrenze			S _y	245 N/mm ²
Zulässige Spannung			S ₀	130.7 N/mm ²
Material-Temperatur-Kurve			Fig	HA-2
E-Modul			E	178960 N/mm ²

Ergebnisse

Verhältnis			R ₀ /t ₀	121
Faktor (aus Mat.-Temp.-Kurve)			B	60.75 N/mm ²
Zulässiger Außendruck			P	0.502 MPa
Zulässiger Außendruck ohne hydrost. Anteil			MEP	bar
Erforderliche Wanddicke			t	5.142 mm
Erforderliche Wanddicke mit Zuschlägen			t+c ₁ +c ₂	5.142 mm

Bemerkung

Gleichungen

$$Pa(B) = \frac{B}{\left(\frac{R_0}{t_0}\right)} = \frac{60.75 \text{ N/mm}^2}{121} = 0.502 \text{ N/mm}^2 \quad \text{UG-28 d) Step 4}$$

$$Pa(E) = 0.0625 \cdot \frac{E}{\left(\frac{R_0}{t_0}\right)^2} = 0.0625 \cdot \frac{178960 \text{ N/mm}^2}{(121)^2} = 0.764 \text{ N/mm}^2 \quad \text{UG-28 d) Step 5}$$



Beispielausdruck Festigkeitsberechnung

2017

Schalen unter Innendruck DIN EN 13445-3/7:2016-12 + DIN EN 14025:2016-12

7.5.3 Torisphärische Böden unter innerem Überdruck (Klörperboden)

Regelwerk	EN 13445-3: Unbefeuerte Druckbehälter	
Lastfall	Betrieb	
Berechnungstemperatur	t	200 °C
Berechnungsdruck	P	1.2 MPa
Berechnung auf Außendruck?		Nein
Nennwanddicke	e_n	10 mm
Außendurchmesser	D_e	1200 mm
Schweißnahtfaktor	Z	1

Werkstoff

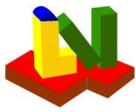
Eingesetzter Werkstoff	1.4571(P)	
Wanddickenunterschreitung	δ_e	0.5 mm
Korrosionszuschlag	c	0 mm
Wanddickenverlust bei Umformung	δ_m	0 mm
Summe der Zuschläge	$\Sigma(\delta)$	0.5 mm
Kennwert	(R_e, R_p, R_m)	K 196 MPa
Sicherheitsbeiwert	S	1.5
0.2% Dehngrenze, Betrieb	R_{p02T}	167 MPa
0.2% Dehngrenze, Raumtemperatur	R_{p02R}	220 MPa
Berechnungsnennspannung ($f=K/S$)	f	130.7 MPa
Faktor für f_b (=1 oder 1.6*)	f_{fb}	1
Zuläss. Beulspannung	$f_{fb} \cdot R_{p02}/S$ (7.5-4/5)	111.3 MPa

*) 1.6 bei kaltumgeformten nahtlosen austenitischen rostfreien Stählen

Ergebnis

Zulässiger Überdruck	$\text{Min}(P_s, P_y, P_b)$	P_{\max}	1.272 MPa
Berechnungswanddicke	$e_n - \Sigma(\delta)$	e_a	9.5 mm
Erforderliche Wanddicke	$\text{Max}(e_s, e_y, e_b)$	e	8.963 mm
Erforderliche Wanddicke mit Zuschlägen		e_{δ}	9.463 mm
Erforderliche Wanddicke Kalotte (Absicherung gegen zulässige Spannung)		e_s	5.523 mm
Erforderliche Wanddicke Krempe (Absicherung gegen Fließen)	7.5.3.5	e_y	8.963 mm
Erforderliche Wanddicke Krempe (Absicherung gegen Beulen)		e_b	8.442 mm
Innendurchmesser		D_i	1181 mm
Innerer Kalottenradius		R	1200 mm
Äußerer Kalottendurchmesser		D_{Ke}	2420 mm
Innerer Krempenradius		r	120 mm
Geometrisches Verhältnis		R/D_e	1
Geometrisches Verhältnis		r/D_e	0.1
Berechnungsbeiwert		β	0.859
Abstand $\sqrt{R \cdot e}$ nach 7.5.3.4		l	103.7 mm
Bordhöhe $0.2 \cdot \sqrt{D_i \cdot e}$ nach 7.5.3.4		h	20.58 mm
Ausgeführte Bordhöhe		h_a	35 mm
Erforderliche Bordhöhe		h	29.55 mm
Wölbungshöhe		h_2	227.6 mm
Zulässiger unverstärkter Ausschnitt (vollständig im Kalottenbereich)		d_{A1}	556.3 mm

Lastfall	Betrieb	
Festigkeitsbedingung	erfüllt	
Geometrische Bedingungen	erfüllt	
Die Anforderungen nach EN 13445-3 werden erfüllt.		



Gleichungen

Zulässige Spannung für den gewählten Lastfall

$$f = \frac{K}{S} = \frac{196 \text{ MPa}}{1.5} = 130.7 \text{ MPa}$$

$$e_s = \frac{P \cdot R}{(2 \cdot f \cdot Z - 0.5 \cdot P)} = \frac{1.2 \text{ MPa} \cdot 1200 \text{ mm}}{(2 \cdot 130.7 \text{ MPa} \cdot 1 - 0.5 \cdot 1.2 \text{ MPa})} = 5.523 \text{ mm} \quad (7.5-1)$$

$$e_y = \frac{\beta \cdot P \cdot (0.75 \cdot R + 0.2 \cdot D_i)}{f} = \frac{0.859 \cdot 1.2 \text{ MPa} \cdot (0.75 \cdot 1200 \text{ mm} + 0.2 \cdot 1181 \text{ mm})}{130.7 \text{ MPa}} = 8.963 \text{ mm} \quad (7.5-2)$$

Die Zwischenwerte für β (X, Y, Z, N am Ende der Maske) wurden mit der erforderlichen Dicke e iterativ berechnet.

$$e_b = (0.75 \cdot R + 0.2 \cdot D_i) \cdot \left[\frac{P}{111 \cdot f_b} \cdot \left(\frac{D_i}{r} \right)^{0.825} \right]^{\frac{1}{1.5}} = (0.75 \cdot 1200 \text{ mm} + 0.2 \cdot 1181 \text{ mm}) \cdot \left[\frac{1.2 \text{ MPa}}{111 \cdot 111.3 \text{ MPa}} \cdot \left(\frac{1181 \text{ mm}}{120 \text{ mm}} \right)^{0.825} \right]^{\frac{1}{1.5}} = 8.442 \text{ mm} \quad (7.5-3)$$

$$e = \text{Max} \begin{cases} e_b \\ e_y \\ e_s \end{cases} = \text{Max} \begin{cases} 8.442 \text{ mm} \\ 8.963 \text{ mm} \\ 5.523 \text{ mm} \end{cases} = 8.963 \text{ mm}$$

Festigkeitsbedingung

$$e_a \geq e \Leftrightarrow 9.5 \text{ mm} \geq 8.963 \text{ mm} \quad \checkmark$$

Geometrische Bedingungen

$$\text{Max} \begin{cases} 0.06 \cdot D_i \\ 2 \cdot e_a \end{cases} \leq r \leq \frac{D_i}{5} \Leftrightarrow \text{Max} \begin{cases} 70.86 \text{ mm} \\ 19 \text{ mm} \end{cases} \leq 120 \text{ mm} \leq 236.2 \text{ mm} \quad \checkmark$$

$$\frac{D_e}{1000} \leq e_a \leq 0.08 \cdot D_e \Leftrightarrow 1.2 \text{ mm} \leq 9.5 \text{ mm} \leq 96 \text{ mm}$$

$$R \leq D_e \Leftrightarrow 120 \text{ mm} \leq 1200 \text{ mm}$$

Nachrechnung des zulässigen Drucks

$$P_s = \frac{2 \cdot f \cdot Z \cdot e_a}{(R + 0.5 \cdot e_a)} = \frac{2 \cdot 130.7 \text{ MPa} \cdot 1 \cdot 9.5 \text{ mm}}{(1200 \text{ mm} + 0.5 \cdot 9.5 \text{ mm})} = P_s \quad (7.5-6)$$

$$P_y = \frac{f \cdot e_a}{\beta \cdot \beta_k \cdot (0.75 \cdot R + 0.2 \cdot D_i)} = \frac{130.7 \text{ MPa} \cdot 9.5 \text{ mm}}{0.859 \cdot 1 \cdot (0.75 \cdot 1200 \text{ mm} + 0.2 \cdot 1181 \text{ mm})} = P_y \quad (7.5-7)$$



Beispielausdruck Festigkeitsberechnung

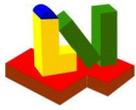
2017

$$P_b = 111 \cdot f_b \cdot \left[\frac{e_a}{0.75 \cdot R + 0.2 \cdot D_i} \right]^{1.5} \cdot \left[\frac{r}{D_i} \right]^{0.825} =$$

$$111 \cdot 111.3 \text{ MPa} \cdot \left[\frac{9.5 \text{ mm}}{0.75 \cdot 1200 \text{ mm} + 0.2 \cdot 1181 \text{ mm}} \right]^{1.5} \cdot \left[\frac{120 \text{ mm}}{1181 \text{ mm}} \right]^{0.825} = P_b \quad (7.5-8)$$

$$P_{max} = \text{Min} \begin{cases} P_s \\ P_y \\ P_b \end{cases} = \text{Min} \begin{cases} 2.061 \text{ MPa} \\ 1.272 \text{ MPa} \\ 1.432 \text{ MPa} \end{cases} = 1.272 \text{ MPa}$$

Parameter	Y =	0.007469	Z =	2.127	X =	0.1016	N =	0.8499
Parameter	$\beta_{0.06} =$	1.183	$\beta_{0.1} =$	0.8646	$\beta_{0.2} =$	0.5139		
$\beta =$		0.859						



Beispielausdruck Festigkeitsberechnung

2017

Ausschnitte in Zylindern, Kegeln und Kugeln nach AD 2000 B9 (2010-02) berichtigte Fassung 09.2016

Benachbarte Stützen in Umfangsrichtung

Berechnungstemperatur				T	150 °C	
Berechnungsdruck				p	10 bar	
Werkstoffe						
Bezeichnung	Mantel		Stützen 1		Stützen 2	
	1.0425		1.0425		1.4571(P)	
Kennwert	K	205 N/mm ²	K ₁	205 N/mm ²	K ₂	206 N/mm ²
Sicherheitsfaktor	S	1.5	S ₁	1.5	S ₂	1.5
Zuschlag	c ₁	0.5 mm		0.4 mm		0.5 mm
Zuschlag	c ₂	1 mm		1 mm		0 mm
Konstruktionszuschlag			c ₃	0 mm		0 mm
Zulässige Spannung		136.7 N/mm ²		136.7 N/mm ²		136.7 N/mm ²
Geometrie						
	Mantel		Stützen 1		Stützen 2	
Außendurchmesser	D _a	2500 mm	d _a	150 mm	d _{a2}	50 mm
Ausgeführte Wanddicke	s _e	8 mm	S _{a1}	7.9 mm	S _{a2}	8.5 mm
Innerer Überstand			m ₁	6 mm	m ₂	6.938 mm
Äußerer Überstand			l ₁	4 mm	l ₂	10 mm
Abminderung			A _{n1}	1	A _{n2}	1
Innendurchmesser						
korrodiert	D _i	2487 mm	d _i	137 mm		34 mm
mit Zuschlägen	D _n	2484 mm	d _n	134.2 mm		33 mm
Mittragende Stützenlänge			l _{S1}	38.18 mm	l _{S2}	22.91 mm
Anrechenbare Wanddicke incl. Zuschläge			s _S	7.9 mm	s _{S2}	8.5 mm
Steglänge zwischen zwei Stützen	l	150 mm				
Ergebnisse						
	Mantel		Stützen 1		Stützen 2	
Materialfläche	A _{σ0}	975 mm ²	A _{σ1}	107.3 mm ²	A _{σ2}	187.5 mm ²
Ergebnisse						
Gesamte druckbelastete Fläche					A _p	156888 mm ²
Gesamte tragende Fläche					A _σ	1270 mm ²
Mittlere vorhandene Spannung					σ _v	124.1 N/mm ²
Zulässige Spannung					K/S	136.7 N/mm ²
Ausnutzung (vorh./zulässige Spannung)				σ _v /K·S=	R	90.77 %
Berechnungswanddicke		s _e +h ₁ oder s _e +h ₁ ·b ₁ /b nach 4.3.3			s _A	8 mm
Mittragende Breite des Grundkörpers nach Gl.(3)					b	127.3 mm
Mindestabstand ohne gegenseitige Beeinflussung Gl.(8)					l _m	254.6 mm
Festigkeitsnachweis						Festigkeitsbedingungen erfüllt



Gleichungen Wanddickenverhältnis

$$\frac{s_S - c_1 - c_2}{s_A - c_1 - c_2} \leq 2 \Leftrightarrow \frac{7.9 \text{ mm} - 0.4 \text{ mm} - 1 \text{ mm}}{8 \text{ mm} - 0.4 \text{ mm} - 1 \text{ mm}} \leq 2 \qquad \frac{s_S - c_1 - c_2}{s_A - c_1 - c_2} \leq 2 \Leftrightarrow 1 \leq 2 \qquad \text{Stützen 1}$$

$$\frac{s_{S2} - c_1 - c_2}{s_A - c_1 - c_2} \leq 2 \Leftrightarrow \frac{8.5 \text{ mm} - 0.5 \text{ mm} - 0 \text{ mm}}{8 \text{ mm} - 0.5 \text{ mm} - 0 \text{ mm}} \leq 2 \qquad \frac{s_{S2} - c_1 - c_2}{s_A - c_1 - c_2} \leq 2 \Leftrightarrow 1.231 \leq 2 \qquad \text{Stützen 2}$$

Erforderliche Länge der Stützen (6)

$$l_S = 1.25 \sqrt{(d_i + s_S - (c_1 + c_2))(s_S - (c_1 + c_2))} = 1.25 \sqrt{(137 \text{ mm} + 7.9 \text{ mm} - 1.4 \text{ mm})(7.9 \text{ mm} - 1.4 \text{ mm})} = 38.18 \text{ mm}$$

Tatsächlich vorhandene $l_1 = 4 \text{ mm}$
Länge

$$l_{S2} = 1.25 \sqrt{(d_{i2} + s_{S2} - (c_1 + c_2))(s_{S2} - (c_1 + c_2))} = 1.25 \sqrt{(34 \text{ mm} + 8.5 \text{ mm} - 0.5 \text{ mm})(8.5 \text{ mm} - 0.5 \text{ mm})} = 22.91 \text{ mm}$$

Tatsächlich vorhandene $l_2 = 10 \text{ mm}$
Länge

Breite einer scheibenförmigen Verstärkung: (Berechnungsbreite für A_p) (3)

$$b = \sqrt{(D_i + s_A - c_1 - c_2)(s_A - c_1 - c_2)} = \sqrt{(2487 \text{ mm} + 8 \text{ mm} - 0.5 \text{ mm} - 1 \text{ mm})(8 \text{ mm} - 0.5 \text{ mm} - 1 \text{ mm})} = 127.3 \text{ mm}$$

Eine gegenseitige Beeinflussung kann vernachlässigt werden wenn der Abstand:

$$l \geq 2 \cdot b \Leftrightarrow 150 \text{ mm} \geq 254.6 \text{ mm} \qquad (8)$$

Festigkeitsnachweis

Festigkeitsbedingungen erfüllt

$$\text{Für } \frac{K_1}{S_1} = \frac{K}{S} = 136.7 \text{ N/mm}^2 \qquad \text{und} \qquad \frac{K_2}{S_2} = \frac{K}{S} = 136.7 \text{ N/mm}^2$$

gilt die Festigkeitsbedingung

$$\frac{p}{10} \cdot \left(\frac{A_p}{A_\sigma} + \frac{1}{2} \right) \leq \frac{K}{S} \Leftrightarrow \frac{10 \text{ bar}}{10} \cdot \left(\frac{156888 \text{ mm}^2}{1270 \text{ mm}^2} + \frac{1}{2} \right) \leq 136.7 \text{ N/mm}^2 \qquad (1)$$



Beispielausdruck Festigkeitsberechnung

2017

Anhang: Werkstoffe

Abschnitt 1: AD-B3/B3
Abschnitt 2: AD-B3#Pa/B3

Werkstoffspezifikation:

Regelwerk: AD W-2 Liefernorm: DIN 17440 Erzeugnis: Blech / Plate
Werkstoffnummer: 1.4571 Kurzname: X 6 CrNiMoTi 17 12 2

Betriebsbedingungen und Abmessungen:

Temperatur [°C]: 200 Druck [bar]: 12
Dicke [mm]: 10 Außendurchmesser [mm]: 1200

Werkstoffkennwerte für Probe- und Betriebszustand:

	Probezustand	Betriebszustand
Festigkeitskennwert [N/mm²]:	250,00	196,00
Sicherheitsbeiwert:	1,05	1,50
zulässige Spannung [N/mm²]:	238,10	130,67
Elastizitätsmodul [kN/mm²]:	200	186
Wanddickenunterschreitung [mm]:	0,50	nach EN 10029 Klasse A

DIN 17440 - Tabelle 5 (auszugsweise):

0,2%	1%	Zug-	Zug-	Bruch-	Bruch-	Bruch-	Bruch-	Bruch-	Bruch-
Dehngr.	Dehngr.	festig.	festig.	dehnung	dehnung	dehnung	dehnung	dehnung	dehnung
MPa	(min)	MPa	(min)	%	%	/quer	%	%	%
210	245	500	730	35	40	35			

Spalte 1 bis 4 für Flacherzeugnisse < 75 mm, Stabstahl, Schmiedestücke
Spalte 5 bis 6 für Flacherzeugnisse < 3 mm
Spalte 7 für Flacherzeugnisse < 75 mm
Spalte 8 bis 10 für Schmiedestücke und Stabstahl < 160 mm

DIN 17440 - Tabelle 5 (auszugsweise), Fortsetzung:

Kerbschlag-	Kerbschlag-	Kerbschlag-	Kerbschlag-	Beständigk.	Beständigk.
arbeit (ISO V)	arbeit (ISO V)	arbeit (ISO V)	arbeit (ISO V)	g. interkrist.	g. interkrist.
längs	quer	tangential	quer	Korrosion	Korrosion
J (min)	J (min)	J (min)	J (min)	Lieferzustand	geschweißt
85	55	60	55	Ja	Ja

Spalte 1 bis 3 für Schmiedestücke und Stabstahl < 160 mm
Spalte 4 für Flacherzeugnisse < 75 mm

DIN 17440 - Tabelle 6 (auszugsweise):

Dehngrenze bei einer Temperatur in °C von

0,2%	1%	20	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	Grenz-
MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	temp.
°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
210	245	202	234	185	218	177	206	167	196	157	186	145	175	135
131	164	129	160	117	148	90	121	70	101	50	81	30	61	20

Beim Einsatz bis zu 100000h unter der Grenztemperatur tritt keine interkristalline Korrosion nach DIN 50914 auf

Wärmebehandlungszustand des Werkstoffes: A

DIN 17440 - Tabelle B.1 (auszugsweise):

Elastizitätsmodul bei .. °C Wärmeausdehnung zw. 20°C und

Dichte	20	100	200	300	400	500	100	200	300	400	500	Wärme
(20°C)	°C	leitf.										
kg/dm³	kN/mm²	kN/mm²	kN/mm²	kN/mm²	kN/mm²	kN/mm²	/1e6 K	/W/Km				
7,98	200	194	186	179	172	165	16,7	17,2	17,7	18,1	18,4	15



Beispielausdruck Festigkeitsberechnung

2017

Kommentar:
-

Abschnitt 3: Boden/UG32
Abschnitt 4: Boden/UG33

Werkstoffspezifikation:

Regelwerk: ASME Liefernorm: DIN 17440 Erzeugnis: -
Werkstoffnummer: 1.4571 Kurzname: X 6 CrNiMoTi 17

Betriebsbedingungen und Abmessungen:

Temperatur [°C]: 200 Druck [bar]: 12
Dicke [mm]: 10 Außendurchmesser [mm]: 1200

Werkstoffkennwerte für Probe- und Betriebszustand:

	Probezustand	Betriebszustand
Festigkeitskennwert [N/mm ²]:	142,86	130,67
Sicherheitsbeiwert:	1,00	1,00
zulässige Spannung [N/mm ²]:	142,86	130,67
Elastizitätsmodul [kN/mm ²]:	200	186
Wanddickenunterschreitung [mm]:	n.d.	nach -

DIN 17440 - Tabelle 5 (auszugsweise):

0,2% Dehng.	1% Dehng.	festig. von	festig. bis	dehnung längs	dehnung quer	dehnung längs	dehnung quer	dehnung tang.
MPa (min)	MPa (min)	MPa (min)	MPa (min)	%	%	%	%	%

Spalte 1 bis 4 für Flacherzeugnisse < 75 mm, Stabstahl, Schmiedestücke
Spalte 5 bis 6 für Flacherzeugnisse < 3 mm
Spalte 7 für Flacherzeugnisse < 75 mm
Spalte 8 bis 10 für Schmiedestücke und Stabstahl < 160 mm

DIN 17440 - Tabelle 5 (auszugsweise), Fortsetzung:

Kerbschlagarbeit (ISO V) längs	Kerbschlagarbeit (ISO V) quer	Kerbschlagarbeit (ISO V) tangential	Kerbschlagarbeit (ISO V) quer	Beständigk. g. interkrist.	Beständigk. g. interkrist.	Korrosion	Korrosion
J (min)	J (min)	J (min)	J (min)	Lieferzustand	geschweißt		

Spalte 1 bis 3 für Schmiedestücke und Stabstahl < 160 mm
Spalte 4 für Flacherzeugnisse < 75 mm

DIN 17440 - Tabelle 6 (auszugsweise):

Dehngrenze bei einer Temperatur in °C von

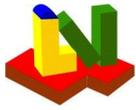
20	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	Grenztemp.
MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	°C
0,2%												
1%												

Beim Einsatz bis zu 100000h unter der Grenztemperatur tritt keine interkristalline Korrosion nach DIN 50914 auf
Wärmebehandlungszustand des Werkstoffes:

DIN 17440 - Tabelle B.1 (auszugsweise):

Elastizitätsmodul bei .. °C	Wärmeausdehnung zw. 20°C und
Dichte (20°C) 20°C 100°C 200°C 300°C 400°C 500°C 100°C 200°C 300°C 400°C 500°C leitf. kg/dm ³ kN/mm ² kN/mm ² kN/mm ² kN/mm ² kN/mm ² kN/mm ² /1e6 K /1e6 K /1e6 K /1e6 K /1e6 K W/Km	
7,98 200 194 186 179 172 165 16,7 17,2 17,7 18,1 18,4	

Kommentar:



Beispielausdruck Festigkeitsberechnung

2017

	Probezustand	Betriebszustand
Festigkeitskennwert [N/mm ²]:	260,00	520,00
Sicherheitsbeiwert:	1,05	3,00
zulässige Spannung [N/mm ²]:	247,62	173,33
Elastizitätsmodul [kN/mm ²]:	200	200
Wanddickenunterschreitung [mm]:	0,50	nach EN 10029 Klasse A

EN 10028-7 Tabellen 7-10:

0,2% Dehngr. min N/mm ²	1% Dehngr. min N/mm ²	Zug- festig. min N/mm ²	Zug- festig. max N/mm ²	Bruch- dehnung A 80 mm %	Bruch- dehnung A %
220	260	520	670		40

EN 10028-7 - Tabellen 11-15 & F.1:

Dehngrenze bei einer Temperatur in °C von

	-196	-150	-80	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550
0,2% 1% Rm	0 0 0	0 0 0	0 0 0	185 218 440	177 206 410	167 196 390	157 186 385	145 175 375	140 169 375	135 164 375	131 160 370	129 158 360	127 157 330

EN 10028-7 - Tabelle A.1 & A.2:

Elastizitätsmodul bei .. °C

Wärmeausdehnung zw. 20°C und

Dichte (20°C) kg/dm ³	100	200	300	400	500	100°C	200°C	300°C	400°C	500°C	Wärme- leitf. K/W/Km
7,98	200	194	186	179	172	165	16,7	17,2	17,7	18,1	18,4

Kommentar:

EN 10028-7: Juni 2000 ersetzt DIN 17441: 1996-09
teilweise Ersatz für DIN 17440: 1997-02 und DIN 17460: 1992-09
DIN 17441:1985-07 wird mit EN 10028-7 zurückgezogen.

Abschnitt 6: Mantel/B9
Abschnitt 6: Stutzen 1/B9

Werkstoffspezifikation:

Regelwerk: AD W-1 Liefernorm: EN 10028-2:1992Erzeugnis: Blech / Plate
Werkstoffnummer: 1.0425 Kurzname: P265GH

Betriebsbedingungen und Abmessungen:

Temperatur [°C]: 150 Druck [bar]: 10
Dicke [mm]: 8 Außendurchmesser [mm]: 2500

Werkstoffkennwerte für Probe- und Betriebszustand:

	Probezustand	Betriebszustand
Festigkeitskennwert [N/mm ²]:	265,00	205,00
Sicherheitsbeiwert:	1,05	1,50
zulässige Spannung [N/mm ²]:	252,38	136,67
Elastizitätsmodul [kN/mm ²]:	212	203
Wanddickenunterschreitung [mm]:	0,50	nach EN 10029 Klasse A
Zeitstandfestigkeit für 100000 h [N/mm ²]:		
Zeitstandfestigkeit für 200000 h [N/mm ²]:		

EN 10028-2 - Tabelle 3 (auszugsweise):

Dicke	Dicke	Zugfestigk. Rm	Zugfestigk. Rm	Streckgr. ReH	Bruchdehn. A % (min)	Kerbschlag Kerbschlag Spitzkerb.
von	bis	von	bis			



Beispielausdruck Festigkeitsberechnung

2017

mm	mm	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	% min	°C	KV J
0	16	410	530	265	23		

EN 10028-2 - Tabelle 4 (auszugsweise):

0,2%-Dehngrenze bei einer Wanddicke von 0 bis 16 mm in N/mm², Temperatur in °C:

50	100	150	200°C	250°C	300°C	350°C	400°C	450°C	500°C
234	215	205	195	175	155	140	130		

EN 10028-2 - Tabelle A.1 (auszugsweise):

Temperatur	1%-Zeitdehng	1%-Zeitdehng	Zeitstandfest	Zeitstandfest	Zeitstandfest
°C	10 000 h	100 000 h	10 000 h	100 000 h	200 000 h
	N/mm ²				
150					

Kommentar:
-

Abschnitt 6: Stutzen 2/B9

Werkstoffspezifikation:

Regelwerk: AD W-2 Liefernorm: EN 10028-7 Erzeugnis: warmgewalztes Blech / hot rolled plate
 Werkstoffnummer: 1.4571(P) Kurzname: X 6 CrNiMoTi 17-12-2

Betriebsbedingungen und Abmessungen:

Temperatur [°C]: 150 Druck [bar]: 10
 Dicke [mm]: 8,5 Außendurchmesser [mm]: 50

Werkstoffkennwerte für Probe- und Betriebszustand:

	Probezustand	Betriebszustand
Festigkeitskennwert [N/mm ²]:	260,00	206,00
Sicherheitsbeiwert:	1,05	1,50
zulässige Spannung [N/mm ²]:	247,62	137,33
Elastizitätsmodul [kN/mm ²]:	200	190
Wanddickenunterschreitung [mm]:	0,50	nach EN 10029 Klasse A

EN 10028-7 Tabellen 7-10:

0,2% Dehng	1% Dehng	Zugfestig	Zugfestig	Bruchdehnung	Bruchdehnung
min	min	min	max	A 80 mm	A
N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	%	%
220	260	520	670		40

EN 10028-7 - Tabellen 11-15 & F.1:

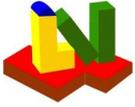
Dehngrenze bei einer Temperatur in °C von

-196	-150	-80	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550
N/mm ²												
0,2%	0	0	185	177	167	157	145	140	135	131	129	127
1%	0	0	218	206	196	186	175	169	164	160	158	157
Rm	0	0	440	410	390	385	375	375	375	370	360	330

EN 10028-7 - Tabelle A.1 & A.2:

Elastizitätsmodul bei .. °C Wärmeausdehnung zw. 20°C und

Dichte (20°C)	20	100	200	300	400	500	100°C	200°C	300°C	400°C	500°C	Wärmeleitf.
kg/dm ³	kN/mm ²	/1e6 K	W/Km									



Beispielausdruck Festigkeitsberechnung

2017

7,98 ···|200 ···|194 ···|186 ···|179 ···|172 ···|165 ···|16,7 ···|17,2 ···|17,7 ···|18,1 ···|18,4 ···|0 ·····

Kommentar:

EN 10028-7: Juni 2000 ersetzt DIN 17441: 1996-09
teilweise Ersatz für DIN 17440: 1997-02 und DIN 17460: 1992-09
DIN 17441:1985-07 wird mit EN 10028-7 zurückgezogen.