

AD 2000-Merkblatt

ICS 23.020.30

Ausgabe März 2009

Berechnung von Druckbehältern	Ebene Böden und Platten nebst Verankerungen	AD 2000-Merkblatt B 5
--	--	----------------------------------

Die AD 2000-Merkblätter werden von den in der „Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter“ (AD) zusammenarbeitenden, nachstehend genannten sieben Verbänden aufgestellt. Aufbau und Anwendung des AD 2000-Regelwerkes sowie die Verfahrensrichtlinien regelt das AD 2000-Merkblatt G1.

Die AD 2000-Merkblätter enthalten sicherheitstechnische Anforderungen, die für normale Betriebsverhältnisse zu stellen sind. Sind über das normale Maß hinausgehende Beanspruchungen beim Betrieb der Druckbehälter zu erwarten, so ist diesen durch Erfüllung besonderer Anforderungen Rechnung zu tragen.

Wird von den Forderungen dieses AD 2000-Merkblattes abgewichen, muss nachweisbar sein, dass der sicherheitstechnische Maßstab dieses Regelwerkes auf andere Weise eingehalten ist, z. B. durch Werkstoffprüfungen, Versuche, Spannungsanalyse, Betriebserfahrungen.

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

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Berlin

Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI), Frankfurt/Main

Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (VDMA), Fachgemeinschaft Verfahrenstechnische Maschinen und Apparate, Frankfurt/Main

Stahlinstitut VDEh, Düsseldorf

VGB PowerTech e.V., Essen

Verband der TÜV e.V. (VdTÜV), Berlin

Die AD 2000-Merkblätter werden durch die Verbände laufend dem Fortschritt der Technik angepasst. Anregungen hierzu sind zu richten an den Herausgeber:

Verband der TÜV e.V., Friedrichstraße 136, 10117 Berlin.

Inhalt

0 Präambel	5 Zuschlüsse
1 Geltungsbereich	6 Berechnung
2 Allgemeines	7 Schrifttum
3 Formelzeichen und Einheiten	Anhang 1: Erläuterungen
4 Verschwächungen	

0 Präambel

Zur Erfüllung der grundlegenden Sicherheitsanforderungen der Druckgeräte-Richtlinie kann das AD 2000-Regelwerk angewandt werden, vornehmlich für die Konformitätsbewertung nach den Modulen „G“ und „B + F“.

Das AD 2000-Regelwerk folgt einem in sich geschlossenen Auslegungskonzept. Die Anwendung anderer technischer Regeln nach dem Stand der Technik zur Lösung von Teilproblemen setzt die Beachtung des Gesamtkonzeptes voraus.

Bei anderen Modulen der Druckgeräte-Richtlinie oder für andere Rechtsgebiete kann das AD 2000-Regelwerk sinngemäß angewandt werden. Die Prüfständigkeit richtet sich nach den Vorgaben des jeweiligen Rechtsgebietes.

1 Geltungsbereich

Die nachstehenden Berechnungsregeln gelten für die Bemessung von ebenen Böden und Platten sowie für Rohrbündel an Wärmeaustauschern im Hinblick auf ihre Verankerungswirkung. Sie beruhen auf den Kirchhoffschen Gleichungen für die Platte unter näherungsweise Berücksichtigung der Einspannbedingungen und der Lochfelder.

Außerdem enthalten die C-Werte auch den Einfluss einer Querkontraktionszahl von 0,3.

Bei Werkstoffen mit wesentlich anderen Querkontraktionszahlen sowie dort, wo die Abmessungen die Grenzen

$$\frac{s_e - c_1 + c_2}{D} \geq 4 \sqrt{0,0087 \frac{p}{E}}; \frac{d}{D} \leq \frac{1}{3}$$

überschreiten, ist eine gesonderte Spannungs- und Verformungsanalyse erforderlich.

Für D ist der jeweilige Berechnungsdurchmesser einzusetzen. Diese Abgrenzung gilt nicht für Rohrplatten, bei denen eine gegenseitige Abstützung durch die Rohre vorliegt.

2 Allgemeines

2.1 Dieses AD 2000-Merkblatt ist nur im Zusammenhang mit AD 2000-Merkblatt B 0 anzuwenden.

2.2 Bei Verwendung von Blindflanschen nach DIN 2527 und Blinddeckeln (ebene Deckel aus Stahl) nach DIN 28122 gelten die Anforderungen nach diesem AD 2000-Merkblatt als erfüllt, sofern Weichstoffdichtungen (z. B. Flachdichtungen für Flansche mit ebener Dichtfläche nach DIN 2690 bis 2692) verwendet werden.

Ersatz für Ausgabe August 2007; | = Änderungen gegenüber der vorangehenden Ausgabe

Die AD 2000-Merkblätter sind urheberrechtlich geschützt. Die Nutzungsrechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, die Wiedergabe auf photomechanischem Wege und die Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei auszugsweiser Verwertung, dem Urheber vorbehalten.

3 Formelzeichen und Einheiten

Über die Festlegungen des AD 2000-Merkblattes B 0 hinaus gilt:

d_1, d_2	Berechnungsdurchmesser	mm
l_K	Knicklänge	mm
l_w	Walzlänge	mm
l_w^*	Länge der Verbindung zwischen Rohr und Rohrboden	mm
p, p_u	Berechnungsdruck in den Rohren bzw. um die Rohre	bar
D_1, D_2, D_3, D_4	Berechnungsdurchmesser	mm
F_A	Axialkraft	N
F_K	Knickkraft	N
F_R	Rohrkraft	N
t	hier: Teilung	mm
λ	Schlankheitsgrad	–

4 Verschwächungen

4.1 Ausschnitte in unverankerten ebenen Böden und Platten

4.1.1 Zentrale Ausschnitte mit dem Durchmesser d_i können für Ausführungen nach den Abschnitten 6.1 und 6.2 über Bild 21 und für Ausführungen nach den Abschnitten 6.3 und 6.4 über Bild 22 berücksichtigt werden.

4.1.2 Die erforderliche Wanddicke der Platte mit Ausschnitt ergibt sich aus den Formeln (2) bis (4), in denen der C - bzw. C_1 -Wert nach Tafel 1 bzw. Bild 5 mit dem Ausschnittsbeiwert C_A bzw. C_{A1} multipliziert wird.

4.1.3 Je nachdem, ob ein Ausschnitt ohne anschließenden Stutzen (Ausführung A der Bilder 21 und 22) oder mit Stutzen (Ausführung B der Bilder 21 und 22) vorliegt, sind die Werte C_A bzw. C_{A1} der Kurve A oder B zu entnehmen. Bei Durchmesserverhältnissen $d_i/d_D \geq 0,8$ ist die Flanschberechnung nach AD 2000-Merkblatt B 8 anzuwenden.

4.1.4 Nichtmittige Ausschnitte können wie mittige Ausschnitte behandelt werden.

4.1.5 Für runde unverankerte Platten mit gleichsinnigem zusätzlichem Randmoment, bei denen das Verhältnis $(s_e - c_1 - c_2)/d_t \geq 0,1$ ist, kann bei mehreren Ausschnitten der Ausschnittsbeiwert C_{A1} wie folgt bestimmt werden.

$$C_{A1} = \sqrt{\frac{A}{A - A_A}} \quad (1)$$

Als A ist der unverschwächte Plattenquerschnitt und als A_A die Summe der Querschnitte der in der am stärksten geschwächten Schnittebene liegenden Ausschnitte einzusetzen.

4.1.6 Für Rohrplatten sind die Verschwächungsbeiwerte nach den Formeln (17) bzw. (18) zu bestimmen.

5 Zuschläge

Siehe AD 2000-Merkblatt B 0 Abschnitt 9. Abweichend davon entfällt jedoch der Zuschlag c_1 bei Wanddicken über 25 mm.

6 Berechnung

6.1 Unverankerte runde ebene Böden und Platten ohne zusätzliches Randmoment

6.1.1 Die erforderliche Wanddicke s unverankerter runder ebener Böden und Platten ohne zusätzliches Randmoment beträgt

$$s = C \cdot D_1 \cdot \sqrt{\frac{p \cdot S}{10 K}} + c_1 + c_2 \quad (2)$$

Die Berechnungsbeiwerte C und die Berechnungsdurchmesser D_1 sind entsprechend Tafel 1 einzusetzen.

6.2 Unverankerte, rechteckige oder elliptische Platten ohne zusätzliches Randmoment

6.2.1 Die erforderliche Wanddicke s unverankerter, rechteckiger oder elliptischer Platten ohne zusätzliches Randmoment nach Bild 1 beträgt

$$s = C \cdot C_E \cdot f \cdot \sqrt{\frac{p \cdot S}{10 K}} + c_1 + c_2 \quad (3)$$

Der aus Bild 2 zu entnehmende Beiwert C_E berücksichtigt die besonderen Verhältnisse rechteckiger oder elliptischer Platten. Der C -Wert ist entsprechend den vorliegenden Randbedingungen, bezogen auf die Schmalseite, Tafel 1 zu entnehmen.

6.2.2 Bei Deckeln nach Bild 1 mit einer zusätzlichen Belastung durch Bügelschrauben muss die der Innendruckbeanspruchung gleichgerichtete zulässige Schraubenbelastung berücksichtigt werden. In der Regel genügt es, in Formel (3) anstelle von p den Wert $1,5 p$ einzusetzen.

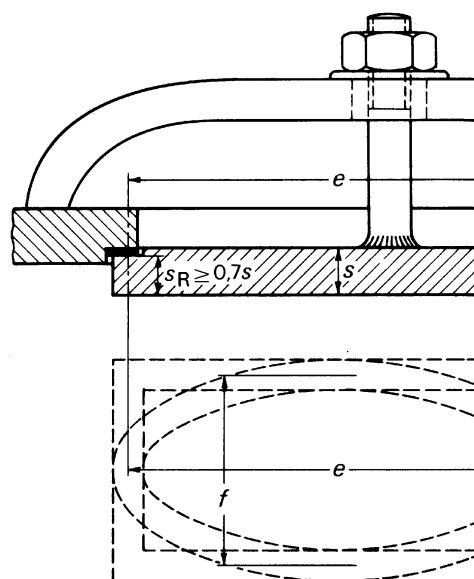


Bild 1. Von innen vorgelegte, unverankerte rechteckige oder elliptische Platte ohne zusätzliches Randmoment

6.3 Unverankerte runde Platten mit zusätzlichem Randmoment

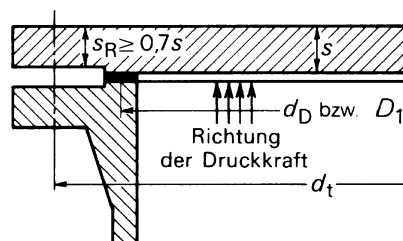


Bild 3. Unverankerte runde Platte mit zusätzlichem gleichsinnigem Randmoment

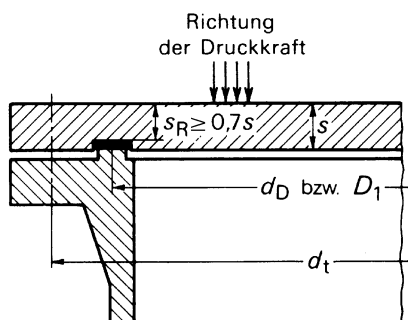


Bild 4. Unverankerte runde Platte mit zusätzlichem gleichsinnigem Randmoment

6.3.1 Die erforderliche Wanddicke s unverankerter runder Platten mit zusätzlichem gleichsinnigem Randmoment beträgt

$$s = C_1 \cdot d_D \cdot \sqrt{\frac{p \cdot S}{10 K}} + c_1 + c_2 \quad (4)$$

Der C_1 -Wert kann in Abhängigkeit vom Verhältnis d_i/d_D und dem Wert δ aus Bild 5 entnommen werden. Hierbei beträgt das Verhältnis der erforderlichen Schraubenkraft zur Innen-druckkraft

$$\delta = 1 + 4 \frac{k_1 \cdot S_D}{d_D} \quad (5)$$

wobei in der Regel $S_D = 1,2$ eingesetzt und der Dichtungskennwert k_1 dem AD 2000-Merkblatt B 7 entnommen werden kann. Bei gegensinnigem Randmoment kann $C_1 = 0,35$ gesetzt werden.

6.3.2 Platten, die entsprechend den vorstehenden Formeln ausgelegt sind, genügen den Festigkeitsanforderungen. Es können jedoch z. B. bei Platten aus hochfesten Stählen sowie bei Platten aus Nichteisenmetallen oder bei Platten größeren Durchmessers Schwierigkeiten bezüglich Abdichtung und zulässiger Schraubenbiegung wegen zu großer Schrägstellung der Platten auftreten. Es wird deshalb empfohlen, bei Weichstoffdichtungen und Metallweichstoffdichtungen die Plattenneigung φ in der Größenordnung von etwa $0,5^\circ$ bis 1° zu begrenzen [17]. Die Platte muss dann unter Umständen dicker ausgeführt sein, als es aufgrund der Festigkeitsanforderung notwendig wäre.

6.4 Unverankerte rechteckige oder elliptische Platten mit zusätzlichem gleichsinnigem Randmoment

Die erforderliche Wanddicke s unverankerter rechteckiger oder elliptischer Platten mit zusätzlichem gleichsinnigem Randmoment wird sinngemäß nach Formel (3) aus Abschnitt 6.2.1 berechnet, wobei statt C der auf die Schmalseite der Platte bezogene C_1 -Wert nach Abschnitt 6.3.1 aus Bild 5 eingesetzt wird.

6.5 Runde ebene Böden und Platten mit einer zentralen Verankerung durch ein Rohr oder einen Vollanker

6.5.1 Die erforderliche Wanddicke s runder ebener Böden und Platten mit einer zentralen Verankerung durch ein Rohr oder einen Vollanker beträgt

$$s = C_2 \cdot (D_1 - d_1) \cdot \sqrt{\frac{p \cdot S}{10 K}} + c_1 + c_2 \quad (6)$$

wobei der Berechnungsbeiwert C_2 und die Berechnungsdurchmesser D_1 und d_1 entsprechend Tafel 2 einzusetzen sind.

6.5.2 Die zentralen Anker oder Ankerrohre müssen die auf sie entfallende Axialkraft (Zug- oder Druckkraft) mit

einer Sicherheit $S = 1,5$ aufnehmen können. Die Axialkraft beträgt

$$F_A = C_Z \cdot \frac{\pi \cdot D_1^2 \cdot p}{40} \quad (7)$$

wobei C_Z in Abhängigkeit von D_1/d_1 Bild 6 entnommen werden kann. Die Formel (6) berücksichtigt nicht die Wirkung unterschiedlicher Wärmedehnung von Mantel und Rohren sowie in den Platten selbst. Wenn die Wirkung unterschiedlicher Wärmedehnung berücksichtigt werden muss, sind entsprechende Vereinbarungen zwischen Hersteller und Besteller/Betreiber zu treffen.

6.5.3 Wird der Anker durch axialen Druck beansprucht, so ist zusätzlich die Knicksteifigkeit nach Euler nachzuweisen. Die zulässige Knickkraft beträgt

$$F_K = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{l_K^2 \cdot S_K} \quad (8 a)$$

wobei $S_K = 3,0$ für den Betriebszustand gilt. Anstelle von S_K ist im Prüfzustand $S'_K = 2,2$ einzusetzen. Die Länge l_K ist je nach Belastungsfall aus Tafel 3 in Abhängigkeit von l_0 zu bestimmen. Dabei ist l_0 die Länge zwischen den Punkten, in denen der Anker in seiner ursprünglichen Richtung geführt wird.

Schlankheitsgrade

$$\lambda = \frac{4 \cdot l_K}{\sqrt{d_a^2 + d_i^2}} \quad (9 a)$$

über 200 sollen vermieden werden. In Formel (9 a) bedeuten d_a Außendurchmesser und d_i Innendurchmesser der Ankerrohre.

Formel (8 a) gilt nur im Schlankheitsbereich

$$\lambda > \lambda_0 \approx \pi \sqrt{\frac{E}{K}} \quad (9 b)$$

Bei kleineren Schlankheitsgraden beträgt die zulässige Knickkraft von Rohrkern

$$F_K = \frac{K}{S} \cdot \pi \cdot \frac{d_a^2 - d_i^2}{4} \left[1 - \frac{\lambda}{\lambda_0} \left(1 - \frac{S}{S_K} \right) \right] \quad (8 b)$$

wobei $S_K = 3,0$ für den Betriebszustand gilt. Anstelle von S_K ist im Prüfzustand $S'_K = 2,2$ einzusetzen.

6.6 Ebene, durch Stehbolzen versteifte Platten

6.6.1 Die erforderliche Wanddicke s ebener, durch Stehbolzen versteifter Platten beträgt bei gleichmäßig über die druckbelastete Fläche verteilter Verankerung nach Bild 7

$$s = C_3 \cdot \sqrt{(t_1^2 + t_2^2) \cdot \frac{p \cdot S}{10 K}} + c_1 + c_2 \quad (10)$$

Der Berechnungsbeiwert C_3 ist der Tafel 4 zu entnehmen.

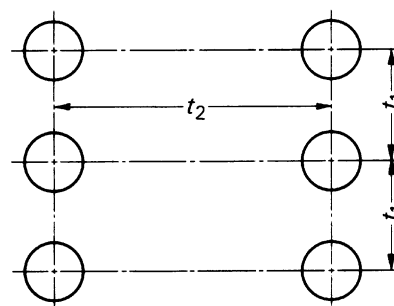


Bild 7. Gleichmäßig verteilte Verankerung

Tafel 3. l_k für verschiedene Belastungsfälle

	Freie, in der Achse geführte Stabenden (Rohr oder Anker zwischen 2 Stützblechen)	Ein Stabende eingespannt, das andere frei in der Achse geführt (Rohr oder Anker zwischen Rohrboden oder Stützblech)	Eingespannte, in der Achse geführte Stabenden (Rohr oder Anker zwischen 2 Rohrböden)
Darstellung des Belastungsfalles			
Freie Knicklänge $l_k =$	l_0	$0,7 l_0$	$0,5 l_0$

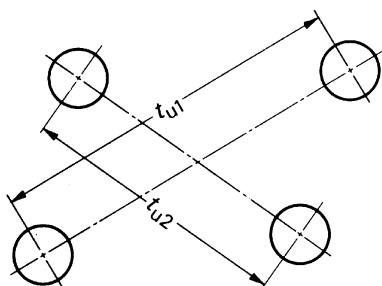


Bild 8. Ungleichmäßig verteilte Verankerung

6.6.2 Die erforderliche Wanddicke s ebener, durch Stehbolzen versteifter Platten beträgt bei ungleichmäßig verteilter Verankerung nach Bild 8

$$s = C_3 \cdot \frac{t_{u1} + t_{u2}}{2} \cdot \sqrt{\frac{p \cdot S}{10 K}} + c_1 + c_2 \quad (11)$$

Der Berechnungsbeiwert C_3 ist der Tafel 4 zu entnehmen.

Tafel 4. Berechnungsbeiwert ebener, durch Stehbolzen versteifter Platten

Ausführungsform der Stehbolzen	Berechnungsbeiwert C_3
eingeschraubt und vernietet oder eingeschraubt und aufgedornt	0,47
eingeschraubt und beidseits mit Muttern versehen	0,44
eingeschweißt	0,40

6.7 Runde ebene Platten an Wärmeaustauschern

Die Berechnung erfolgt nach den Abschnitten 6.7.1 bis 6.7.6; in jedem Fall ist Abschnitt 6.7.7 zu beachten.

6.7.1 Runde ebene Platten, die durch die Rohre und den Mantel gegenseitig verankert sind

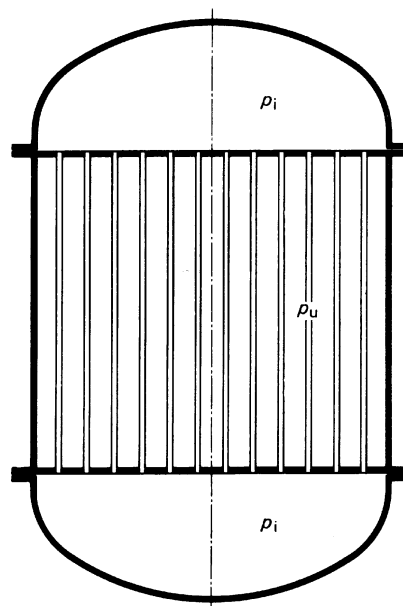


Bild 9. Runde ebene Platten, die durch Rohre und Mantel gegenseitig verankert sind

6.7.1.1 Die erforderliche Wanddicke s runder ebener Platten nach Bild 9, die durch die Rohre und den Mantel gegenseitig verankert sind, beträgt

$$s = 0,40 d_2 \cdot \sqrt{\frac{p \cdot S}{10 K}} + c_1 + c_2 \quad (12)$$

wobei als p der größere der beiden Drücke in den Rohren oder um die Rohre einzusetzen ist. Der Berechnungsdurchmesser d_2 ist der Durchmesser des größten im unberohrten Teil einbeschriebenen Kreises (siehe Bild 10).

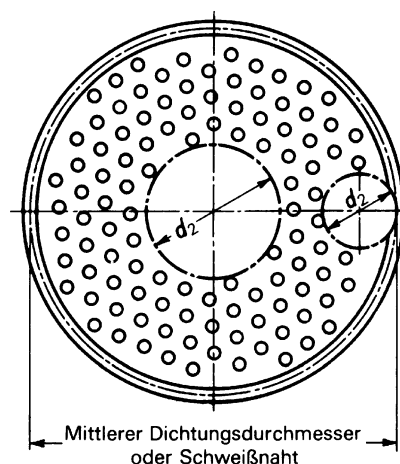


Bild 10. Bestimmung des Berechnungsdurchmessers d_2

6.7.1.2 Bei eingewalzten Rohren muss ausreichende Sicherheit gegen Herausziehen der Rohre vorhanden sein. Diese ist anzunehmen, wenn die Beanspruchung der Walzverbindung, die sich aus der Rohrkraft F_R (siehe Abschnitt 6.7.1.4) und der wirksamen Stützfläche A_w ergibt, die nachstehenden Werte der Tafel 5 nicht überschreitet.

Als wirksame Stützfläche ist anzusehen

$$A_w = (d_a - d_i) \cdot l_w \quad (13)$$

jedoch höchstens

$$A_w = 0,1 \cdot d_a \cdot l_w \quad (14)$$

Tafel 5. Zulässige Beanspruchung der Walzverbindung

Art der Walzverbindung	Zulässige Beanspruchung der Walzverbindung F_R/A_W in N/mm ²
glatt	150
mit Rille	300
mit Bördel	400

Die Walzlänge l_w muss mindestens 12 mm betragen und darf höchstens mit 40 mm in die Berechnung der Stützfläche eingeführt werden.

6.7.1.3 Bei eingeschweißten Rohren nach Bild 11 müssen die Schweißnähte in der Lage sein, die gesamte ins Rohr zu übertragende Kraft aufzunehmen. Die Nahtdicke im Abscherquerschnitt muss mindestens betragen

$$g = 0,4 \frac{F_R \cdot S}{d_a \cdot K} \quad (15)$$

6.7.1.4 Der Berechnung der Rohrkraft F_R ist die auf ein Rohr entfallende Belastungsfläche A_R zugrunde zu legen. Sie ist für ein vollberohrtes Feld durch die schraffierte Fläche in Bild 12 dargestellt. Bei teilweise berohrten Feldern muss der Anteil des Randfeldes berücksichtigt werden. Bei Randfeldern in ebenen Böden ist die Bodenfläche bis zum Ansatz der Bodenkrempe in Betracht zu ziehen. Bei Randfeldern in ebenen Platten kann die Belastung des Randfeldes bis zur Hälfte durch die unmittelbar angrenzende Behälterwand als aufgenommen angesehen werden.

6.7.1.5 Werden die Rohre auf Knicken beansprucht, so ist Abschnitt 6.5.3 zusätzlich zu beachten. Liegt die Knickkraft über der nach Formel (8 a) zulässigen Knickkraft, so beträgt die erforderliche Wanddicke s der Platten

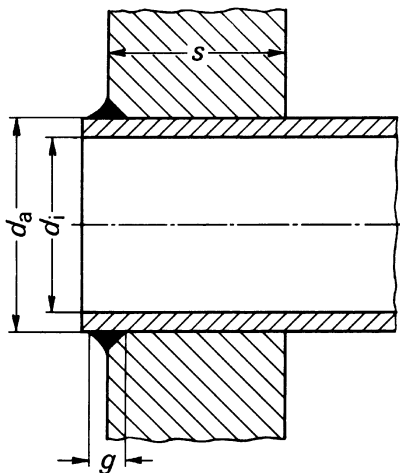


Bild 11. Schweißnahtdicke eingeschweißter Rohre

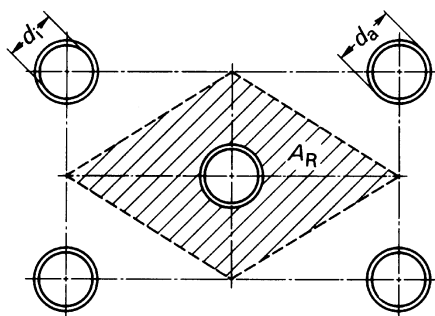


Bild 12. Belastungsfläche A_R

$$s = C \cdot \sqrt{\frac{D_1^2 - n \cdot d_1^2}{v} \cdot \frac{p_i \cdot S}{10 K} + c_1 + c_2} \quad (16)$$

Die Berchnungsbeiwerte C sind Tafel 1 bzw. Bild 5 zu entnehmen. Der Verschwächungsbeiwert wird wie folgt bestimmt

$$v = \frac{t - d_a^*}{t} \quad (17)$$

mit

$$d_a^* = \max \left\{ \left\langle d_a - 2 \cdot s_t \cdot \left(\frac{E_t}{E} \right) \cdot \left(\frac{K_t}{K} \right) \cdot \left(\frac{l_w^*}{s} \right) \right\rangle; \frac{d_a}{1,2} \right\} \quad (18)$$

In Formel (18) steht der Index „t“ für die Rohrparameter und l_w^* für die Länge der Verbindung zwischen Rohr und Rohrboden ($l_w^* = g + \sqrt{d_a \cdot s_t}$ bei eingeschweißten Rohren; $l_w^* = l_w$ bei eingewalzten Rohren; $l_w^* = g + l_w$ bei eingeschweißten und eingewalzten Rohren). E_t/E und K_t/K sowie l_w^*/s dürfen mit maximal 1 eingesetzt werden.

6.7.1.6 Formel (12) berücksichtigt nicht die Wirkung unterschiedlicher Wärmedehnung von Mantel und Rohren sowie in den Platten selbst. Wenn die Wirkung unterschiedlicher Wärmedehnung berücksichtigt werden muss, sind entsprechende Vereinbarungen zwischen Hersteller und Besteller/Betreiber zu treffen.

6.7.1.7 Sofern der Druck in den Rohren größer ist als der doppelte Wert des Druckes um die Rohre ($p_i > 2 \cdot p_u$), muss nachgewiesen werden, dass der Mantel die aus p resultierende Axialkraft zusätzlich aufnehmen kann.

6.7.2 Runde, ebene vollberohrte Platten mit rückkehrenden Rohren

6.7.2.1 Die erforderliche Wanddicke s runder, ebener vollberohrter Platten mit rückkehrenden Rohren nach Bild 13 beträgt

$$s = C \cdot D_1 \cdot \sqrt{\frac{p_i \cdot S}{10 K \cdot v} + c_1 + c_2} \quad (19)$$

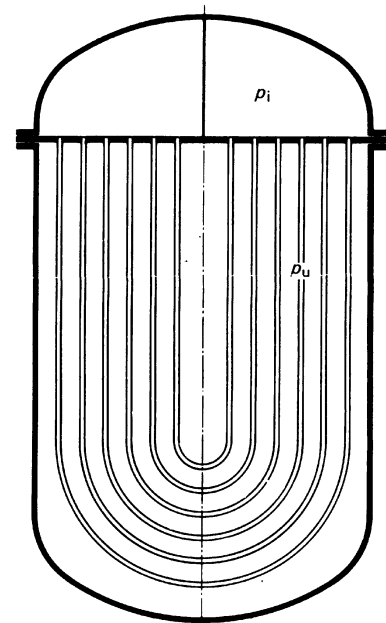


Bild 13. Runde, ebene vollberohrte Platten mit rückkehrenden Rohren

bzw.

$$s = C \cdot D_1 \cdot \sqrt{\frac{p_u \cdot S}{10 K \cdot v}} + c_1 + c_2 \quad (20)$$

Der größere Wert aus den Formeln (19) und (20) ist für die Bemessung maßgebend. Die dem jeweiligen Druckraum zugeordneten Berechnungsdurchmesser und Berechnungsbeiwerte sind Tafel 1 bzw. Bild 5 zu entnehmen. Für den Verschwächungsbeiwert gelten die Formeln (17) und (18).

6.7.2.2 Bei eingewalzten Rohren ist außerdem Abschnitt 6.7.1.2 sinngemäß zu beachten. Dabei ist

$$F_R = \frac{d_1^2 \cdot \pi \cdot p_i}{40} \quad (21)$$

6.7.3 Ebene teilweise oder ungleichmäßig bohrte Platten mit rückkehrenden Rohren

6.7.3.1 Die erforderliche Wanddicke s runder, ebener teilweise oder ungleichmäßig bohrter Platten mit rückkehrenden Rohren beträgt

$$s = C_4 \cdot D_1 \cdot \sqrt{\frac{p_i \cdot S}{10 K \cdot v}} + c_1 + c_2 \quad (22)$$

bzw.

$$s = C_4 \cdot D_1 \cdot \sqrt{\frac{p_u \cdot S}{10 K \cdot v}} + c_1 + c_2 \quad (23)$$

Entsprechend Abschnitt 6.7.2.1 ist die Wanddicke nach den Formeln (22) und (23) mit den zugehörigen C_4 -Werten zu bestimmen, wobei die größere Wanddicke für die Bemessung maßgebend ist. Die erforderliche Wanddicke der unbohrten Platte darf jedoch nicht unterschritten werden.

Die Berechnungsbeiwerte C_4 sind dem Bild 14 zu entnehmen. Für den Verschwächungsbeiwert gelten die Formeln (17) und (18).

6.7.3.2 Bei Platten mit Rohrgassen (mehrflutige Wärmeaustauscher), bei Platten, deren Rohrfeld sich nicht bis zum Plattenrand erstreckt (z. B. rechteckiges Rohrfeld), oder bei ungleichen Teilungen in den einzelnen Durchmessern konzentrischer Rohrreihen ist die Berechnung für jeden Abstand l (mittlerer Abstand der Mitten der Rohre der betrachteten Rohrreihe vom Plattenmittelpunkt) gesondert

durchzuführen, wobei der größte Wert $\frac{C_4}{\sqrt{v}}$ für die Bemessung maßgebend ist. Hinweise zur Bestimmung von l finden sich im Anhang 1.

Außerhalb des Rohrfeldes liegende Einzelrohre dürfen hierbei nicht berücksichtigt werden.

6.7.3.3 Bei eingewalzten Rohren ist außerdem Abschnitt 6.7.1.2 sinngemäß zu beachten. Dabei ist F_R nach Formel (21) zu bestimmen.

6.7.4 Runde, ebene Rohrplatten mit einer frei beweglichen Gegenplatte eines Schwimmkopfes

6.7.4.1 Die erforderliche Wanddicke s runder, ebener Rohrplatten mit einer frei beweglichen Gegenplatte nach Bild 15 beträgt

$$s = C_5 \cdot D_1 \cdot \sqrt{\frac{p_i \cdot S}{10 K \cdot v}} + c_1 + c_2 \quad (24)$$

bzw.

$$s = C_5 \cdot D_1 \cdot \sqrt{\frac{p_u \cdot S}{10 K \cdot v}} + c_1 + c_2 \quad (25)$$

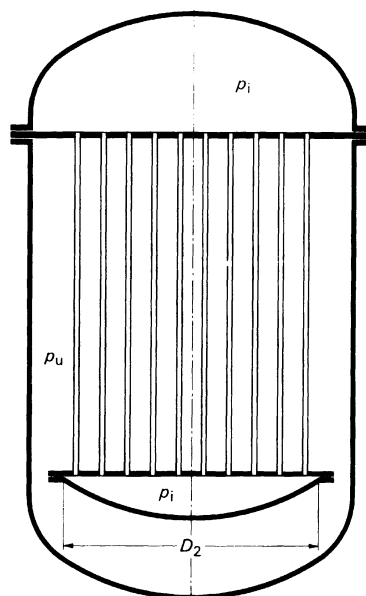


Bild 15. Runde, ebene Platten an Wärmeaustauschern, deren Rohrbündel mit einem Schwimmkopf versehen ist

Die dem jeweiligen Druckraum zugeordneten Berechnungsdurchmesser sind Tafel 1 bzw. den Bildern 3 oder 4 zu entnehmen. Der größte Wert s nach den Formeln (24) und (25) ist für die Bemessung maßgebend. Für den Verschwächungsbeiwert v gelten die Formeln (17) und (18). Für die Berechnung der erforderlichen Wanddicke s für die frei bewegliche Rohrplatte ist statt D_1 gemäß Bild 15 D_2 in die Formeln (24) und (25) einzusetzen.

6.7.4.2 Die dem jeweiligen Druckraum zugeordneten Berechnungsbeiwerte C_5 sind Bild 16 zu entnehmen. Die für die Ausführungsform maßgebende Kurve ergibt sich aus den Randbedingungen. Die für zusätzliche Randmomente maßgebenden Kurven gelten für $\delta = 1,5$ (siehe Formel [5]). Bei Dichtungen mit anderen δ -Werten muss C_5 mit dem

Faktor $\sqrt{\frac{\delta}{1,5}}$ multipliziert werden. Der Wert C_5 muss mindestens mit 0,15 in die Rechnung eingesetzt werden.

6.7.4.3 Der Abstand l ist der mittlere Abstand der Mitten der außen liegenden Rohre vom Plattenmittelpunkt zuzüglich eines halben Rohrdurchmessers. Erläuterungen zur Bestimmung von l finden sich im Anhang 1. Außerhalb des Rohrfeldes liegende Einzelrohre dürfen nicht berücksichtigt werden.

6.7.4.4 Es ist außerdem zu prüfen, ob die Randrohre (ungefähr die beiden äußeren Rohrreihen) mit ihren Verbindungen zum Rohrboden die Belastung $p_u \cdot D_2^2 \cdot \frac{\pi}{40}$ als Knick- und Druckbelastung und $p_i \cdot D_2^2 \cdot \frac{\pi}{40}$ als Zugbelastung ertragen.

Hierbei bezieht sich D_2 auf die bewegliche Rohrplatte. Ist die Beanspruchung der Randrohre zu groß, so ist die erforderliche Anzahl der tragenden Rohre zu bestimmen. Nach Abzug dieser tragenden Rohre vom vorhandenen Rohrfeld ergibt sich ein kleinerer Rohrfelddurchmesser, damit ein kleineres l' und aus Bild 16 ein größerer Wert für C_5 , mit dem die Plattendicke zu dimensionieren ist. Für die Belastung der Randrohre gilt dann als Drucklast

$p_u/40 \cdot (4 \cdot l'^2 + n \cdot d_a^2) \cdot \pi$ und als Zuglast

$p_i/40 \cdot (4 \cdot l'^2 + n \cdot d_i^2) \cdot \pi$. Dabei ist n die Anzahl der tragenden Randrohre. Wenn $\frac{l'}{D_1} < 0,1$ ist, gilt für C_5 der jeweilige Maximalwert.

6.7.4.5 Für die Knickbelastung der Rohre des inneren Rohrfeldes ist der Druck p_i maßgebend. Als Belastungsfläche eines Rohres ist die in Abschnitt 6.7.1.4 angegebene und um den Rohrquerschnitt erweiterte Belastungsfläche anzunehmen.

6.7.5 Runde, ebene Rohrplatten an Wärmeaustauschern mit einem Ausgleichselement im Mantel

6.7.5.1 Die erforderliche Wanddicke s runder, ebener Rohrplatten an Wärmeaustauschern mit einem Ausgleichselement im Mantel nach den Bildern 17 und 18 beträgt mit

$$p = p_i + p_u \cdot \frac{D_3^2 - 4 l'^2}{D_1^2} \quad (26)$$

$$s = C_5 \cdot D_1 \cdot \sqrt{\frac{p \cdot S}{10 K \cdot v}} + c_1 + c_2 \quad (27)$$

Der Durchmesser D_1 ist Tafel 1 bzw. den Bildern 3 oder 4 entsprechend den Randbedingungen im Rohrraum zu entnehmen.

Für die Bestimmung von l in Formel (26) ist Abschnitt 6.7.4.3 sinngemäß anzuwenden. Der C_5 -Wert muss aus Bild 16 entsprechend den Randbedingungen im Rohrraum entnommen werden. Abschnitt 6.7.4.2 ist zu beachten. Für den Verschleißbeiwert gelten die Formeln (17) und (18).

6.7.5.2 Es ist außerdem zu prüfen, ob die Randrohre (ungefähr die beiden äußeren Rohrreihen) mit ihren Verbindungen zum Rohrboden die Belastung $p \cdot D_1^2 \cdot \frac{\pi}{40}$ als

Zugbelastung ertragen. Hierbei ist p nach Formel (26) einzusetzen. Sind p_i oder p_u Unterdrücke, so müssen die Randrohre außerdem die Knick- und Druckbelastung $p_i \cdot D_1^2 \cdot \frac{\pi}{40}$ bzw. $p_u \cdot (D_3^2 - 4 l'^2) \cdot \frac{\pi}{40}$ ertragen können.

Ist diese Bedingung nicht erfüllt, so ist die Anzahl der tragenden Randrohre zu erhöhen. Nach Abzug dieser tragenden Rohre vom Rohrfeld ergibt sich ein kleinerer Rohrfeldhalbmesser l' und aus Bild 16 ein größerer Wert für C_5 zur Plattendimensionierung. Die Zugbelastung der Randrohre ist dann

$$[p_i \cdot (4 \cdot l'^2 + n \cdot d_i^2) + p_u \cdot (D_3^2 - 4 l'^2 - n \cdot d_a^2)] \cdot \pi / 40.$$

Sind p_i oder p_u Unterdrücke, so beträgt die Drucklast

$$p_u \cdot (D_3^2 - 4 l'^2 - n \cdot d_a^2) \cdot \pi / 40 \text{ bzw.}$$

$$p_i \cdot (4 \cdot l'^2 - n \cdot d_i^2) \cdot \pi / 40.$$

Dabei ist n die Anzahl der tragenden Randrohre. Sofern der Mantelraumdruck größer ist als der Rohrraumdruck ($p_u > p_i$), ist über die Bildung einer Gesamtspannung $\sigma = |\sigma_a| + |\sigma_t|$ nachzuweisen, dass die Randrohre die Belastung ertragen. Zur Zugspannung σ_a der Randrohre ist folgende Tangentialspannung $\sigma_t = [p_i (d_a - 2s_R) - p_u d_a] / 20s_R$ zu addieren.

Es gilt $\sigma \leq K_R / S$.

6.7.5.3 Für die Knickbelastung der Rohre des inneren Rohrfeldes ist der Druck p_i maßgebend. Als Belastungsfläche eines Rohres ist die in Abschnitt 6.7.1.4 angegebene und um den Rohrquerschnitt erweiterte Belastungsfläche anzunehmen.

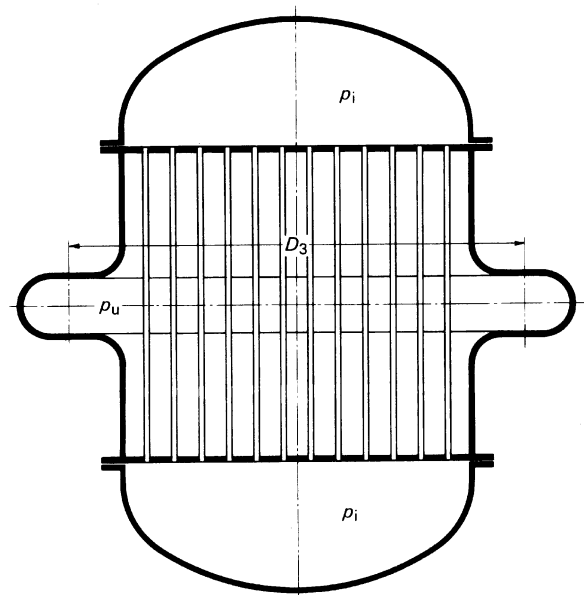


Bild 17. Runde, ebene Platten an Wärmeaustauschern mit einem Kompensator im Mantel

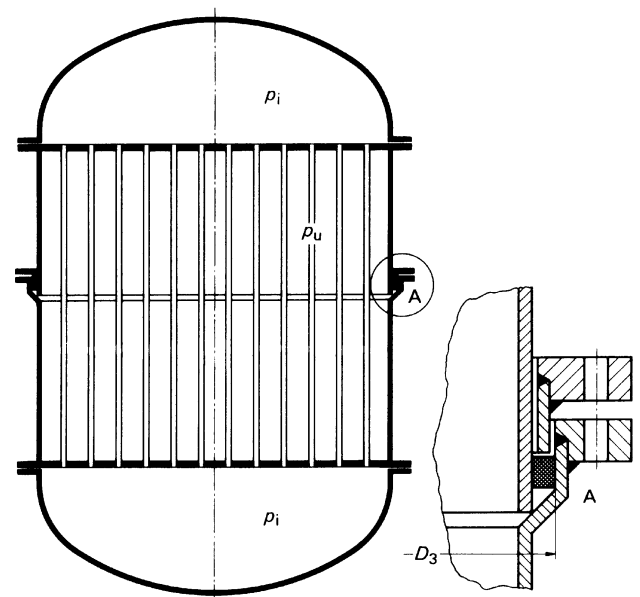


Bild 18. Runde, ebene Platten an Wärmeaustauschern mit einer Stopfbüchse im Mantel

6.7.6 Runde, ebene Rohrplatten an Wärmeaustauschern mit einer die bewegliche Rohrplatte abdichtenden Stopfbüchse

6.7.6.1 Die erforderliche Wanddicke s runder, ebener Rohrplatten an Wärmeaustauschern mit einer die bewegliche Rohrplatte abdichtenden Stopfbüchse nach Bild 19 wird nach Formel (27) berechnet, wobei für die feststehende Rohrplatte

$$p = p_i \cdot \frac{D_1^2 - D_4^2}{D_1^2} \quad (28)$$

bzw.

$$p = p_u \cdot \frac{D_1^2 - D_4^2}{D_1^2} \quad (29)$$

und für die bewegliche Rohrplatte

$$p = p_1 \cdot \frac{D_4^2 - 4l^2}{D_1^2} \quad (30)$$

bzw.

$$p = p_u \cdot \frac{D_4^2 - 4l^2}{D_1^2} \quad (31)$$

einzusetzen ist. Maßgebend für die Berechnung ist jeweils der größere Wert nach der Rechnung entsprechend den Formeln (28) und (29) bzw. (30) und (31). Bei der beweglichen Rohrplatte ist statt C_5 der Wert 0,45 einzusetzen. Für die Bestimmung von l in den Formeln (30) und (31) ist Abschnitt 6.7.4.3 sinngemäß anzuwenden.

6.7.6.2 Die Beurteilung der Zug- und Druckbeanspruchung der Rohre sowie der Knicksteifigkeit ist sinngemäß nach Abschnitt 6.7.5 für die mittlere Belastung der Rohre durchzuführen.

6.7.7 Runde, ebene Rohrplatten mit überstehenden Flanschrändern an Wärmeaustauschern

6.7.7.1 Die erforderliche Wanddicke s im Bereich des Berechnungsdurchmessers D_1 runder, ebener Rohrplatten mit überstehenden Flanschrändern nach Bild 20 wird nach den Abschnitten 6.7.1 bis 6.7.6 berechnet.

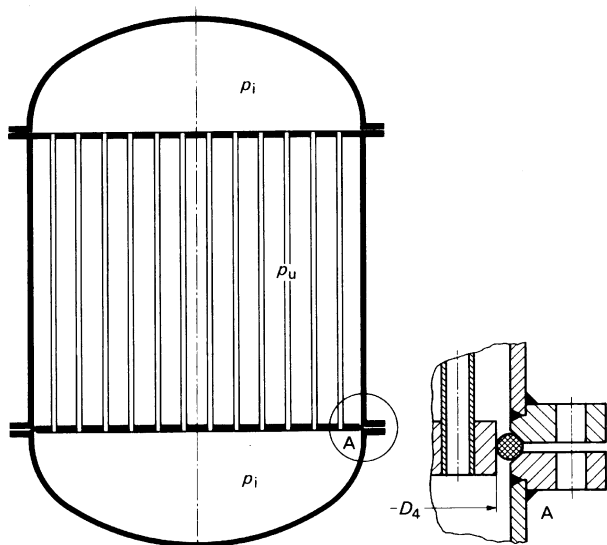


Bild 19. Runde, ebene Platten an Wärmeaustauschern mit einer am beweglichen Boden abdichtenden Stopfbüchse

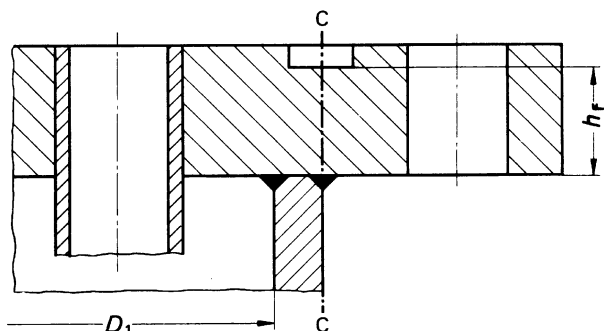


Bild 20. Runde, ebene Rohrplatten mit überstehendem Flanschrand

6.7.7.2 Bei durchgehenden Rohrplatten entsprechend Bild 20 ist der überstehende Rand zusätzlich nach der Vornorm DIN 2505 (10.64) im Querschnitt C-C nachzurechnen.

6.7.7.3 Die Beurteilung der Axialbeanspruchung im Mantel ist sinngemäß nach Abschnitt 6.7.1.7 vorzunehmen.

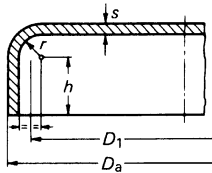
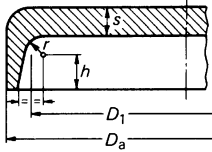
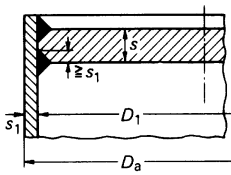
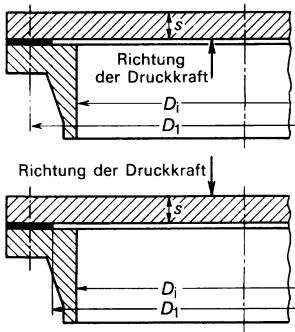
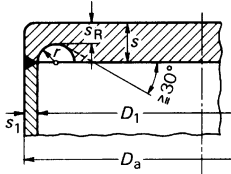
6.8 Rechteckige ebene Platten an Wärmeaustauschern

Rechteckige behrte Platten werden in Abhängigkeit von ihrer konstruktiven Form sinngemäß nach den Abschnitten 6.7.1 bis 6.7.6 unter Einbeziehung des Berechnungswertes C_E nach Bild 2 behandelt; das heißt, in den jeweils anzuwendenden Formeln ist der C -Wert mit C_E zu multiplizieren. Die C -Werte werden entsprechend Abschnitt 6.4 aus den auf die Schmalseite der Platte bezogenen geometrischen Verhältnissen bestimmt. In den maßgebenden Gleichungen wird der Berechnungsdurchmesser D_1 durch die Länge der schmalen Plattenseite f ersetzt.

7 Schrifttum

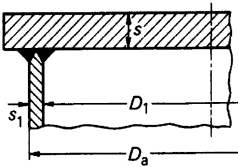
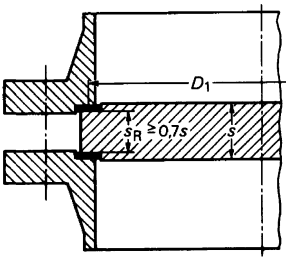
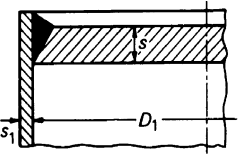
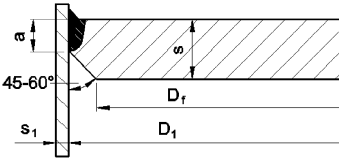
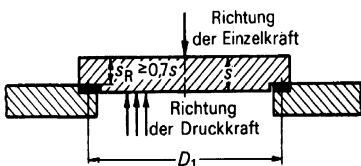
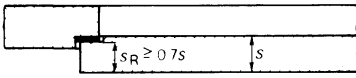
- [1] *Föppl, A.*: Vorlesungen über Techn. Mechanik; Bd. III, Festigkeitslehre. Teubner Verlag, Berlin (1922).
- [2] *Timoshenko, S.*: Theory of plates and shells. McGRAW Hill Book Company, Inc., New York/London (1940).
- [3] *Filonenko-Boroditsch*: Festigkeitslehre. VEB Verlag Technik, Berlin (1954).
- [4] *Hampe, E.*: Statik rotationssymmetrischer Flächen-tragwerke; Bd. 1. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin (1966).
- [5] *Föppl, L. u. G. Sonntag*: Tafeln und Tabellen zur Festigkeitslehre. Oldenbourg-Verlag, München (1951).
- [6] *Miller, K. A. G.*: The Design of Tube Plates in Heat-Exchangers. Proc. Inst. Mech. Engineers Series B, Vol. 1 (1952) S. 215/31.
- [7] *Sterr, G.*: Berechnungsfragen von Rohrböden im Druckbehälterbau. Verlag Ernst & Sohn, München (1967).
- [8] *Sterr, G.*: Die genaue Ermittlung des C -Wertes für die am Rande mit einem Schuß verschweißte Kreisvollplatte unter Berücksichtigung der im Schuß auftretenden Spannungen. Techn. Überwach. 4 (1963) Nr. 4, S. 140/43.
- [9] *Wellinger, K. u. H. Dietmann*: Bestimmung von Formdehngrenzen. Materialprüfung 4 (1962) Nr. 2, S. 41/47.
- [10] *Siebel, E.*: Festigkeitsrechnung bei ungleichförmiger Beanspruchung. Die Technik 1 (1946) Nr. 6, S. 265/69.
- [11] *Hübner, F.-W.*: Berechnung der Axialkraft von Ankern und Ankerrohren zur zentralen Verankerung ebener Böden. Techn. Überwach. 9 (1968) Nr. 3, S. 95/97.
- [12] Physikhütte, 29. Auflage, S. 240ff.
- [13] *Dietmann, H.*: Spannungen in Lochfeldern. Konstruktion 18 (1966) H. 1, S. 12/23.
- [14] *Nadai, A.*: Die elastischen Platten. Springer-Verlag Heidelberg, Berlin, New York (1968).
- [15] *Sterr, G.*: Die festigkeitsmäßige Berechnung von Wärmetauschern mit geraden Rohren. Verlag TÜV Bayern, München (1975).
- [16] Hütte I, 28. Auflage, S. 940ff.
- [17] *Schwaigerer, S.*: Festigkeitsberechnung im Dampfkessel-, Behälter- und Rohrleitungsbau; 4. Auflage (1983), Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York.

Tafel 1. Berechnungsbeiwerte unverankerter runder ebener Böden und Platten ohne zusätzliches Randmoment

Ausführungsform (nur schematische Darstellung)	Voraussetzungen	Berechnungs- beiwert C												
<p>a) gekrempter ebener Boden</p> 	<p>1. Krempenhalbmesser:</p> <table border="1"><thead><tr><th>D_a</th><th>r Mindest- maß</th></tr></thead><tbody><tr><td>bis 500</td><td>30</td></tr><tr><td>über 500 bis 1400</td><td>35</td></tr><tr><td>über 1400 bis 1600</td><td>40</td></tr><tr><td>über 1600 bis 1900</td><td>45</td></tr><tr><td>über 1900</td><td>50</td></tr></tbody></table> <p>und $r \geq 1,3 s$</p> <p>2. Bordhöhe: $h \geq 3,5 s$</p>	D_a	r Mindest- maß	bis 500	30	über 500 bis 1400	35	über 1400 bis 1600	40	über 1600 bis 1900	45	über 1900	50	0,30
D_a	r Mindest- maß													
bis 500	30													
über 500 bis 1400	35													
über 1400 bis 1600	40													
über 1600 bis 1900	45													
über 1900	50													
<p>b) geschmiedeter oder gepresster ebener Boden</p> 	<p>1. Krempenhalbmesser:</p> <p>$r \geq \frac{s}{3}$, jedoch nicht weniger als 8 mm</p> <p>2. Bordhöhe: $h \geq s$</p>	0,35												
<p>c) beidseitig eingeschweißte Platte</p> 	<p>Plattenwanddicke: $s \leq 3 s_1$ $s > 3 s_1$</p>	0,35 0,40												
<p>d) ebene Platte an einer Flanschverbindung mit durchgehender Dichtung</p> 	$D_1 \geq D_i$	0,35												
<p>e) ebene Platte mit Entlastungsnut¹⁾</p>  <p>s_1 = ausgeführte Wanddicke des zylindrischen Teils des Bodens im Anschluss an den zylindrischen Mantel</p>	<p>1. Restwanddicke in der Nut:</p> $s_R \geq \frac{p}{10} \left(\frac{D_1}{2} - r \right) \frac{1,3 S}{K}, \text{ jedoch}$ <p>nicht weniger als 5 mm und bei $D_a > 1,2 D_1$ $s_R \leq 0,77 s_1$</p> <p>2. Nutenhalbmesser: $r \geq 0,2 s$, jedoch nicht weniger als 5 mm und</p> <p>3. Es dürfen nur beruhigt vergossene Stähle verwendet werden. Bei der Verwendung von Ble- chen darf die Platte im Bereich der Schweißnaht in einer Breite von min- destens $3 s_1$ keine Dopplungen aufweisen²⁾.</p> <p>4. Bei besonderer Beanspruchung z. B. im Zeitstandsbereich ist diese Ausfüh- rungsform ohne besonderen Nach- weis nicht geeignet.</p>	0,40												

AD 2000-Merkblatt

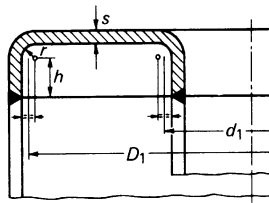
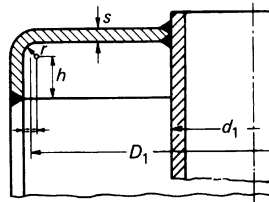
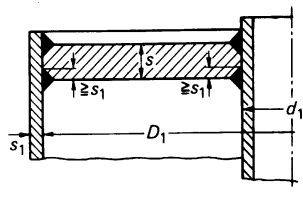
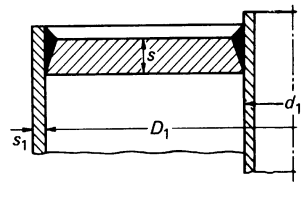
Seite 10 AD 2000-Merkblatt B 5, Ausg. 03.2009

Ausführungsform (nur schematische Darstellung)	Voraussetzungen	Berechnungs- beiwert C
<p>f) beidseitig aufgeschweißte Platte</p> 	<p>Plattenwanddicke: $s \leq 3 s_1$ $s > 3 s_1$</p> <p>Es dürfen nur beruhigt vergossene Stähle verwendet werden. Bei der Verwendung von Blechen darf die Platte im Bereich der Schweißnaht in einer Breite von mindestens $3 s_1$ keine Dopplungen aufweisen.²⁾</p>	<p>0,40 0,45</p>
<p>g) beidseitig frei aufliegende ebene Platte</p> 	<p>Restwanddicke am Dichtungskreis oder in Nuten $s_R \geq 0,7 s$</p>	<p>0,40</p>
<p>h) einseitig eingeschweißte Platte</p> 	<p>Plattenwanddicke: $s \leq 3 s_1$ $s > 3 s_1$</p>	<p>0,45 0,50</p>
<p>i) partiell durchgeschweißte ebene Platte</p> 	<p>Plattenwanddicke: $s \leq 3 s_1$ $s > 3 s_1$</p> <p>Bedingungen für a: $a \geq 0,5 s$ und $a \geq 1,4 s_1$ $D_f/D_1 \geq 0,7$</p>	<p>0,45 0,50</p>
<p>k) von außen vorgelegte ebene Platte</p> 	<p>1. Restwanddicke am Dichtungskreis: $s_R \geq 0,7 s$ 2. Weichstoffdichtung $D_1 \leq 500 \text{ mm}$</p>	<p>1,25</p>
<p>l) von innen vorgelegte ebene Platte</p> 	<p>Restwanddicke am Dichtungskreis: $s_R \geq 0,7 s$</p>	<p>0,45</p>

¹⁾ Andere Querschnittsformen der Entlastungsnut können spannungsgünstiger sein und sind bei dementsprechendem Nachweis zulässig.

²⁾ Dies ist in der Regel erfüllt, wenn die Prüfungen nach den Stahl-Eisen-Lieferbedingungen DIN EN 10160 Qualitätsklasse E 3 durchgeführt wurden. Dies kann bereits bei der Bestellung vereinbart werden.

Tafel 2. Berechnungsbeiwerte runder ebener Böden und Platten mit einer zentralen Verankerung

Ausführungsform (nur schematische Darstellung)	Voraussetzungen	Berechnungs- beiwert C_2												
<p>gekrempter ebener Boden</p> <p>a) mit Einhausung</p>  <p>oder</p> <p>b) mit durchgestecktem Anker</p> 	<p>1. Kreppehalbmesser:</p> <table><tr><th>D_a</th><th>r Mindest- maß</th></tr><tr><td>bis 500</td><td>30</td></tr><tr><td>über 500 bis 1400</td><td>35</td></tr><tr><td>über 1400 bis 1600</td><td>40</td></tr><tr><td>über 1600 bis 1900</td><td>45</td></tr><tr><td>über 1900</td><td>50</td></tr></table> <p>und $r \geq 1,3 s$</p> <p>2. Bordhöhe: $h \geq 3,5 s$</p>	D_a	r Mindest- maß	bis 500	30	über 500 bis 1400	35	über 1400 bis 1600	40	über 1600 bis 1900	45	über 1900	50	0,25
D_a	r Mindest- maß													
bis 500	30													
über 500 bis 1400	35													
über 1400 bis 1600	40													
über 1600 bis 1900	45													
über 1900	50													
<p>c) beidseitig eingeschweißte Platte mit durchgestecktem Anker</p> 	<p>Plattendicke:</p> <p>$s \leq 3 s_1$</p> <p>$s > 3 s_1$</p>	0,30 0,35												
<p>d) einseitig eingeschweißte Platte mit durchgestecktem Anker</p> 	<p>Plattendicke:</p> <p>$s \leq 3 s_1$</p> <p>$s > 3 s_1$</p>	0,40 0,45												

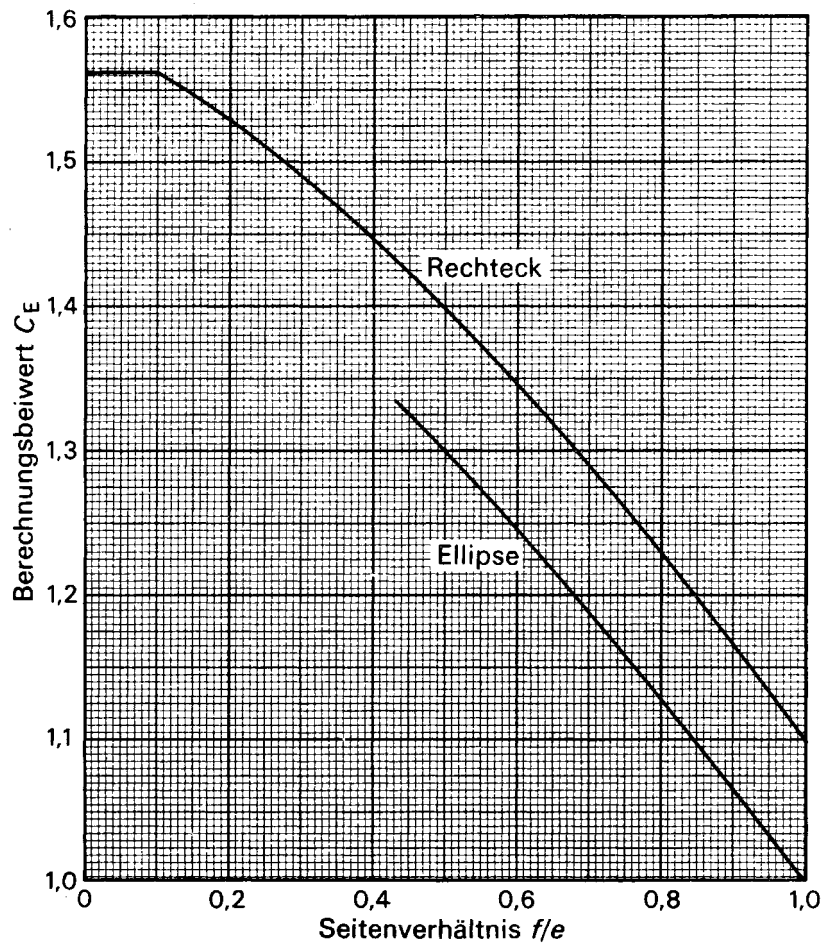


Bild 2. Berechnungsbeiwert C_E rechteckiger oder elliptischer Platten

Rechteckige Platten

f = schmale Seite der rechteckigen Platte
 e = breite Seite der rechteckigen Platte

$$C_E = \begin{cases} \sum_{i=1}^4 A_i \cdot \left(\frac{f}{e}\right)^{i-1} & \left| 0,1 < \left(\frac{f}{e}\right) \leq 1,0 \right. \\ 1,562 & \left| 0 < \left(\frac{f}{e}\right) \leq 0,1 \right. \end{cases}$$

$$\begin{aligned} A_1 &= 1,58914600 \\ A_2 &= -0,23934990 \\ A_3 &= -0,33517980 \\ A_4 &= 0,08521176 \end{aligned}$$

Elliptische Platten

f = schmale Seite der elliptischen Platte
 e = breite Seite der elliptischen Platte

$$C_E = \sum_{i=1}^4 A_i \cdot \left(\frac{f}{e}\right)^{i-1} \quad \left| 0,43 \leq \left(\frac{f}{e}\right) \leq 1,0 \right.$$

$$\begin{aligned} A_1 &= 1,48914600 \\ A_2 &= -0,23934990 \\ A_3 &= -0,33517980 \\ A_4 &= 0,08521176 \end{aligned}$$

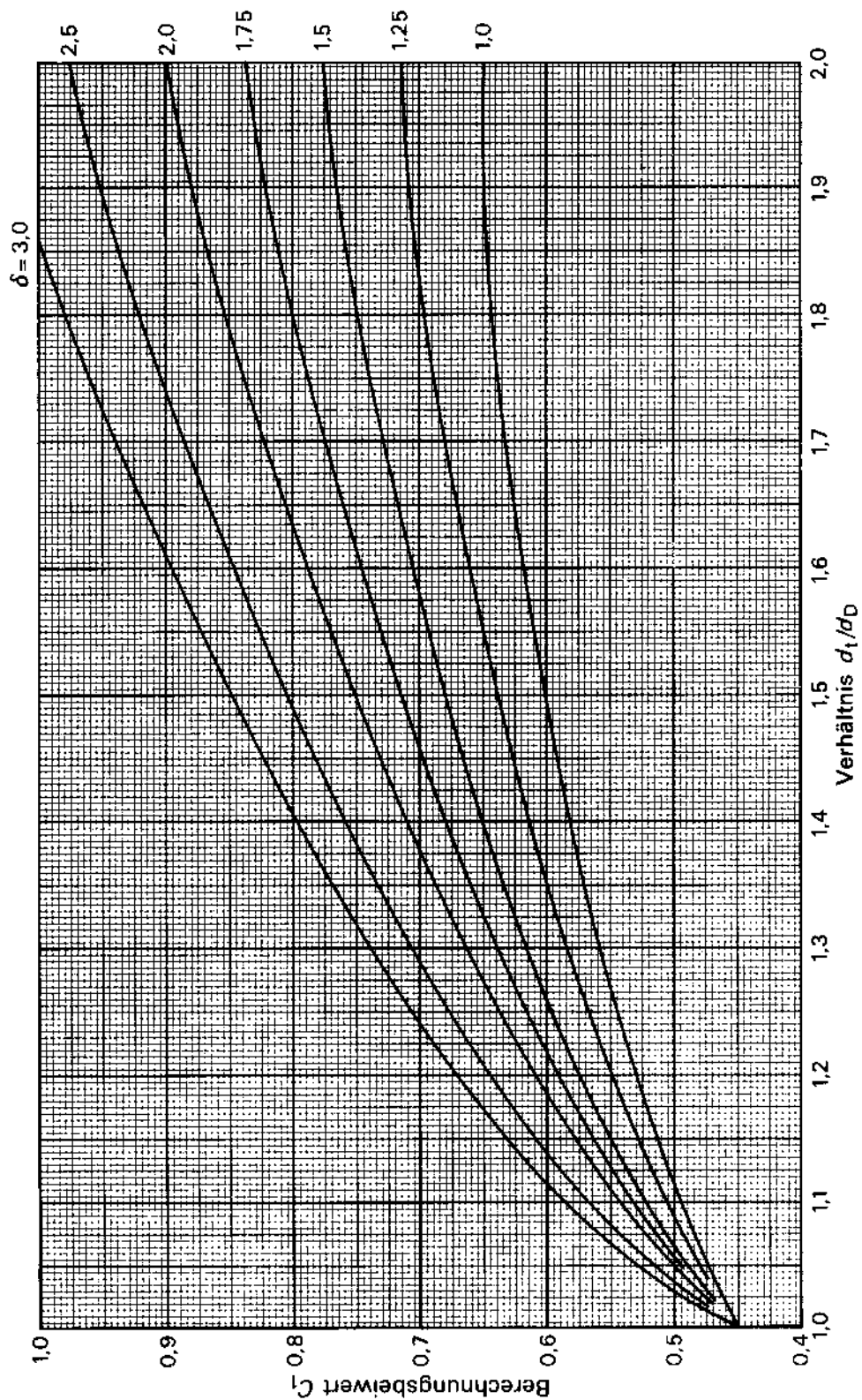


Bild 5. Berechnungsbeiwert C_1 von Platten mit zusätzlichem gleichsinnigem Randmoment
(Anm.: Approximationsfunktionen in Vorbereitung)

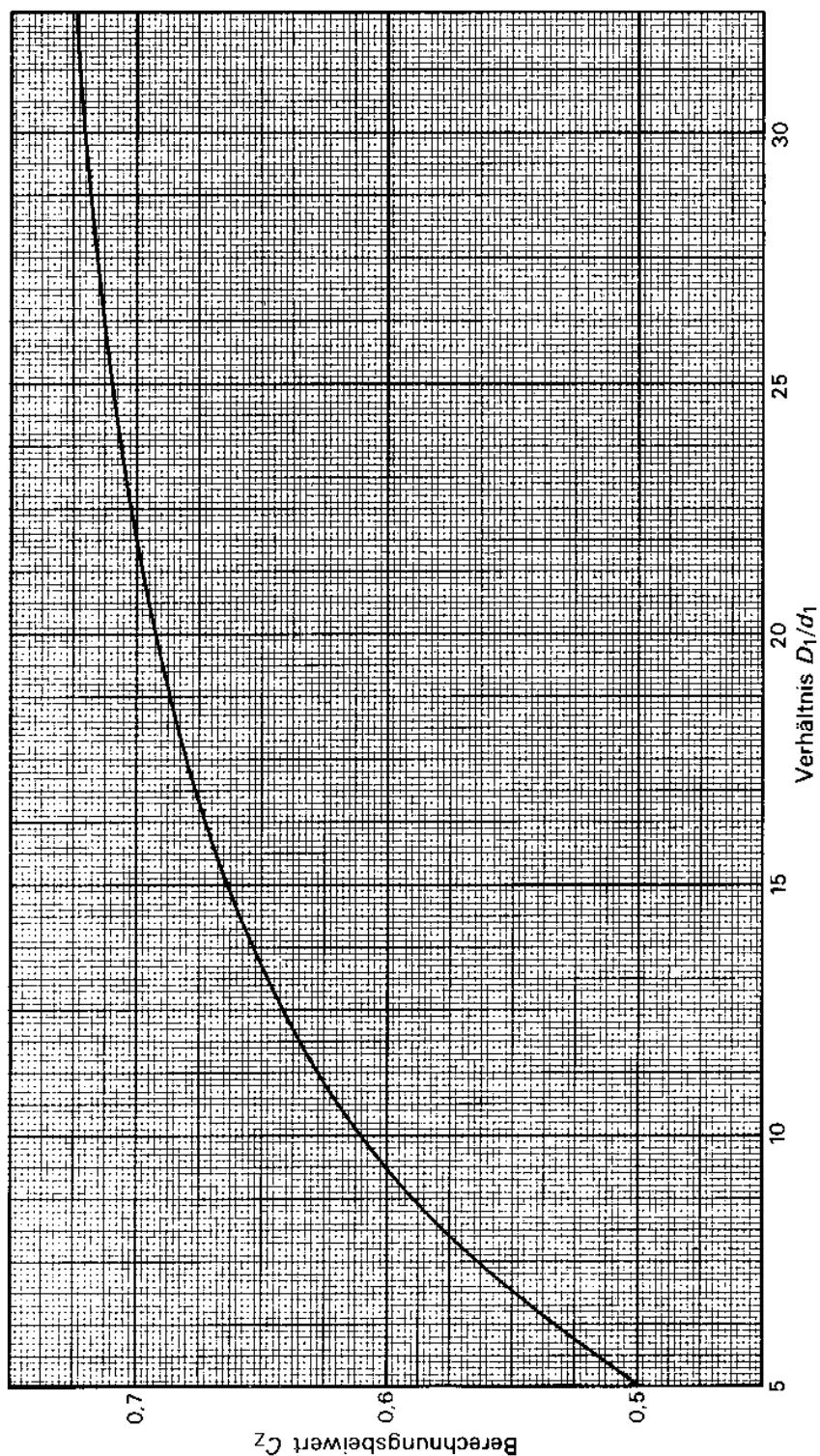


Bild 6. Berechnungsbeiwert C_z zentraler Anker

Zentrale Anker

D_1 und d_1 = Berechnungsdurchmesser nach Tafel 2 aus AD-Merkblatt B 5

$$C_z = \sum_{i=1}^8 A_i \cdot \left(\frac{D_1}{d_1} \right)^{i-1} \quad \left| \quad 5 \leq \frac{D_1}{d_1} \leq 32,5 \right|$$

$$\begin{aligned} A_1 &= 0,4092950 \\ A_2 &= -0,1073072 \cdot 10^{-1} \\ A_3 &= 0,1128268 \cdot 10^{-1} \\ A_4 &= -0,1518604 \cdot 10^{-2} \\ A_5 &= 0,9880992 \cdot 10^{-4} \\ A_6 &= -0,3485928 \cdot 10^{-5} \\ A_7 &= 0,6391361 \cdot 10^{-7} \\ A_8 &= -0,4773844 \cdot 10^{-9} \end{aligned}$$

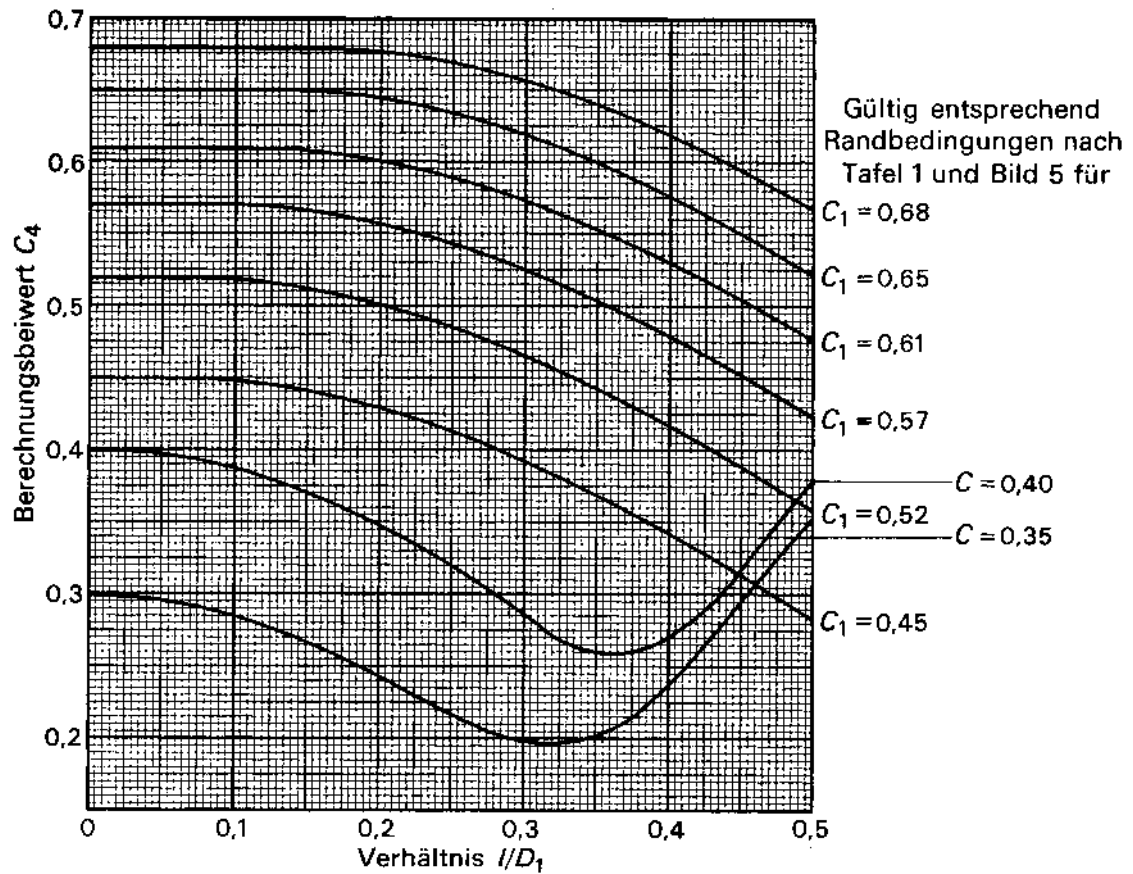


Bild 14. Berechnungsbeiwert C_4 für Rohrplatten mit rückkehrenden Rohren
(Anm.: Approximationsfunktionen in Vorbereitung)

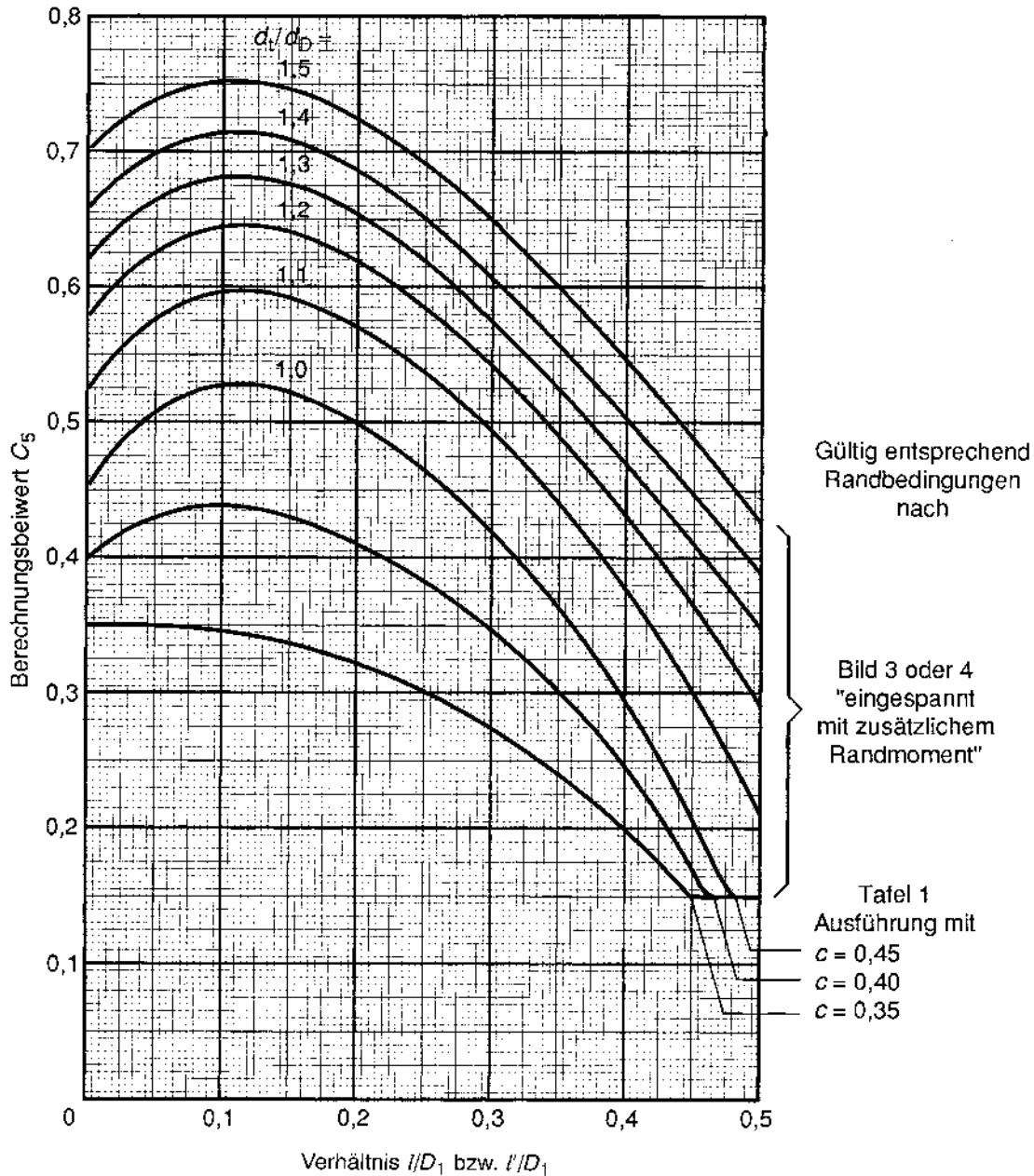


Bild 16. Berechnungsbeiwert C_5 für Rohrplatten mit einer frei beweglichen Gegenplatte

Berechnungsbeiwert C_5 für Rohrplatten mit zusätzlichem Randmoment nach Bild 3 oder Bild 4

l = mittlerer Abstand der Mitten der Rohre der betrachteten Rohrreihe vom Plattenmittelpunkt

D_1 = Berechnungsdurchmesser

d_t = Teilkreisdurchmesser

d_D = mittlerer Dichtungsdurchmesser

$$C_5 = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 A_{ij} \cdot \left(\frac{l}{D_1} \right)^{i-1} \cdot \left(\frac{d_t}{d_D} \right)^{j-1} \quad \left| \begin{array}{l} 0 < \left(\frac{l}{D_1} \right) \leq 0,5 \\ 1,0 \leq \left(\frac{d_t}{d_D} \right) \leq 1,5 \\ C_5 \geq 0,15 \end{array} \right.$$

$$\begin{aligned}
 A_{11} &= -0,236012836 \cdot 10^{+1}; A_{12} = 0,545217668 \cdot 10^{+1}; A_{13} = -0,311489659 \cdot 10^{+1}; A_{14} = 0,308300374 \\
 A_{15} &= 0,168134309 \\
 A_{21} &= 0,101396274 \cdot 10^{+1}; A_{22} = 0,109609483 \cdot 10^{+1}; A_{23} = 0,162822737 \cdot 10^{+1}; A_{24} = -0,345692712 \cdot 10^{+1} \\
 A_{25} &= 0,126083679 \cdot 10^{+1} \\
 A_{31} &= -0,316517682 \cdot 10^{+2}; A_{32} = 0,412763296 \cdot 10^{+2}; A_{33} = -0,369557657 \cdot 10^{+2}; A_{34} = 0,248045141 \cdot 10^{+2} \\
 A_{35} &= -0,727898100 \cdot 10^{+1} \\
 A_{41} &= 0,472852891 \cdot 10^{+2}; A_{42} = -0,522484275 \cdot 10^{+1}; A_{43} = -0,334202904 \cdot 10^{+1}; A_{44} = -0,426049735 \cdot 10^{+2} \\
 A_{45} &= 0,236709739 \cdot 10^{+2} \\
 A_{51} &= -0,821294529 \cdot 10^{+2}; A_{52} = 0,122221210 \cdot 10^{+3}; A_{53} = -0,167734885 \cdot 10^{+3}; A_{54} = 0,166614761 \cdot 10^{+3} \\
 A_{55} &= -0,574166821 \cdot 10^{+2}
 \end{aligned}$$

Berechnungsbeiwert C_5 für Rohrplatten ohne zusätzliches Randmoment mit $C = 0,45$ nach Tafel 1

l = mittlerer Abstand der Mitten der Rohre der betrachteten Rohrreihe vom Plattenmittelpunkt

D_1 = Berechnungsdurchmesser

$$C_5 = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 A_{ij} \cdot \left(\frac{l}{D_1} \right)^{i-1} \left| 0 < \left(\frac{l}{D_1} \right) \leq 0,5 \right. \\
 \left. C_5 \geq 0,15 \right.$$

$$\begin{aligned}
 A_{11} &= -0,236012836 \cdot 10^{+1}; A_{12} = 0,545217668 \cdot 10^{+1}; A_{13} = -0,311489659 \cdot 10^{+1}; A_{14} = 0,308300374 \\
 A_{15} &= 0,168134309 \\
 A_{21} &= 0,101396274 \cdot 10^{+1}; A_{22} = 0,109609483 \cdot 10^{+1}; A_{23} = 0,162822737 \cdot 10^{+1}; A_{24} = -0,345692712 \cdot 10^{+1} \\
 A_{25} &= 0,126083679 \cdot 10^{+1} \\
 A_{31} &= -0,316517682 \cdot 10^{+2}; A_{32} = 0,412763296 \cdot 10^{+2}; A_{33} = -0,369557657 \cdot 10^{+2}; A_{34} = 0,248045141 \cdot 10^{+2} \\
 A_{35} &= -0,727898100 \cdot 10^{+1} \\
 A_{41} &= 0,472852891 \cdot 10^{+2}; A_{42} = -0,522484275 \cdot 10^{+1}; A_{43} = -0,334202904 \cdot 10^{+1}; A_{44} = -0,426049735 \cdot 10^{+2} \\
 A_{45} &= 0,236709739 \cdot 10^{+2} \\
 A_{51} &= -0,821294529 \cdot 10^{+2}; A_{52} = 0,122221210 \cdot 10^{+3}; A_{53} = -0,167734885 \cdot 10^{+3}; A_{54} = 0,166614761 \cdot 10^{+3} \\
 A_{55} &= -0,574166821 \cdot 10^{+2}
 \end{aligned}$$

Berechnungsbeiwert C_5 für Rohrplatten ohne zusätzliches Randmoment mit $C = 0,4$ nach Tafel 1

l = mittlerer Abstand der Mitten der Rohre der betrachteten Rohrreihe vom Plattenmittelpunkt

D_1 = Berechnungsdurchmesser

$$C_5 = \sum_{i=1}^6 A_i \cdot \left(\frac{l}{D_1} \right)^{i-1} \left| 0 < \left(\frac{l}{D_1} \right) \leq 0,5 \right. \\
 \left. C_5 \geq 0,15 \right.$$

$$\begin{aligned}
 A_1 &= 0,399827021 \\
 A_2 &= 0,870316825 \\
 A_3 &= -0,547933931 \\
 A_4 &= 0,622283882 \cdot 10^{+1} \\
 A_5 &= 0,747769988 \cdot 10^{+1} \\
 A_6 &= -0,208753919 \cdot 10^{+2}
 \end{aligned}$$

Berechnungsbeiwert C_5 für Rohrplatten ohne zusätzliches Randmoment mit $C = 0,35$ nach Tafel 1

l = mittlerer Abstand der Mitten der Rohre der betrachteten Rohrreihe vom Plattenmittelpunkt

D_1 = Berechnungsdurchmesser

$$C_5 = \sum_{i=1}^6 A_i \cdot \left(\frac{l}{D_1} \right)^{i-1} \left| 0 < \left(\frac{l}{D_1} \right) \leq 0,5 \right. \\
 \left. C_5 \geq 0,15 \right.$$

$$\begin{aligned}
 A_1 &= 0,350103983 \\
 A_2 &= 0,426355908 \cdot 10^{-2} \\
 A_3 &= -0,153280871 \\
 A_4 &= -0,474043872 \cdot 10^{+1} \\
 A_5 &= 0,109862460 \cdot 10^{+2} \\
 A_6 &= -0,103370105 \cdot 10^{+2}
 \end{aligned}$$

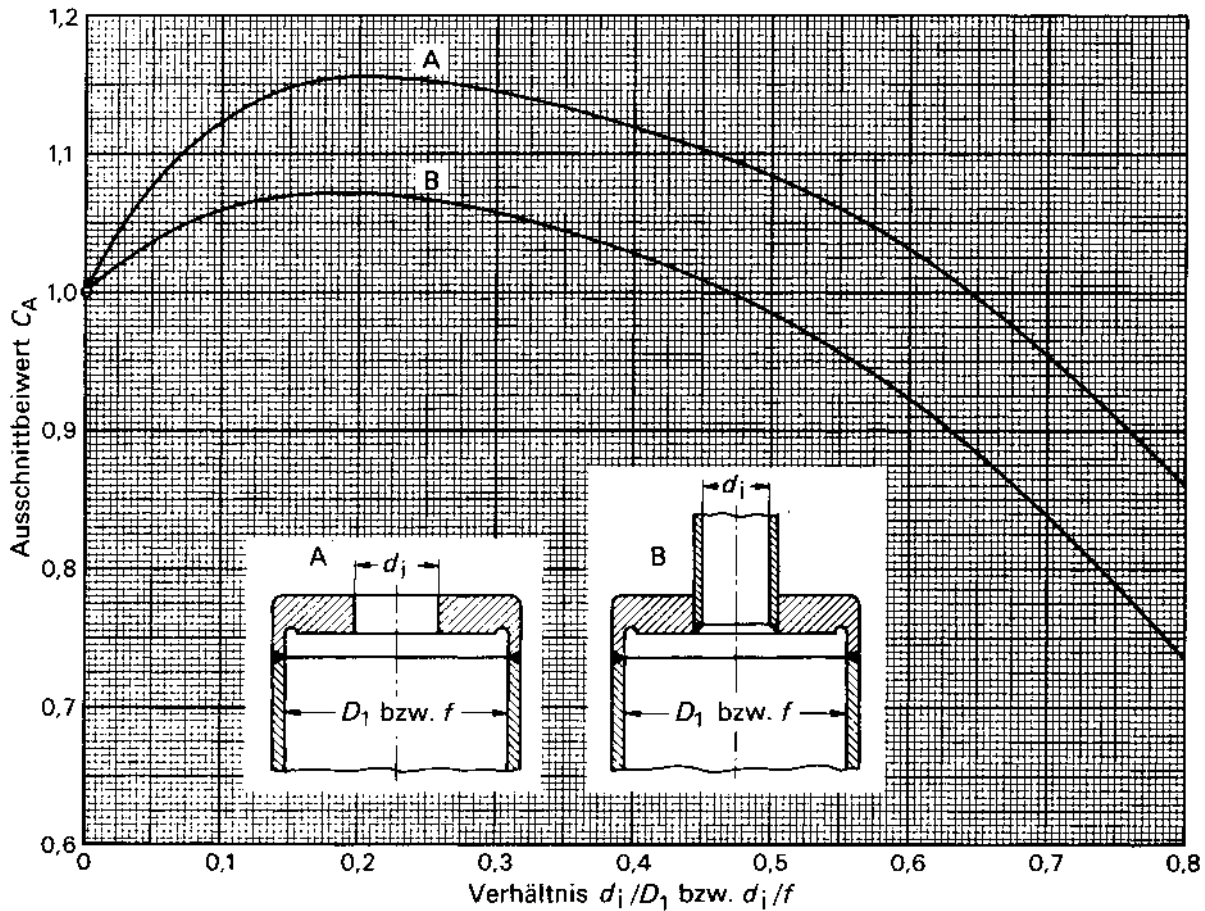


Bild 21. Ausschnittbeiwert C_A für ebene Böden und Platten ohne zusätzliches Randmoment

Ausführungsform A

d = Innendurchmesser des Ausschnittes
 D_1 = Berechnungsdurchmesser
 f = schmale Seite eines elliptischen Bodens

$$C_A = \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^6 A_i \cdot \left(\frac{d}{D_1} \right)^{i-1} \quad \left| \quad 0 < \left(\frac{d}{D_1} \right) \leq 0,8 \right. \\ \sum_{i=1}^6 A_i \cdot \left(\frac{d}{f} \right)^{i-1} \quad \left| \quad 0 < \left(\frac{d}{f} \right) \leq 0,8 \right. \end{array} \right\}$$

$A_1 = 0,99903420$
 $A_2 = 1,98062600$
 $A_3 = -9,01855400$
 $A_4 = 18,63283000$
 $A_5 = -19,49759000$
 $A_6 = 7,61256800$

Ausführungsform B

d = Innendurchmesser des Ausschnittes
 D_1 = Berechnungsdurchmesser
 f = schmale Seite eines elliptischen Bodens

$$C_A = \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^6 A_i \cdot \left(\frac{d}{D_1} \right)^{i-1} \quad \left| \quad 0 < \left(\frac{d}{D_1} \right) \leq 0,8 \right. \\ \sum_{i=1}^6 A_i \cdot \left(\frac{d}{f} \right)^{i-1} \quad \left| \quad 0 < \left(\frac{d}{f} \right) \leq 0,8 \right. \end{array} \right\}$$

$A_1 = 1,00100344$
 $A_2 = 0,94428468$
 $A_3 = -4,31210200$
 $A_4 = 8,38943500$
 $A_5 = -9,20628384$
 $A_6 = 3,69494196$

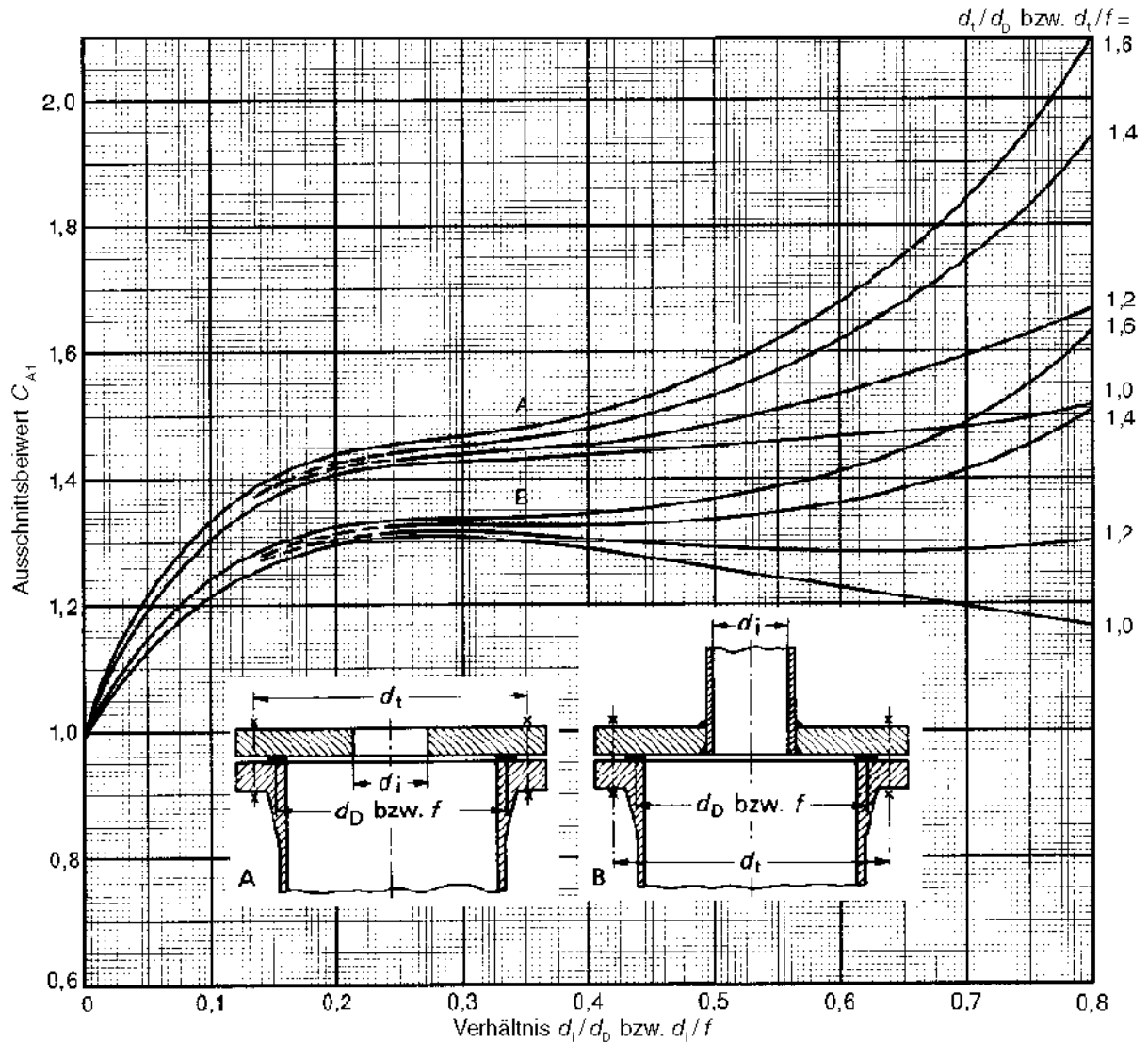


Bild 22. Ausschnittsbewert C_{A1} für Platten mit zusätzlichem Randmoment

Ausführungsform A

- d = Innendurchmesser des Ausschnittes
 d_t = Teilkreisdurchmesser
 d_0 = mittlerer Dichtungsdurchmesser
 f = schmale Seite eines elliptischen Bodens

$$C_{A1} = \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^4 A_{ij} \cdot \left(\frac{d}{d_0} \right)^{i-1} \cdot \left(\frac{d_t}{d_0} \right)^{j-1} \quad \left| \begin{array}{l} 0 < \left(\frac{d}{d_0} \right) \leq 0,8 \\ 1,0 \leq \left(\frac{d_t}{d_0} \right) \leq 1,6 \end{array} \right. \\ \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^4 A_{ij} \cdot \left(\frac{d}{f} \right)^{i-1} \cdot \left(\frac{d_t}{f} \right)^{j-1} \quad \left| \begin{array}{l} 0 < \left(\frac{d}{f} \right) \leq 0,8 \\ 1,0 \leq \left(\frac{d_t}{f} \right) \leq 1,6 \end{array} \right. \end{array} \right\}$$

$A_{11} = 0,78361000;$	$A_{12} = 0,57648980;$	$A_{13} = -0,50133500;$	$A_{14} = 0,14374330$
$A_{21} = -6,17657500;$	$A_{22} = 25,97413000;$	$A_{23} = -20,20477000;$	$A_{24} = 5,25115300$
$A_{31} = 55,15520000;$	$A_{32} = -187,50120000;$	$A_{33} = 151,22980000;$	$A_{34} = -40,46585000$
$A_{41} = -102,76280000;$	$A_{42} = 385,65620000;$	$A_{43} = -328,17740000;$	$A_{44} = 92,13028000$
$A_{51} = 17,63476000;$	$A_{52} = -218,65220000;$	$A_{53} = 223,86580000;$	$A_{54} = -71,60025000$
$A_{61} = 76,13799000;$	$A_{62} = 99,25291000;$	$A_{63} = 46,20896000;$	$A_{64} = -3,45883000$

AD 2000-Merkblatt

Seite 20 AD 2000-Merkblatt B 5, Ausg. 03.2009

Ausführungsform B

d = Innendurchmesser des Ausschnittes
 d_t = Teilkreisdurchmesser
 d_D = mittlerer Dichtungsdurchmesser
 f = schmale Seite eines elliptischen Bodens

$$C_{A1} = \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^4 A_{ij} \cdot \left(\frac{d}{d_D} \right)^{i-1} \cdot \left(\frac{d_t}{d_D} \right)^{j-1} \quad \left| \quad \begin{array}{l} 0 < \left(\frac{d}{d_D} \right) \leq 0,8 \\ 1,0 \leq \left(\frac{d_t}{d_D} \right) \leq 1,6 \end{array} \right. \\ \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^4 A_{ij} \cdot \left(\frac{d}{f} \right)^{i-1} \cdot \left(\frac{d_t}{f} \right)^{j-1} \quad \left| \quad \begin{array}{l} 0 < \left(\frac{d}{d_D} \right) \leq 0,8 \\ 1,0 \leq \left(\frac{d_t}{d_D} \right) \leq 1,6 \end{array} \right. \end{array} \right\}$$

$A_{11} = 1,00748900;$	$A_{12} = - 0,02409278;$	$A_{13} = 0,02144546;$	$A_{14} = - 0,004895828$
$A_{21} = 3,20803500;$	$A_{22} = - 1,09148900;$	$A_{23} = 1,55382700;$	$A_{24} = - 0,423889000$
$A_{31} = - 13,19182000;$	$A_{32} = 10,65100000;$	$A_{33} = - 13,27656000;$	$A_{34} = 3,525713000$
$A_{41} = 30,58818000;$	$A_{42} = - 44,89968000;$	$A_{43} = 47,62793000;$	$A_{44} = - 11,935440000$
$A_{51} = - 43,36178000;$	$A_{52} = 79,56794000;$	$A_{53} = - 71,67355000;$	$A_{54} = 16,794650000$
$A_{61} = 42,25349000;$	$A_{62} = - 92,64466000;$	$A_{63} = 74,76717000;$	$A_{64} = - 17,856930000$

Anhang 1 zum AD 2000-Merkblatt B 5

Erläuterungen zum AD 2000-Merkblatt B 5

Zu 1

Die zahlenmäßige Abgrenzung der Plattenberechnung zu den dicken Platten bzw. zu den Membranen ist in der Literatur noch nicht endgültig geklärt. In dem vorliegenden Fall wird als Abgrenzung zu den dicken Platten entsprechend den Angaben von Kantorowitsch [1] ein Wanddicken/Durchmesser-Verhältnis von 1 : 3 angenommen. Die untere Abgrenzung zu den extrem dünnen Platten wurde so festgelegt, dass bei der exakten Plattenberechnung gegenüber der Berechnung nach AD 2000-Merkblatt B 5 ein maximaler Fehler von 5 % auftreten darf. Dieser Fehler ergibt sich für den ungünstigen Fall der frei aufliegenden Platte bei einem Verhältnis der Plattendurchbiegung zur Plattendicke von 0,5.

Aus der Formel für die Durchbiegung der frei aufliegenden Platte

$$w = \frac{p \cdot R^4}{10 \cdot 64 \cdot N} \cdot \frac{5 + \nu}{1 + \nu} \quad (1)$$

$$\text{erhält man mit } N = \frac{E \cdot (s_e - c_1 - c_2)^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (2)$$

$$w = \frac{p \cdot D^4}{E \cdot (s_e - c_1 - c_2)^3} \cdot \frac{12(1 - \nu^2) \cdot (5 + \nu)}{10 \cdot 64 \cdot 16 \cdot (1 + \nu)} \quad (3)$$

Durch Einsetzen des Zahlenwertes für ν und Division durch $s_e - c_1 - c_2$ ergibt sich das Verhältnis

$$\frac{w}{s_e - c_1 - c_2} = 0,5 = \frac{p \cdot D^4}{E \cdot (s_e - c_1 - c_2)^4} \cdot 0,00435 \quad (4)$$

Bei der Auflösung nach $(s_e - c_1 - c_2)/D$ erhält man schließlich

$$\frac{s_e - c_1 - c_2}{D} \geq \sqrt[4]{0,0087 \frac{p}{E}} \quad (5)$$

Zu 6.5.2 und 6.7.1.6

Auftretende Wärmespannungen können nach AD 2000-Merkblatt S 3/0 berücksichtigt werden.

Zu 6.5.3

Damit technisch auftretende Knickfälle differenzierter erfasst werden können, wurde eine Aufteilung in verschiedene Belastungsfälle vorgenommen. Dies geschieht im vorliegenden Falle in der Form, dass als Knicklänge l_K je nach Belastungsfall ein Vielfaches der vorhandenen Stablänge eingesetzt werden kann.

Schrifttum

- [1] Kantorowitsch, S. B.: Die Festigkeit der Apparate und Maschinen für die chemische Industrie. VEB-Verlag Technik, Berlin (1955).

zu 6.7.3.2, 6.7.4.3 und 6.7.5.1

Unter Vollberohrung ist die regelmäßige Anordnung der Wärmetauscherrohre in der Rohrplatte zu verstehen, die innerhalb der Einspannungsgrenzen keine regelmäßige Erweiterung des Bohrbildes mehr zulässt.

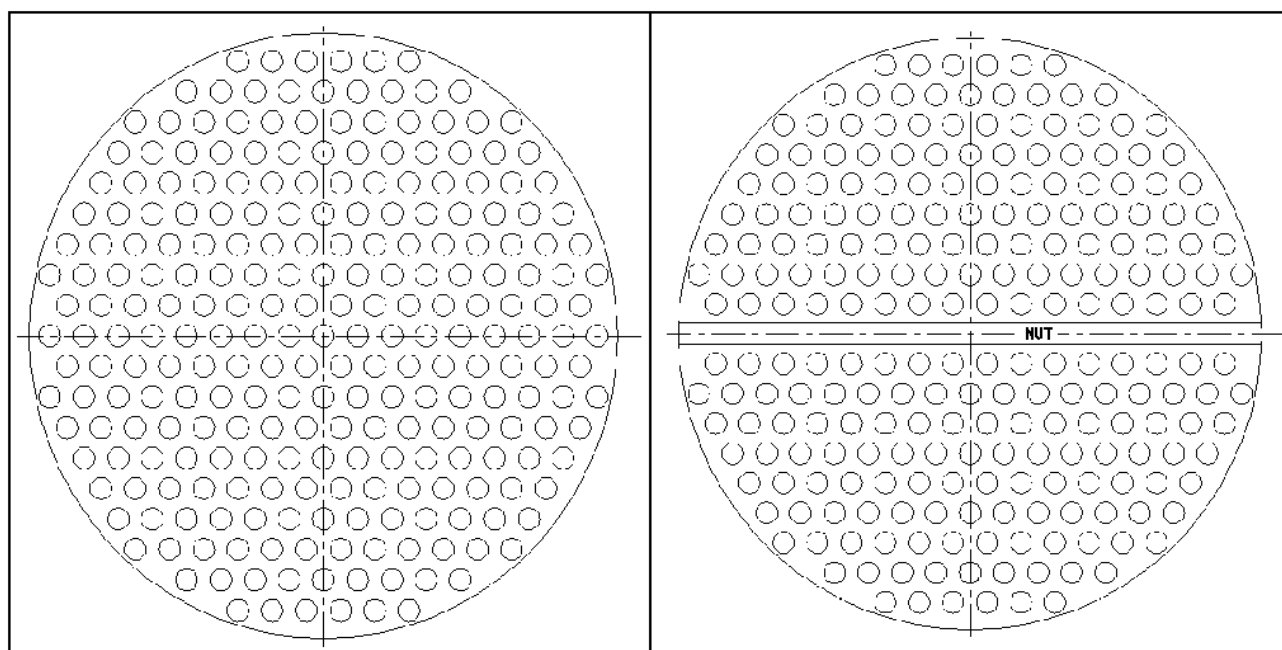


Bild 1 Beispiele für eine vollberohrte Rohrplatte

AD 2000-Merkblatt

Seite 22 AD 2000-Merkblatt B 5, Ausg. 03.2009

Bei Teilberohrungen wird grundsätzlich ein Flächenansatz verfolgt. Die Ermittlung von l geschieht nach den Vorgaben nachfolgender **Tafel 1**.

Typ der Verrohrung	Sinnbild
<p>A) Vollberohrte Rohrplatte</p> <p>l wird über das arithmetische Mittel der Mittenabstände der außenliegenden Rohre zum Plattenmittelpunkt (l_1) zuzüglich einem halben Rohrdurchmesser ermittelt.</p>	<p>EINSpannung</p> <p>Kreis mit dem Durchmesser $2 l_1 + d_a$</p>
<p>B) Kreisabschnitt</p> <p>Berechnung von l</p> $a = 2 \cdot \sqrt{l_1^2 - l_2^2}$ $\alpha = 2 \cdot \arcsin \left(\frac{a}{2 \cdot l_1} \right) \cdot \left(\frac{180}{\pi} \right) ^*)$ $b = \pi \cdot l_1 \cdot \frac{\alpha}{180}$ $A = \frac{(b \cdot l_1 - a \cdot l_2)}{2}$ $l = \sqrt{\frac{A}{\pi} + \frac{d_a}{2}}$	<p>EINSpannung</p> <p>Mitten der außenliegenden Rohre</p> <p>a</p> <p>b</p>

*) Bogenmaßkonvertierung

Typ der Verrohrung	Sinnbild
<p>C) Rechteck/Bogen Berechnung von l</p> $a_1 = 2 \cdot \sqrt{l_1^2 - l_2^2}$ $a_2 = 2 \cdot \sqrt{l_1^2 - l_3^2}$ $\alpha_1 = \arccos\left(\frac{a_1}{2 \cdot l_1}\right) \cdot \left(\frac{180}{\pi}\right)^{*)}$ $\alpha_2 = \arccos\left(\frac{a_2}{2 \cdot l_1}\right) \cdot \left(\frac{180}{\pi}\right)^{*)}$ $b_1 = 2\pi \cdot l_1 \cdot \frac{\alpha_1}{180}$ $b_2 = 2\pi \cdot l_1 \cdot \frac{\alpha_2}{180}$ $A = \frac{(a_2 \cdot l_3 + a_1 \cdot l_2 + l_1 \cdot (b_1 + b_2))}{2}$ $l = \sqrt{\frac{A}{\pi}} + \frac{d_a}{2}$	<p>EINSpannung</p> <p>Mitten der außen liegenden Rohre</p> <p>a_2</p> <p>a_1</p> <p>l_2</p> <p>l_3</p>
<p>D) Kreissektor Berechnung von l</p> $A = \pi \cdot l_1^2 \cdot \frac{\alpha}{360}$ $l = \sqrt{\frac{A}{\pi}} + \frac{d_a}{2}$	<p>EINSpannung</p> <p>Mitten der außen liegenden Rohre</p> <p>α</p>

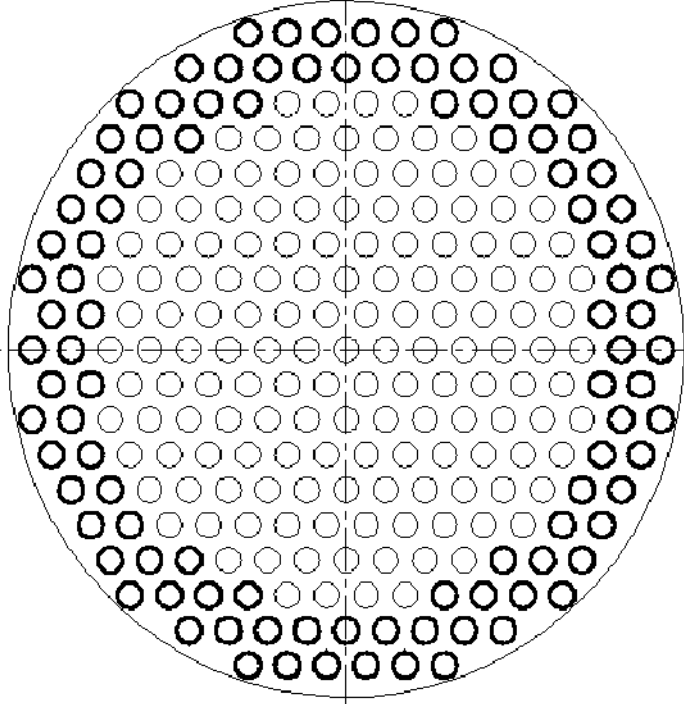
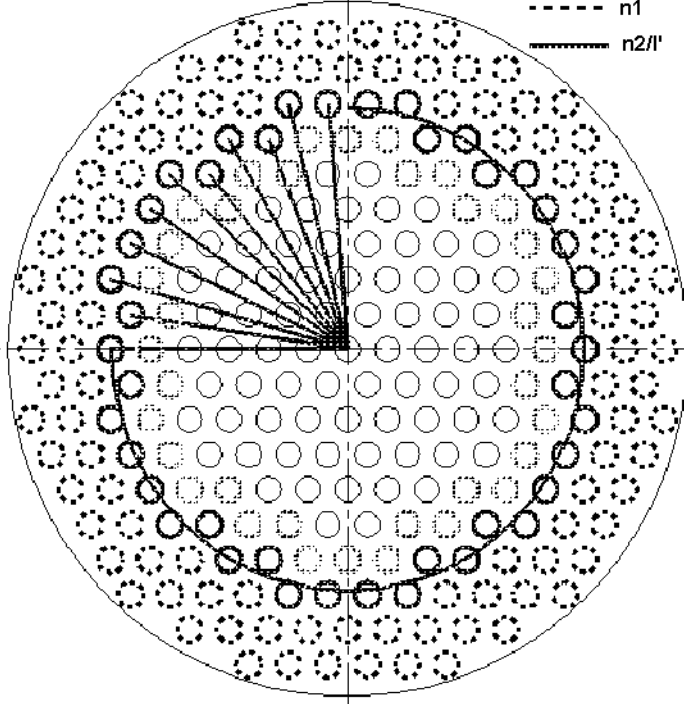
*) Bogenmaßkonvertierung

AD 2000-Merkblatt

Seite 24 AD 2000-Merkblatt B 5, Ausg. 03.2009

zu 6.7.4.4 und 6.7.5.2

Die Ermittlung der Anzahl der tragenden Randrohre n und des reduzierten Rohrfelddurchmessers l' richtet sich nach den Vorgaben nachfolgender **Tafel 2**. Die Berechnungssystematik ist aus Bild 2 ersichtlich.

Schritt/Erläuterung	Sinnbild/Kommentar
<p>A) Festlegung der tragenden Randrohre am Beispiel einer vollbohrten Rohrplatte</p> <p>Dazu werden die beiden äußeren Rohrreihen herangezogen, n wird ermittelt.</p>	
<p>B) Berechnungsgang</p>	<p>Sind Rohrplatte und Randrohre ausreichend dimensioniert, kann eine Optimierung erfolgen. Wenn die Anzahl der Randrohre nicht ausreicht, wird mit Schritt C) fortgesetzt.</p>
<p>C) Erhöhung der Anzahl der tragenden Randrohre</p> <p>(1) Die im Schritt A) herangezogenen Randrohre werden jetzt als n_1 angesehen.</p> <p>(2) Die Erweiterung der Anzahl der tragenden Randrohre um n_2 soll regelmäßig, d. h. in konzentrischen Rohrreihen zum Zentrum hin geschehen. Es ergibt sich für den folgenden Berechnungsgang die Gesamtzahl der tragenden Randrohre aus $n = n_1 + n_2$.</p> <p>(3) Die Mitten der vorletzt innenliegenden Randrohrerweiterungsreihe bestimmen den modifizierten (kleineren) Rohrfelddurchmesser l'.</p>	

Schritt/Erläuterung	Sinnbild/Kommentar
D) Berechnungsgang	Sind Rohrplatte und Randrohre ausreichend dimensioniert, kann eine Optimierung erfolgen. Wenn die Anzahl der Randrohre nicht ausreicht, wird mit Schritt E) fortgesetzt.
E) Erhöhung der Anzahl der tragenden Randrohre	Verfahrensweise wie unter Schritt C) beschrieben bis eine ausreichende Dimensionierung von Rohrplatte und Randrohren erreicht ist.

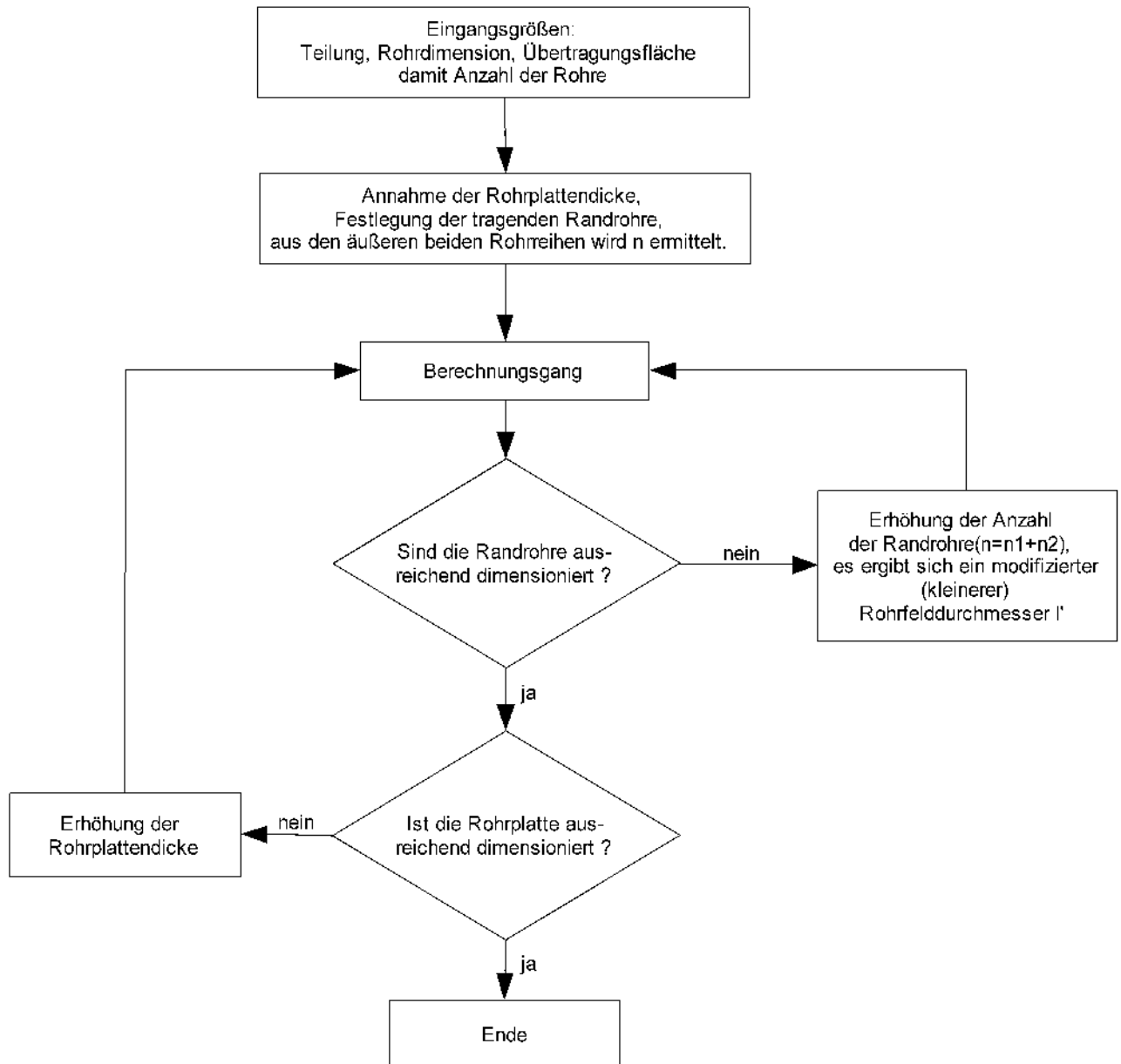


Bild 2 Ablaufschema für die Berechnung

AD 2000-Merkblatt

– Leerseite –

– Leerseite –

Herausgeber:



Verband der TÜV e.V.

E-Mail: berlin@vdtuev.de
<http://www.vdtuev.de>

Bezugsquelle:

Beuth

Beuth Verlag GmbH
10772 Berlin
Tel. 030/26 01-22 60
Fax 030/26 01-12 60
info@beuth.de
www.beuth.de