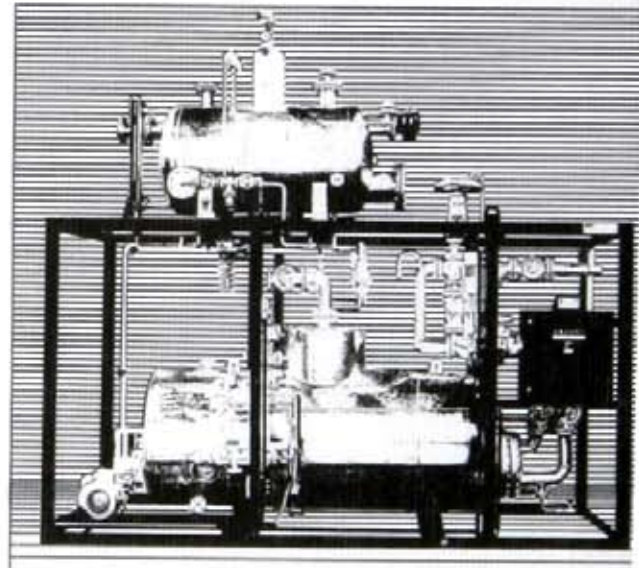


TECHNIK-FACHBUCH

3

Apparate- und Rohr- leitungsbau

Festigkeitsberechnungen



Walter Wagner

Inhaltsverzeichnis

	Bedeutung der wichtigsten Formelzeichen	9			
1	Einleitung	13			
2	Allgemeine Analyse des mechanischen Verhaltens	14			
2.1	Spannungsanalyse	14	3.2.5	Berechnungsgrößen	28
2.1.1	Primäre Spannungen	14	3.2.5.1	Berechnungsformel	28
2.1.2	Sekundäre Spannungen	14	3.2.5.2	Zuschlag c_1 zum Ausgleich der zulässigen Wanddicken- Unterschreitung	29
2.1.3	Spannungsspitzen	14	3.2.5.3	Zuschlag c_2 für Korrosion bzw. Abnutzung	29
2.1.4	Vergleichsspannungen	14	3.2.5.4	Berechnungsdruck p	29
2.2	Ermüdungs- und Sprödbruchanalyse	15	3.2.5.5	Berechnungstemperatur	30
2.3	Spezielle Berechnungsmethoden	15	3.2.5.6	Zulässige Beanspruchung σ_{zul}	30
2.3.1	Stufenkörpermethode (SKM)	15	3.2.5.7	Festigkeitskennwert K	30
2.3.2	Methode der finiten Differenzen (FDM) sowie finiten Elemente (FEM)	15	3.2.5.8	Sicherheitsbeiwert S	30
			3.2.5.9	Schweißnahtwertigkeit v_N	31
3	Festigkeitsberechnung	17	3.2.6	Prüfdruck für das einzelne Rohr	31
3.1	Flüssigkeitsdruck	17	3.3	Berechnung von Abzweigungen	35
3.1.1	Druck aus Gewichtskraft	17	3.3.1	Allgemeines Flächenvergleichs- verfahren	35
3.1.2	Druckkraft gegen gekrümmte Wände	18	3.3.2	Bestimmung der tragenden Längen	35
3.2	Berechnung von Rohren	18	3.3.3	Druckbeaufschlagte und tragen- de Flächen	37
3.2.1	Innendruckbeanspruchung	18	3.3.4	Verschwächungsfaktor	37
3.2.1.1	Umfangsspannung	19	3.3.5	Rohrleitungen mit schrägem Einzelabzweig	38
3.2.1.2	Längsspannung	19	3.3.6	Rohrleitungen mit mehreren Ausschnitten oder Abzwei- gungen in Längsrichtung	38
3.2.1.3	Radialspannung	19	3.3.7	Rohrleitungen mit Ausschnitten oder Abzweigen mit einem Winkel zur Längsrichtung	41
3.2.2	Vergleichsspannung	19	3.3.8	Rohrabzweigungen mit Verstärkungen	42
3.2.2.1	Gestaltsänderungshypothese	20	3.4	Berechnung von Rohrbögen	44
3.2.2.2	Schubspannungshypothese	20	3.5	Berechnung von Segmentbögen	46
3.2.2.3	Normalspannungshypothese	20	3.6	Berechnung von Rohr- erweiterung	47
3.2.3	Mittlere Vergleichsspannung im Rohr	20	3.7	Berechnung von Rohrab- schlüssen	48
3.2.3.1	Mittlere Umfangsspannung	20	3.7.1	Gewölbte Böden	48
3.2.3.2	Mittlere Längsspannung	20	3.7.2	Ebene Scheibe	51
3.2.3.3	Mittlere Vergleichsspannung	21	3.8	Berechnung von kegelförmigen Reduzierstücken	53
3.2.4	Rechnerische Rohrwanddicke	23	3.8.1	Rohrkegel mit einem Kegel- winkel kleiner 70°	53
3.2.4.1	Abgrenzung des Geltungs- bereiches	23	3.8.2	Rohrkegel mit einem Kegel- winkel größer 70°	54
3.2.4.1.1	Spannungsvergleich	23	3.8.3	Kegelkrempe	54
3.2.4.1.2	Berücksichtigung der Verform- barkeit der Werkstoffe	24			
3.2.4.1.3	Geltungsbereiche in den Regelwerken	26			

3.9	Bauteile unter äußerem Überdruck	57		Dichtungen in Rohrleitungs-Flanschverbindungen	91
3.9.1	Einbeulen von Rohrteilen	58	3.15.6.1	Anwendungsbereich der It-Dichtungen	91
3.9.1.1	Rohre	58	3.15.6.2	Dichtungskräfte	92
3.9.1.2	Böden	58			
3.9.1.3	Sicherheitsfaktor	58	4	Spezielle Hinweise für den Apparate- und Druckbehälterbau	107
3.10	Veränderliche Innendruckbeanspruchung	59	4.1	Anwendungsgleichungen und -diagramme	107
3.10.1	Grenzlastspielzahlen	61	4.2	Ausrüstung und Prüfung	130
3.10.2	Schwellende Innendruckbeanspruchung bei Rohren	61	4.2.1	Berstsicherungen	130
3.10.3	Schwellende Innendruckbeanspruchung bei Abzweigen	63	4.2.1.1	Allgemeines	130
3.10.4	Schwellfestigkeit bei gebogenen Rohren	63	4.2.1.2	Konstruktiver Aufbau	130
3.10.5	Schwellfestigkeit bei höheren Temperaturen	64	4.2.1.3	Bemessung von Berstsicherung und Zuleitung	130
3.10.6	Zulässige Beanspruchung bei Zeitschwingbruch	64	4.2.1.4	Bemessung bei schnellem Druckanstieg	133
3.10.7	Zulässige Beanspruchung bei Dauerbruch	64	4.2.2	Sicherheitsventile	133
3.11	Druckstoß	64	4.2.2.1	Allgemeines	133
3.12	Primäre Zusatzbeanspruchungen	68	4.2.2.2	Größenbemessung	134
3.13	Sekundäre Zusatzspannungen	68	4.2.2.3	Querschnitte, Leitungen, Einbau	136
3.13.1	Beurteilung der sekundären Zusatzspannungen	68	4.2.3	Öffnungen und Verschlüsse	138
3.14	Wärmespannungen	69	4.2.4	Prüfung	138
3.14.1	Stationäre Wärmespannungen	69	4.2.4.1	Prüfung vor Inbetriebnahme	138
3.14.2	Instationäre Wärmespannungen	70	4.2.4.2	Wiederkehrende Prüfungen	139
3.14.2.1	Thermoschockspannung	70	5	Werkstoffe	141
3.14.2.2	Quasistationäre Wärmespannung	71	5.1	Rohre und Bleche	141
3.15	Flanschverbindungen	73	5.1.1	Unlegierte Stähle	141
3.15.1	Äußere Kräfte	73	5.1.2	Warmfeste und hochwarmfeste Stähle	142
3.15.2	Schraubenkraft	77	5.1.3	Nichtrostende und säurebeständige Stähle	142
3.15.3	Äußere Momente	78	5.1.4	Hitzebeständige Stähle	143
3.15.4	Flanschwiderstand	78	5.1.5	Kaltzähe Stähle	144
3.15.5	Kraft-Verformungs-Verhältnisse	82	5.1.6	Druckwasserstoffbeständige Stähle	144
3.15.5.1	Verspannungsschaubild bei den verschiedenen Betriebszuständen	85	5.2	Flansche	145
3.15.6	Spezielle Betrachtungen zum Anwendungsbereich von It-		5.3	Schrauben und Muttern	145
				Literaturverzeichnis	170
				Stichwortverzeichnis	171

Bedeutung der wichtigsten Formelzeichen

Die nachfolgenden Zeichen werden nach Möglichkeit grundsätzlich angewendet, wobei Abweichungen und Ergänzungen von diesen Formelzeichen jeweils bei den entsprechenden Gleichungen oder

Bildern genannt sind. Nach Möglichkeit wurde versucht, die in den Technischen Regelwerken bereits eingeführten Zeichen zu verwenden.

Formelzeichen	Bedeutung	Einheiten	Bemerkungen
<i>A</i>	Fläche	mm ²	
<i>A_{proj}</i>	Projizierte Fläche	mm ²	
<i>A_σ</i>	Spannungsbeauschlagte Fläche	mm ²	
<i>A_p</i>	Druckbeauschlagte Fläche	mm ²	
<i>B</i>	Faktor		
<i>B_a</i>	Faktor zur Berücksichtigung der verminderten Beanspruchung an der Außenseite von Rohrbögen	–	
<i>B_i</i>	Faktor zur Berücksichtigung der erhöhten Beanspruchung an der Innenseite von Rohrbögen	–	
<i>B_{prüf}</i>	Faktor bei der Prüfdruckermittlung	–	
<i>C</i>	Einspannfaktor	–	
<i>C</i>	Federkonstante	N/mm	
ΔD	Rückfederung einer Dichtung	mm	
<i>E</i>	Elastizitätsmodul	N/mm ²	
<i>F</i>	Kraft	N	
<i>F_D</i>	Dichtungskraft	N	
<i>F_{F,p}</i>	Ringflächenkraft	N	
<i>F_R</i>	Rohrkraft	N	
<i>F_{R,p}</i>	Rohrkraft durch den Innendruck	N	
<i>F_{R,z}</i>	Rohrkraft durch Zug in der Rohrleitung	N	
<i>F_{R,M}</i>	Rohrkraft zur Bewertung eines Biegemomentes in der Rohrleitung	N	
<i>F_S</i>	Schraubenkraft	N	
<i>F_Z</i>	Gesamt-Zugkraft	N	$F_Z = F_{R,z} + F_{R,M}$
<i>F_n</i>	Kraft in Normalrichtung	N	
<i>F_p</i>	Innendruckkraft	N	$F_p = F_{R,p} + F_{F,p}$
ΔFl	Rückfederung eines Flansches	mm	
<i>G</i>	Gewichtskraft	N	$G = m \cdot g$
<i>H</i>	Höhe	mm	
<i>J</i>	Flächenträgheitsmoment	mm ⁴	
<i>K</i>	Festigkeitskennwert	N/mm ²	
<i>K_{DV}</i>	Formänderungswiderstand des Dichtungswerkstoffes	N/mm ²	
<i>K_{Dσ}</i>	Standfestigkeit des Dichtungswerkstoffes	N/mm ²	
<i>L</i>	Länge	mm	
<i>M</i>	Moment	N · m	
<i>R</i>	Radius einer Wölbung	mm	
<i>S</i>	Sicherheitsbeiwert	–	

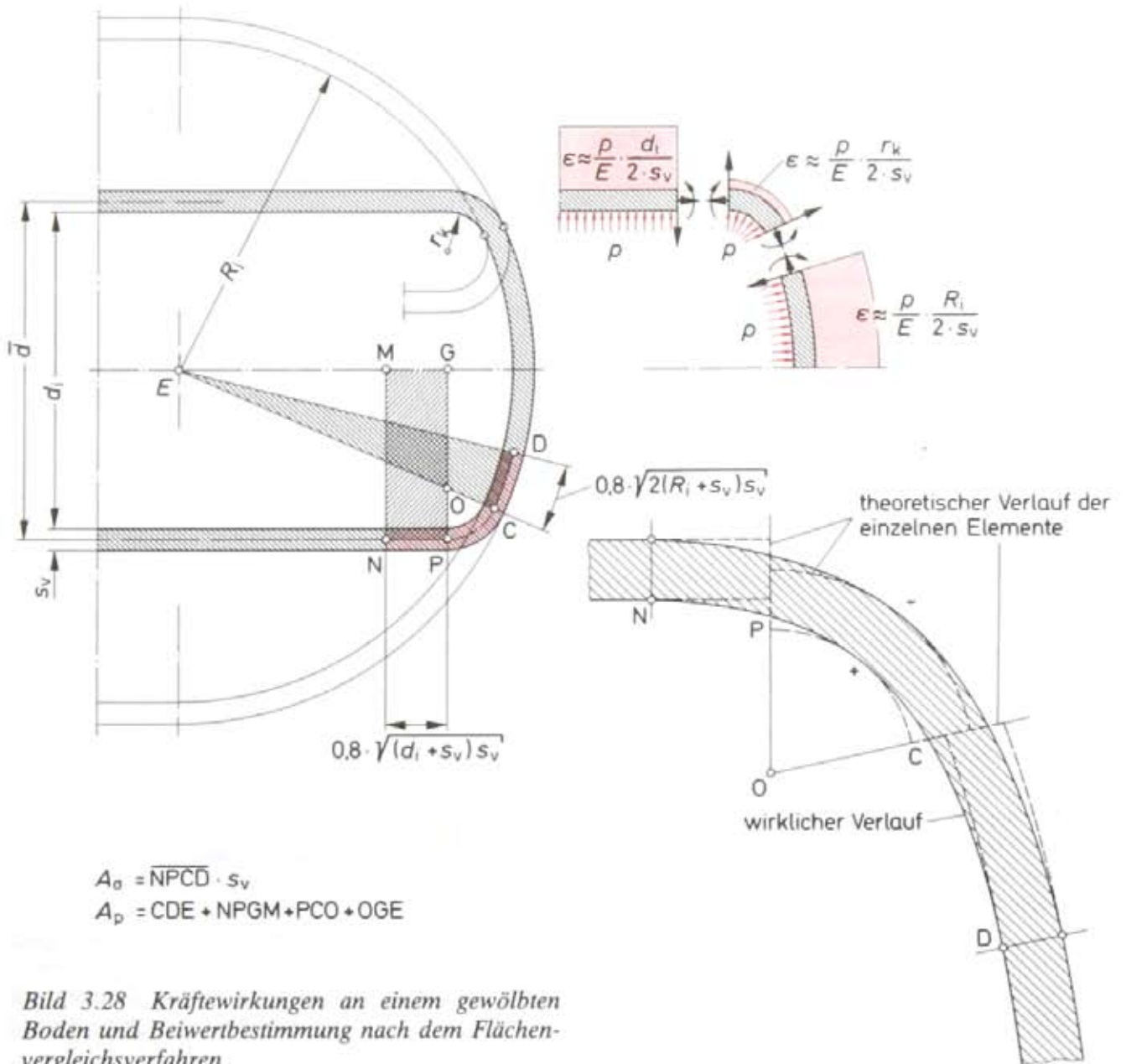


Bild 3.28 Kräftewirkungen an einem gewölbten Boden und Beiwertbestimmung nach dem Flächenvergleichsverfahren

mittragenden Längen von $0,8 \cdot \sqrt{(d_i + s_v) \cdot s_v}$ für den zylindrischen Teil und $0,8 \cdot \sqrt{2 \cdot (R_i + s_v) \cdot s_v}$ für die Kugelkalotte nach Bild 3.28 läßt sich auch hier das Flächenvergleichsverfahren für die Bestimmung des β -Wertes anwenden [3.5].

Mit:

$$\bar{\sigma}_1 \cdot \beta \cdot A_o = p \cdot A_p$$

wird

$$\beta = \frac{p \cdot A_p}{\bar{\sigma}_1 \cdot A_o}$$

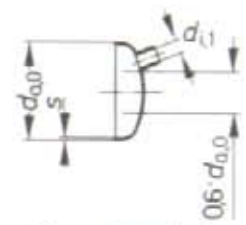
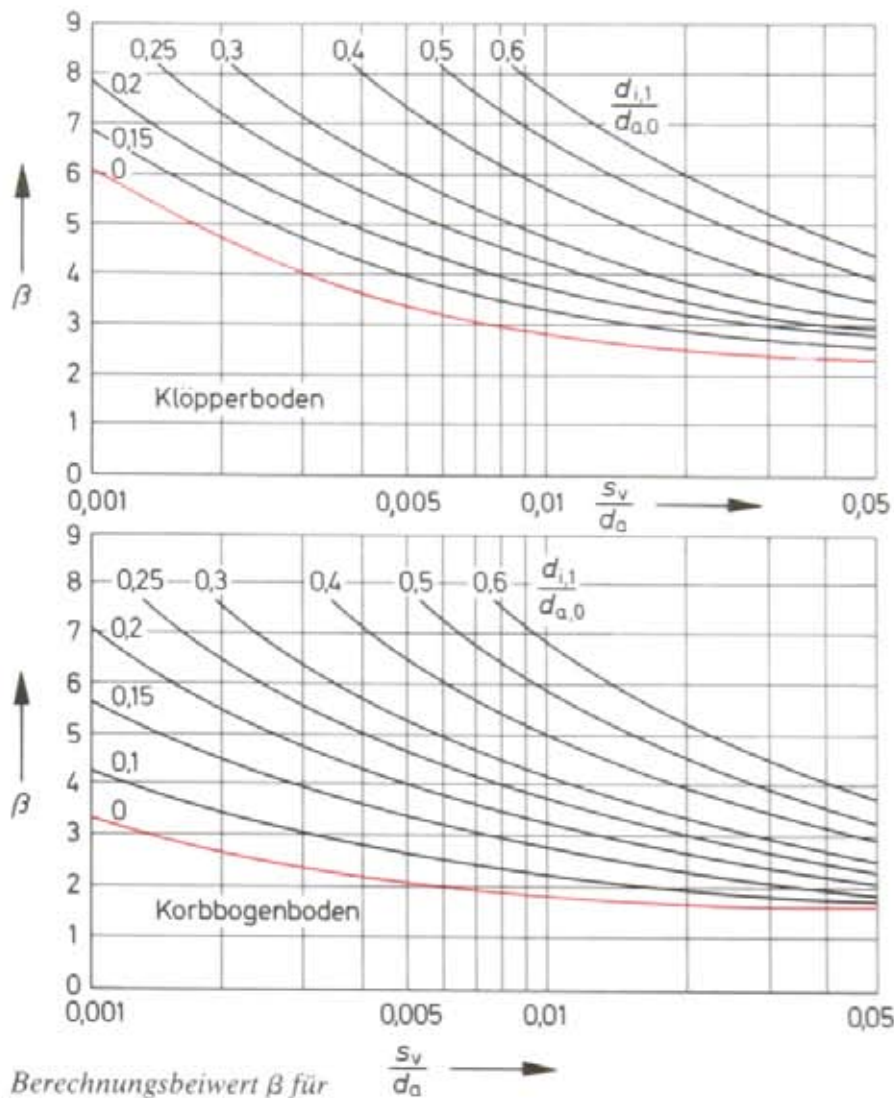
und durch Einsetzen der Längsspannung:

$$\bar{\sigma}_1 = \frac{p \cdot \bar{d}}{4 \cdot s_v}$$

erhält man:

$$\beta = \frac{4 \cdot s_v}{\bar{d}} \cdot \frac{A_p}{A_o}$$

Die Berechnungsbeiwerte β sind für gewölbte Vollböden nach AD-B 3 (2.77) für das Wanddicken-Durchmesser-Verhältnis $s_v/d_a \geq 0,02$, unmittelbar in Bild 3.26 angegeben. Für kleinere s_v/d_a -Verhältnisse sowie für Böden mit unverstärkten Ausschnitten ist aus Bild 3.29 der Berechnungswert β zu entnehmen.



ohne Ausschnitte:

$$\beta = 1,9 + \frac{0,0325}{\left(\frac{s_v}{d_a}\right)^{0,7}}$$

mit Ausschnitten:

$$\beta = 1,9 + \frac{0,933 \cdot \frac{d_{i,1}}{d_a}}{\left(\frac{s_v}{d_a}\right)^{0,5}}$$

ohne Ausschnitte:

$$\beta = 1,55 + \frac{0,0255}{\left(\frac{s_v}{d_a}\right)^{0,625}}$$

mit Ausschnitten:

$$\beta = 1,55 + \frac{0,866 \cdot \frac{d_{i,1}}{d_a}}{\left(\frac{s_v}{d_a}\right)^{0,5}}$$

Bild 3.29 Berechnungsbeiwert β für gewölbte Böden (für Vollböden und Böden mit unverstärktem Ausschnitt)

Faltenbildung in der Kreppe

Bei Klöpfer- und Korbbogenböden unter Innendruck ist zusätzlich nachzuweisen, daß der Boden im Krepfenbereich gegen elastisches Beulen ausreichend bemessen ist. Dies ist gegeben, wenn bei

Klöpferböden:

$$p \leq 6,25 \cdot E \cdot \left(\frac{s_v}{d_a}\right)^{2,24} \quad (3.72)$$

Korbbogenböden:

$$p \leq 5,00 \cdot E \cdot \left(\frac{s_v}{d_a}\right)^{2,34} \quad (3.72a)$$

3.7.2 Ebene Scheibe

Eine ebene Platte erfährt bei der Belastung durch einen gleichförmigen Innendruck p eine Biegebeanspruchung. Zur überschlägigen Ermittlung des Ab-

hängigkeitsfaktors kann die Biegebeanspruchung über den Rohrdurchmesser wie folgt ermittelt werden (Bild 3.30):

$$\sigma_b = \frac{M}{W}$$

wobei für das Biegemoment M , je nach Einspannfaktor f_E , gesetzt werden kann:

$$M = \frac{F \cdot d_i}{f_E}$$

mit:

$$F = p \cdot \Delta b \cdot d_i \quad \text{und}$$

$$W = \frac{s_v^2 \cdot \Delta b}{6} \quad \text{wird}$$

$$\sigma_b = \frac{p \cdot d_i^2 \cdot 6}{f_E \cdot s_v^2}$$

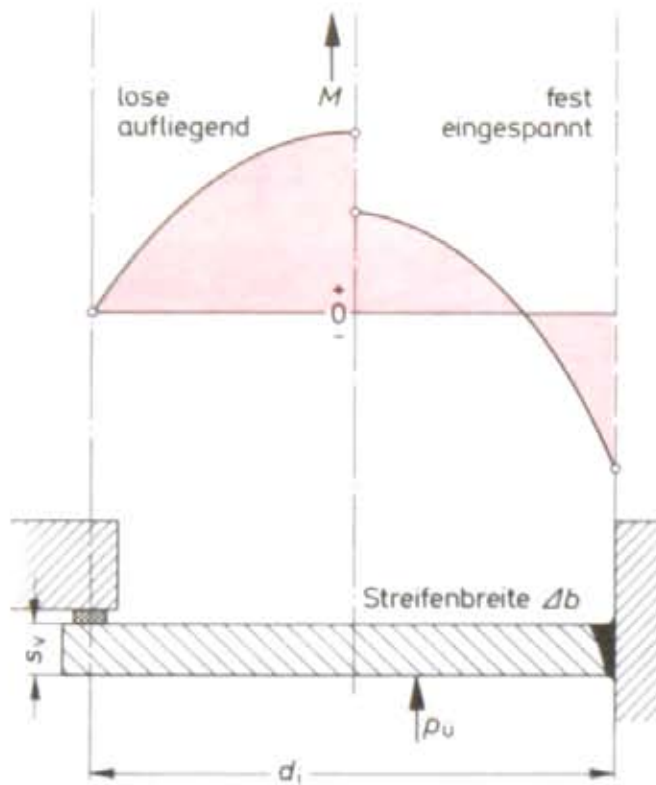


Bild 3.30 Biegemoment in der Kreisplatte

Und die Scheibenwanddicke erhält man daraus mit der Zusammenfassung der Konstanten, der Vergleichsspannung sowie Berücksichtigung der Querkontraktionszahl von 0,3 zu einem Einspannfaktor C:

(3.73)

$$s_v = C \cdot d_i \cdot \sqrt{\frac{p}{\sigma_{zul}}}$$

Dieser Gleichungsaufbau gilt für alle ebenen Platten (ob rund oder eckig), die mit einer Flächenpressung beaufschlagt werden. Der Einspannfaktor liegt üblicherweise im Bereich von 0,3 bis 0,5 und kann aus Bild 3.30a entnommen werden.

Erfolgt die Berechnung von Druckbehältern (AD), entfallen die Zuschläge c_1 und c_2 .

Sonderformen: Ebene, kreisförmige, gekrempte Vollböden:

(3.73a)

$$s_v = C \cdot (d_i - r) \cdot \sqrt{\frac{p}{\sigma_{zul}}}$$

Rechteckige und elliptische Platten:

(3.73b)

$$s_v = C \cdot b \cdot y \cdot \sqrt{\frac{p}{\sigma_{zul}}}$$

Ausführungsform	C-Wert																		
<p>Vorschriften für r und h beachten</p>	0,30 n. Gl. 3.73a																		
<p>$s \leq 3 \cdot s_1$ $s > 3 \cdot s_1$</p>	0,35 0,40																		
	0,35																		
<p>$s_R \approx 0,7s$</p>	0,40																		
<p>Restwanddicke in der Nut: $s_R \geq p \left(\frac{d_i}{2} - r \right) \frac{1,3}{\sigma_{zul}}$ jedoch nicht weniger als 5 mm und $s_R \leq 0,77 s_1$, wenn $d_a > 1,2 d_i$ Nutenhalbmesser: $r \geq 0,2 \cdot s$, jedoch nicht weniger als 5 mm</p>	0,40																		
<p>$s \leq 3 \cdot s_1$ $s > 3 \cdot s_1$</p>	0,40 0,45																		
<p>$s \leq 3 \cdot s_1$ $s > 3 \cdot s_1$</p>	0,45 0,50																		
<p>$s_R \approx 0,7s$ Richtung der Einzelkraft $d_i \leq 500$ mm Richtung der Druckkraft</p>	1,25																		
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Verhältnis b/l</th> <th>rechteckige Platten</th> <th>elliptische Platten</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1,0</td> <td>1,10</td> <td>1,0</td> </tr> <tr> <td>0,75</td> <td>1,26</td> <td>1,15</td> </tr> <tr> <td>0,5</td> <td>1,40</td> <td>1,30</td> </tr> <tr> <td>0,25</td> <td>1,52</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>$\leq 0,1$</td> <td>1,56</td> <td>-</td> </tr> </tbody> </table>	Verhältnis b/l	rechteckige Platten	elliptische Platten	1,0	1,10	1,0	0,75	1,26	1,15	0,5	1,40	1,30	0,25	1,52	-	$\leq 0,1$	1,56	-
Verhältnis b/l	rechteckige Platten	elliptische Platten																	
1,0	1,10	1,0																	
0,75	1,26	1,15																	
0,5	1,40	1,30																	
0,25	1,52	-																	
$\leq 0,1$	1,56	-																	

Bild 3.30a Berechnungsbeiwerte C und y für ebene Platten nach AD-B5 (6.86)

Der Verhältniswert y berücksichtigt die Erhöhung der Beanspruchung gegenüber runden Platten in Abhängigkeit vom Seitenverhältnis b/l bei rechteckigen und elliptischen Platten ohne Verankerung und bei den in freien, unversteiften Flächen veran-

kerter ebener Wandungen eingezeichneten Rechtecken (siehe Bild 3.30a).

Platten mit zusätzlichem Randmoment, Verankerung sowie für Wärmetauscher siehe Kapitel 4.

3.8 Berechnung von kegelförmigen Reduzierstücken

Analog zu den gewölbten Böden kann man kegelförmige Reduzierstücke in drei Zonen aufteilen, und zwar in den **kegeligen Teil**, in die **Krempe** und in den **zylindrischen Ansatz** gemäß Bild 3.31.

3.8.1 Rohrkegel mit einem Kegelwinkel kleiner 70° ($\varphi_1 < 70^\circ$)

Für den Rohrkegel ergibt sich nach dem Flächenvergleichsverfahren (Bild 3.32) für die:

Längsspannung mit:

$$A_{p,l} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{d_{i,K}^2}{\cos \varphi_1}$$

und

$$A_{o,l} = \pi \cdot (d_{i,K} + s_v \cdot \cos \varphi_1) \cdot s_v$$

die mittlere Längsspannung zu:

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_l &= \frac{p \cdot d_{i,K}^2}{4 \cdot (d_{i,K} + s_v \cdot \cos \varphi_1) \cdot s_v \cdot \cos \varphi_1} \\ &\approx \frac{p \cdot d_{i,K}}{4 \cdot s_v \cdot \cos \varphi_1} \end{aligned}$$

Umfangsspannung mit:

$$A_{p,u} = \frac{l \cdot d_i}{2 \cdot \cos \varphi_1}$$

und

$$A_{o,u} = l \cdot s_v$$

die mittlere Umfangsspannung zu:

$$\bar{\sigma}_u = \frac{p \cdot d_{i,K}}{2 \cdot s_v \cdot \cos \varphi_1}$$

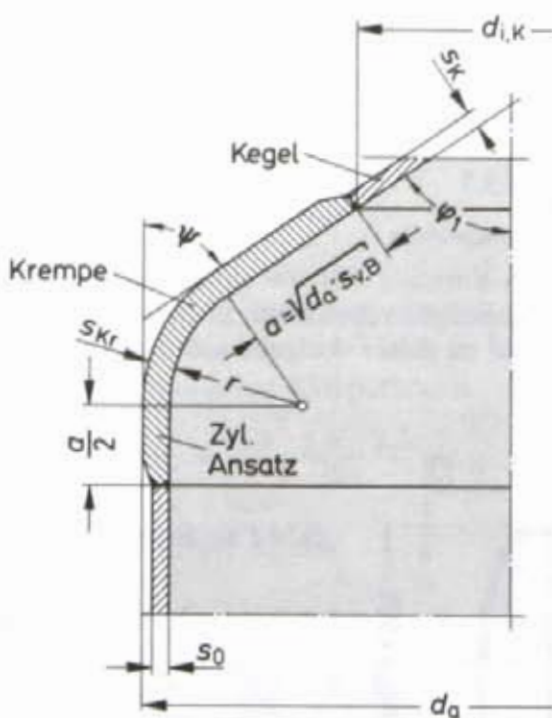


Bild 3.31 Kegelförmiges Reduzierstück mit Krempe

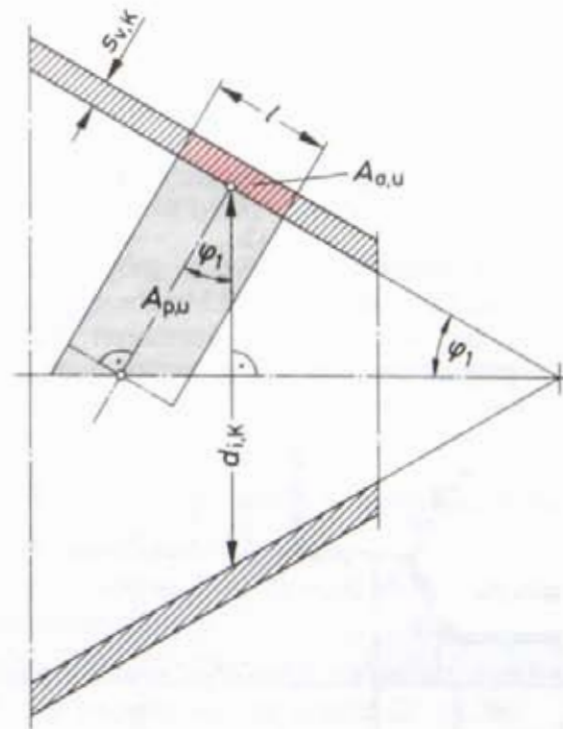


Bild 3.32 Flächenvergleichsverfahren für das konische Rohr (Kegel)