

AD 2000-Merkblatt

ICS 23.020.30

Ausgabe Mai 2011

Berechnung von Druckbehältern	Gewölbte Böden unter innerem und äußerem Überdruck	AD 2000-Merkblatt B 3
--	---	----------------------------------

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 G 1.

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

	Seite
0 Präambel	2
1 Geltungsbereich.....	2
2 Allgemeines	2
3 Formelzeichen und Einheiten	3
4 Sicherheitsbeiwert	3
5 Ausnutzung der zulässigen Berechnungsspannung in Fügeverbindungen.....	3
6 Verschwächungen durch Ausschnitte.....	3
7 Zuschläge	4
8 Berechnung	4
9 Kleinste Wanddicke	5
Anhang 1 zum AD 2000-Merkblatt B 3.....	8
Schrifttum.....	9

Ersatz für Ausgabe Oktober 2000; | = 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 fotomechanischem Wege und die Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei auszugsweiser Verwertung, dem Urheber vorbehalten.

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 Berechnungsregeln gelten für gewölbte Druckbehälterböden, Bild 1, in Klöpper-, Korbbogen- und Halbkugelform unter innerem und äußerem Überdruck mit folgenden Beziehungen¹⁾ und Grenzen:

a) Klöpperböden

$$R = D_a \quad (1)$$

$$r = 0,1 D_a \quad (2)$$

$$h_2 = 0,1935 D_a - 0,455 s_e \quad (3)$$

$$0,001 \leq \frac{s_e - c_1 - c_2}{D_a} \leq 0,1 \quad (4)$$

b) Korbbogenböden

$$R = 0,8 D_a \quad (5)$$

$$r = 0,154 D_a \quad (6)$$

$$h_2 = 0,255 D_a - 0,635 s_e \quad (7)$$

$$0,001 \leq \frac{s_e - c_1 - c_2}{D_a} \leq 0,1 \quad (4)$$

c) Halbkugelböden

$$\frac{D_a}{D_i} \leq 1,2 \quad (8)$$

2 Allgemeines

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

2.2 Die Höhe des zylindrischen Bords ist

$$\text{a) bei Klöpperböden} \quad h_1 \geq 3,5 s \quad (9)$$

$$\text{b) bei Korbbogenböden} \quad h_1 \geq 3,0 s \quad (10)$$

Sie braucht jedoch folgende Maße nicht zu überschreiten:

Wanddicke	Bordhöhe
bis 50 mm	150 mm
über 50 mm bis 80 mm	120 mm
über 80 mm bis 100 mm	100 mm
über 100 mm bis 120 mm	75 mm
über 120 mm	50 mm

Bei Halbkugelböden ist kein zylindrischer Bord erforderlich.

2.3 Abweichend von Abschnitt 2.2 können geringere Bordhöhen ausgeführt werden, wenn die Anschlussnaht an den Zylinder entsprechend einer Ausnutzung der zulässigen Berechnungsspannung zu 100 % nach AD 2000-Merkblatt HP 0 wie eine vollbeanspruchte Stumpfnahst zerstörungsfrei geprüft wird.

¹⁾ Zurzeit sind nur Berechnungsbeiwerte β für die in DIN 28011 und DIN 28013 beschriebenen Bodenformen sowie für den Halbkugelboden in diesem AD 2000-Merkblatt enthalten.

2.4 Wird ein gewölbter Boden aus einem Krempe- und einem Kalottenteil zusammengeschweißt, so muss die Verbindungsnaht einen ausreichenden Abstand von der Krempe haben. Als ausreichender Abstand gilt

- a) bei unterschiedlichen Wanddicken des Krempe- und Kalottenteils

$$x = 0,5 \sqrt{R \cdot (s - c_1 - c_2)} \quad (11)$$

wobei s die erforderliche Wanddicke des Krempenteils darstellt,

- b) bei gleicher Wanddicke des Krempe- und Kalottenteils

bei Klöpperböden $x = 3,5 s$ (12)

bei Korbbogenböden $x = 3,0 s$ (13)

mindestens jedoch 100 mm (siehe Bild 3).

2.5 Ist bei einem Halbkugelboden die ausgeführte Wanddicke abzüglich der Zuschläge kleiner als die Wanddicke des Zylinders ohne Verschwächung und ohne Zuschläge, sind für den Anschluss die Bedingungen von Bild 7 einzuhalten. Im Regelfall ist die Anschlussnaht beidseitig auszuführen.

3 Formelzeichen und Einheiten

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

r innerer Krempenradius in mm

4 Sicherheitsbeiwert

4.1 Der Sicherheitsbeiwert ist den Tafeln 2 und 3 des AD 2000-Merkblattes B 0 Abschnitt 7 zu entnehmen. Abweichend hiervon betragen die Werte für Grauguss

- a) ungeglüht 7,0,
b) gegläht oder emailliert 6,0.

4.2 Der Sicherheitsbeiwert S_K gegen elastisches Einbeulen des Bodens bei äußerem Überdruck ist mit Formel (14) zu berechnen.

$$S_K = 3 + \frac{0,002}{\left(\frac{s_e - c_1 - c_2}{R} \right)} \quad (14)$$

Wird ein höherer Prüfdruck als $1,3 p$ gefordert, so darf der Sicherheitsbeiwert S'_K beim Prüfdruck den Wert

$$S'_K = S_K \cdot \frac{2,2}{3}$$

nicht unterschreiten.

4.3 Der Sicherheitsbeiwert S ist bei allen Nachweisen für äußeren Überdruck gegenüber den Tafeln 2 und 3 des AD 2000-Merkblattes B 0 um 20 % zu erhöhen; ausgenommen davon sind die Werte für Grauguss und Gussbronze.

4.4 Der Nachweis des Kalottenteils gegen plastische Instabilität wird mit dem Sicherheitsbeiwert S nach Abschnitt 4.3 geführt; jedoch ist ein Mindestwert von 2,4 einzusetzen.

5 Ausnutzung der zulässigen Berechnungsspannung in Fügeverbindungen

Zusätzlich zu den Regelungen des AD 2000-Merkblattes B 0 gilt Folgendes:

Bei Prüfung entsprechend 100 %iger Ausnutzung der zulässigen Berechnungsspannung sowie bei einteiligen Böden ist $v = 1,0$ zu setzen. Darüber hinaus kann bei geschweißten, gewölbten Böden — außer bei Halbkugelböden — unabhängig vom Prüfumfang mit $v = 1,0$ gerechnet werden, sofern die Schweißnaht den Scheitelpunkt von $0,6 D_a$ schneidet, siehe Bilder 5 und 6 (linke Hälfte).

Die Anschlussnaht zwischen Halbkugelboden und Zylinder ist wie eine Längsnaht zu bewerten. Bei Prüfung entsprechend 100 %iger Ausnutzung der zulässigen Berechnungsspannung kann $v = 1,0$ gesetzt werden.

6 Verschwächungen durch Ausschnitte

Ausschnitte werden, abhängig von ihrer Lage in Krempe oder Kalotte, nach Abschnitt 8 differenziert berücksichtigt.

7 Zuschläge

Zuschläge siehe AD 2000-Merkblatt B 0. Wanddickenunterschreitung siehe über die in AD 2000-Merkblatt B 0 genannten Regelungen hinaus auch DIN 28011 und DIN 28013.

8 Berechnung

8.1 Innerer Überdruck

8.1.1 Kalotte und Halbkugel

Die Wanddicke des Kalottenteils gewölbter Böden sowie von Halbkugelböden ist nach Formel (3) des AD 2000-Merkblattes B 1 mit $D_a = 2(R + s_e)$ zu bestimmen.

8.1.2 Ausschnitte in Kalotte oder Halbkugel

Sind Ausschnitte im Scheitelbereich $0,6 D_a$ von Klöpper- oder Korbbogenböden, Bild 2, und im gesamten Bereich von Halbkugelböden vorhanden, muss deren Verstärkung AD 2000-Merkblatt B 9 genügen.

Bei Verwendung scheibenförmiger Verstärkungen darf der Scheibenrand den Bereich von $0,8 D_a$ bei Klöpperböden und $0,7 D_a$ bei Korbbogenböden nicht überschreiten.

8.1.3 Krempe und Halbkugelanschluss

Die erforderliche Wanddicke von Krempe und Halbkugelanschlüssen ist nach Formel (15) zu berechnen.

$$s = \frac{D_a \cdot p \cdot \beta}{40 \cdot \frac{K}{S} \cdot v} + c_1 + c_2 \quad (15)$$

Die Berechnungsbeiwerte β sind für Krempe von Klöpperböden Bild 8, von Korbbogenböden Bild 9 in Abhängigkeit von $\frac{s_e - c_1 - c_2}{D_a}$ zu entnehmen (iteratives Vorgehen notwendig!). Sowohl in Formel (15) als auch in den Bildern 8 und 9 ist

D_a der Durchmesser der zylindrischen Zarge, wie in den Bildern 1 und 2 dargestellt. Die untere Kurve $d_i/D_a = 0$ gilt, wenn der Bereich außerhalb von $0,6 D_a$ nicht durch Ausschnitte verschwächt ist. Für Vollböden in Halbkugelform gilt im Bereich $x = 0,5\sqrt{R \cdot (s - c_1 - c_2)}$ neben der Anschlussnaht der Berechnungsbeiwert $\beta = 1,1$; dieser Wert gilt unabhängig vom Verhältnis $\frac{s_e - c_1 - c_2}{D_a}$.

8.1.4 Ausschnitte im Krempebereich

Sind Ausschnitte im Bereich außerhalb $0,6 D_a$ vorhanden, werden diese durch Erhöhung des Berechnungsbeiwertes entsprechend dem Verhältnis $d_i/D_a > 0$ nach den Bildern 8 und 9 berücksichtigt. Liegt der Steg auf der Verbindungslinie der Mittelpunkte von benachbarten Ausschnitten nicht vollständig innerhalb $0,6 D_a$, muss die Mindeststegbreite gleich der Summe der halben Ausschnittdurchmesser sein.

8.2 Äußerer Überdruck

8.2.1 Begrenzung bleibender Dehnungen

Mit den nach Abschnitt 4.3 erhöhten Sicherheitsbeiwerten sind die Nachweise nach den Abschnitten 8.1.2 bis 8.1.4 zu führen.

8.2.2 Elastisches Beulen

Mit dem Sicherheitsbeiwert S_K nach Abschnitt 4.2 muss untersucht werden, ob ausreichende Sicherheit gegen elastisches Einbeulen gegeben ist. Dies ist der Fall, wenn

$$p \leq 3,66 \frac{E}{S_K} \cdot \left(\frac{s_e - c_1 - c_2}{R} \right)^2 \quad (16)$$

gilt.

8.2.3 Plastisches Beulen

Kugelsegmentschalen müssen außerdem gegen plastische Instabilität ausgelegt werden. Dies geschieht durch einen Nachweis nach Abschnitt 8.1.1 mit dem in Abschnitt 4.4 festgelegten Sicherheitsbeiwert und unabhängig von der Wertigkeit der Fügeverbindung mit $v = 1,0$.

9 Kleinste Wanddicke

- 9.1** Die kleinste Wanddicke gewölbter Böden wird mit 2 mm festgelegt.
- 9.2** Abweichend von Abschnitt 9.1 gelten für die kleinste Wanddicke bei gewölbten Böden aus Aluminium und dessen Legierungen 3 mm.
- 9.3** Ausnahmen siehe AD 2000-Merkblatt B 0 Abschnitt 10.
- 9.4** Die kleinste Wanddicke von Gussstücken ergibt sich unter anderem aus der Technik der Herstellung.

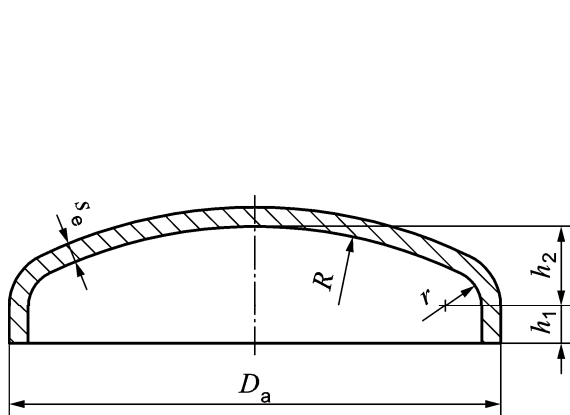


Bild 1 — Gewölbter Vollboden

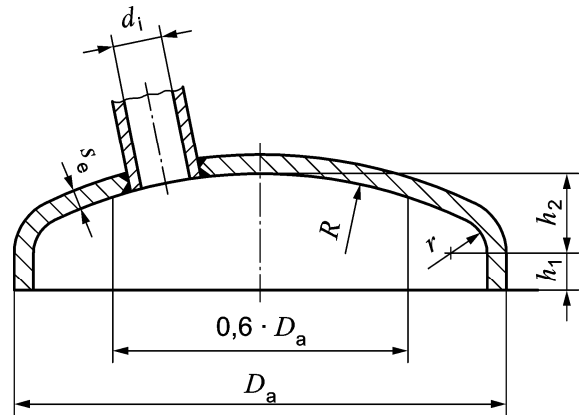


Bild 2 — Gewölbter Boden mit Stützen

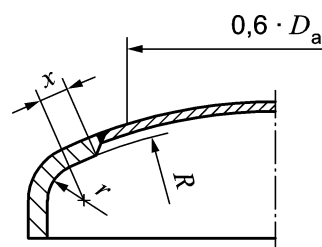
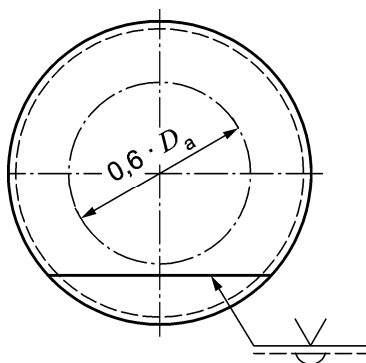
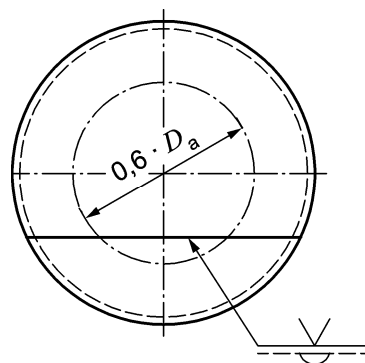


Bild 3 — Boden mit unterschiedlicher Wanddicke des Krempen- und Kalottenteils



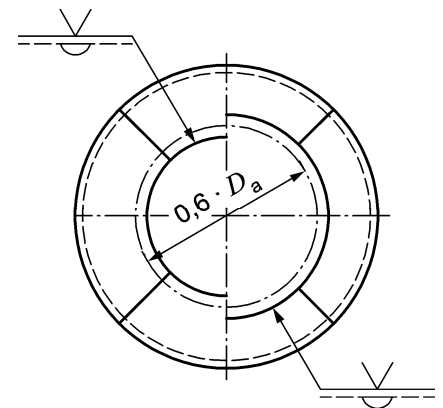
$v = 0,85$ bzw. $1,0$

**Bild 4 — Schweißnaht
außerhalb $0,6 D_a$**



$v = 1,0$

**Bild 5 — Schweißnaht
innerhalb $0,6 D_a$**



$v = 1,0$

$v = 0,85$ bzw. $1,0$

**Bild 6 — Boden aus Ronde und
Segmenten zusammengesetzt**

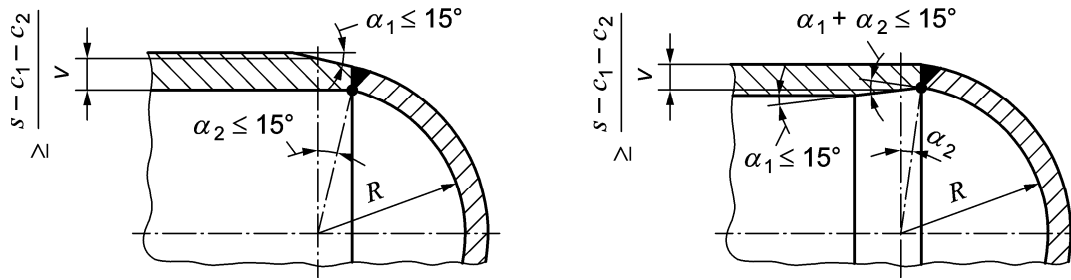


Bild 7 — Anschluss eines Halbkugelbodens an Zylinder mit größerer Wanddicke

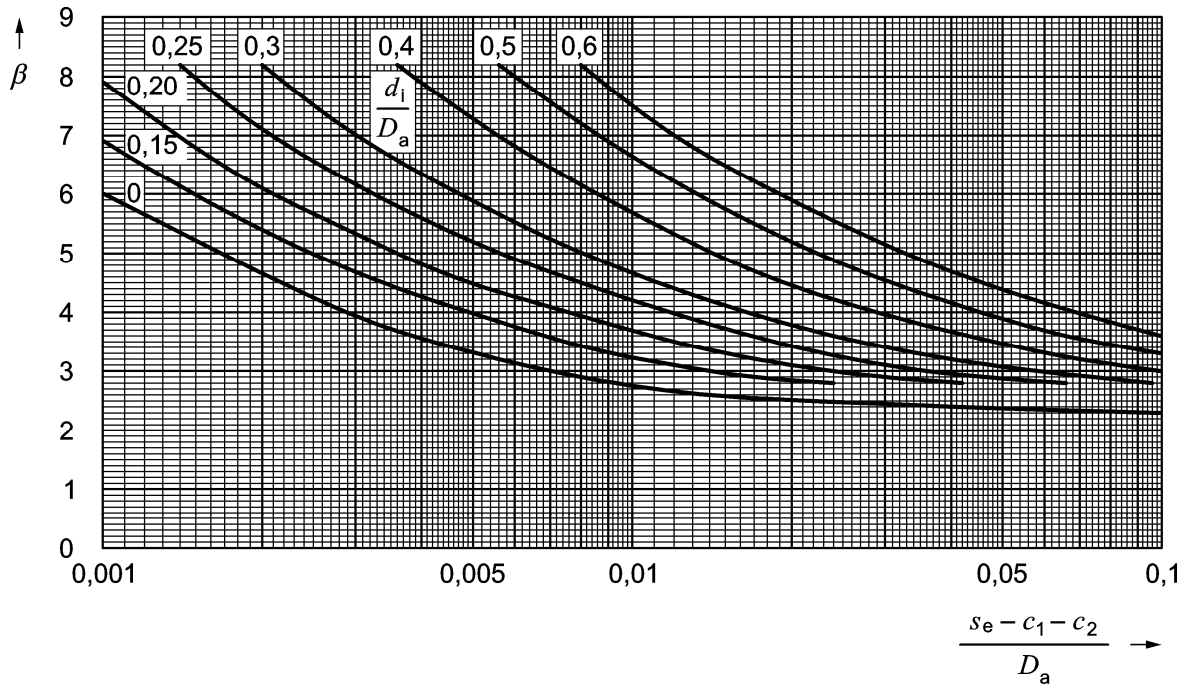


Bild 8 — Berechnungsbeiwerte β für gewölbte Böden in Klöpperform

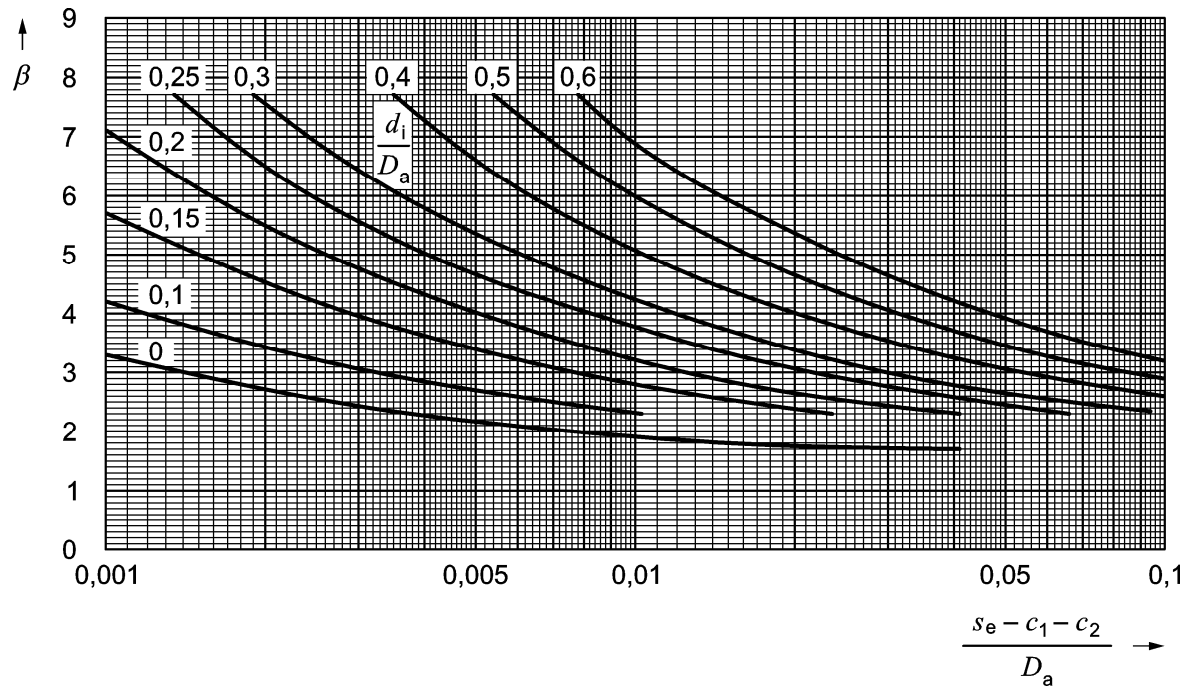


Bild 9 — Berechnungsbeiwerte β für gewölbte Böden in Korbbogenform

Anhang 1 zum AD 2000-Merkblatt B 3

Erläuterungen zum AD 2000-Merkblatt B 3

Zu 2.4

Bei der Bestimmung des Übergangs von der Krempe zur Kugelkalotte ist nach DIN 28011 und DIN 28013 vom Innendurchmesser auszugehen. Bei dünnwandigen Klöpperböden liegt der Übergang ungefähr bei $0,89 D_i$ und bei dünnwandigen Korbbogenböden ungefähr bei $0,86 D_i$. Mit zunehmender Dickwandigkeit verringern sich die Faktoren.

Zu 8.1

Gegenüber früheren Ausgaben des AD 2000-Merkblattes B 3 fehlt ein Kriterium gegen Beulen im Krempebereich unter Innendruckbelastung. [2] enthält die Begründung für den Verzicht auf ein explizites Stabilitätskriterium im Geltungsbereich $s \geq 0,001 D_a$ dieses Merkblattes. Bemessungsgleichungen zur Stabilitätsauslegung von torisphärischen Böden unter Innendruckbelastung finden sich z. B. in [5] und [6].

Zu 8.1.3

Die elastizitätstheoretische Berechnung des Spannungsverlaufes bei Vollböden in Klöpper- und Korbbogenform unter Innendruck erfolgte nach der Stufenkörpermethode [1]. Wie aus Bild A.1 zu ersehen ist, befindet sich die höchstbeanspruchte Stelle eines Klöpperbodens an der Innenfaser der Krempe. Unter Zugrundelegung der Ergebnisse dieser Berechnung wurden die Formzahlen α als Berechnungsbeiwerte im elastischen Verformungsbereich ermittelt, Bilder A.2 und A.3. Hierbei wird α als Quotient der nach der Gestaltänderungsenergie-Hypothese ermittelten Vergleichsspannung an der höchstbeanspruchten Stelle des Bodens und der Membranspannung einer Kugelschale gleichen Durchmessers sowie gleicher Wanddicke definiert.

Der Spannungszustand in gewölbten Böden (im Krempebereich Biegung in meridionaler Richtung) lässt überelastische Beanspruchungen an der höchstbeanspruchten Stelle zu. Der Berechnungsbeiwert β für den elasto-plastischen Verformungsbereich ist als Quotient der Formzahl α und eines Faktors δ , der das elasto-plastische Verhalten des Werkstoffes berücksichtigt, definiert ($\beta = \alpha/\delta$). Dieser Faktor ist in Abhängigkeit von $\frac{s_e - c_1 - c_2}{D_a}$ in den Bildern A.2 und A.3 dargestellt.

Die Höchstwerte wurden, ausgehend von den bewährten β -Werten 2,9 für Klöpperböden sowie 2,0 für Korbbogenböden, im Bereich $\frac{s_e - c_1 - c_2}{D_a}$ von 0,007 bzw. 0,008, unter Zugrundelegung des elastizitätstheoretisch errechneten α -Wertes ermittelt. Als Minimalwert ergibt sich bei beiden Bodenformen für den Grenzfall $\frac{s_e - c_1 - c_2}{D_a} = 0$ der Faktor 1. Der Anteil der Biegespannung nimmt gegenüber der Normalspannung in diesem Bereich mit fallendem $\frac{s_e - c_1 - c_2}{D_a}$ ab und erreicht im Grenzfall den Wert 0. Für die Kurven des Faktors δ als Funktion von $\frac{s_e - c_1 - c_2}{D_a}$ wurde, ausgehend von $\delta = 1$, ein Ellipsenteil, an den sich ein linearer Ast anschließt, gewählt. Dieser Verlauf ist stetig und trägt den Spannungsanteilen sowie der entsprechenden Stützwirkung Rechnung.

Die diesen Werten zugeordnete bleibende Dehnung an der höchstbeanspruchten Stelle des Bodens kann etwa 1 % erreichen. In Verbindung mit den Sicherheitsbeiwerten nach AD 2000-Merkblatt B 0 gewährleistet der Faktor δ , dass eine plastische Rückverformung vermieden bzw. das in der angelsächsischen Literatur als Shakedown bekannte Kriterium eingehalten wird.

Die Bilder A.2 und A.3 veranschaulichen die Abhängigkeit der α -, β - und δ -Werte für Vollböden in Klöpper- und Korbbogenform vom Verhältnis $\frac{s_e - c_1 - c_2}{D_a}$.

Die Berechnungsbeiwerte β für Klöpper- und Korbbogenböden mit Ausschnitten sind bis zu einem bezogenen Durchmesser von $d_i/D_a = 0,6$ der Tafel 1 des früheren AD-Merkblattes B 3, Ausgabe Januar 1969, entnommen. Diese Werte gelten jedoch nicht für Tangentialstützen (Stützen senkrecht zur Behälterachse). Eine Regelung muss dann in jedem Einzelfall von der zuständigen unabhängigen Stelle beurteilt werden. In diesem Fall ist es empfehlenswert, anstelle von Klöpper- oder Korbbogenböden Halbkugelböden vorzusehen.

Bei Ausschnitten mit Durchmessern $d_i > 0,6 D_a$ empfiehlt es sich, den gewölbten Boden durch ein kegelförmiges Übergangsstück zu ersetzen.

Zu 8.2

Formel (16) entspricht dem kritischen Beuldruck der Kugelschale nach von Kármán und Tsien [3]. Der in dieser Formel enthaltene Sicherheitsbeiwert S_k ist wie der Sicherheitsbeiwert S nach Abschnitt 4.4 nicht als Sicherheit dieser Größenordnung verfügbar, sondern enthält einen schlankheitsabhängigen Abminderungsfaktor, der dem Unterschied zwischen dem theoretischen Ergebnis und den Versuchsdaten Rechnung tragen soll [4].

Schrifttum

- [1] *Eßlinger, M.*: Statische Berechnung von Kesselböden. Springer-Verlag, Berlin 1952.
- [2] *Hey, H.*: Stabilitätsfragen bei Krepfen; Tü **29** (1988) H. 12, S. 408–413.
- [3] *von Kármán, Th.*, u. *H. S. Tsien*: J. Aeron. Sci **7**, Nr. 2, S. 43/50.
- [4] *Ciprian, J.*: Probleme der Stabilitätsberechnung von Doppelmantel- und Vakuumbehältern im chemischen Apparatebau; Chemie-Ingenieur-Technik **45** (1973) Nr. 11, S. 804–810.
- [5] *Galletly, E. D.*: A Simple Design Equation for Preventing Buckling in Fabricated Torispherical Shells under Internal Pressure; J. of Pressure Vessel Technology; **108** (1986) S. 521–525.
- [6] C.O.D.A.P. (Code Français de Construction des Appareils à Pression); S.N.C.T., 10 Avenue Hoche, 75382 Paris, Cedex 08.

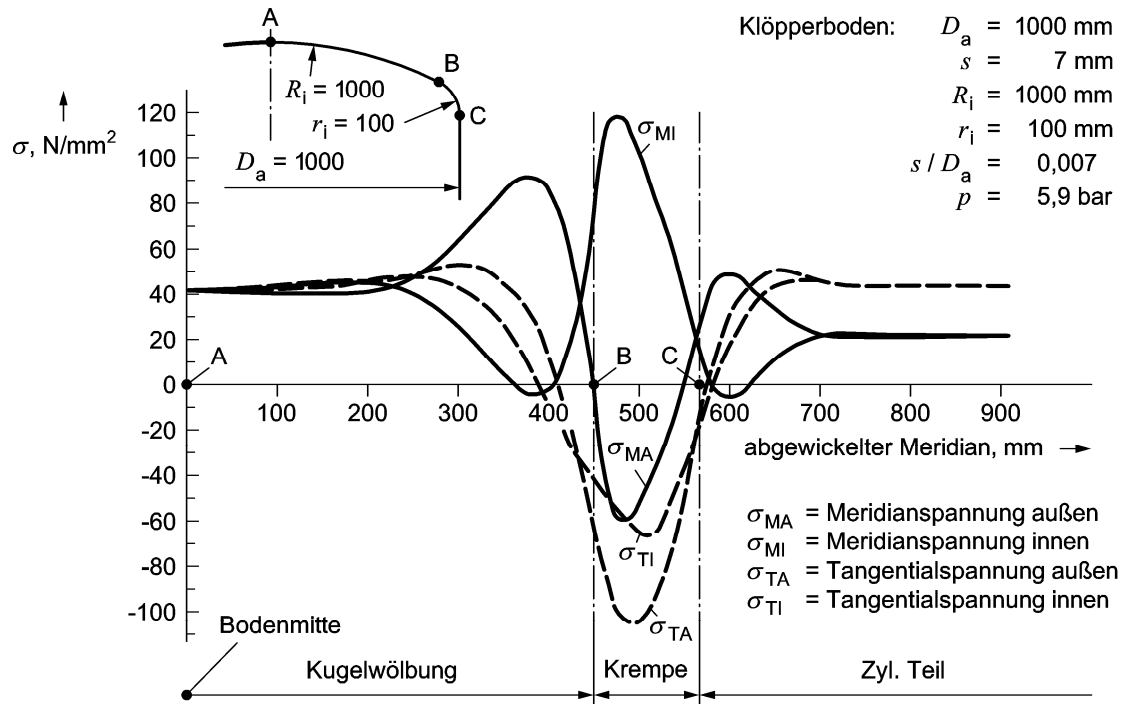


Bild A.1 — Spannungsverlauf im Klörperboden

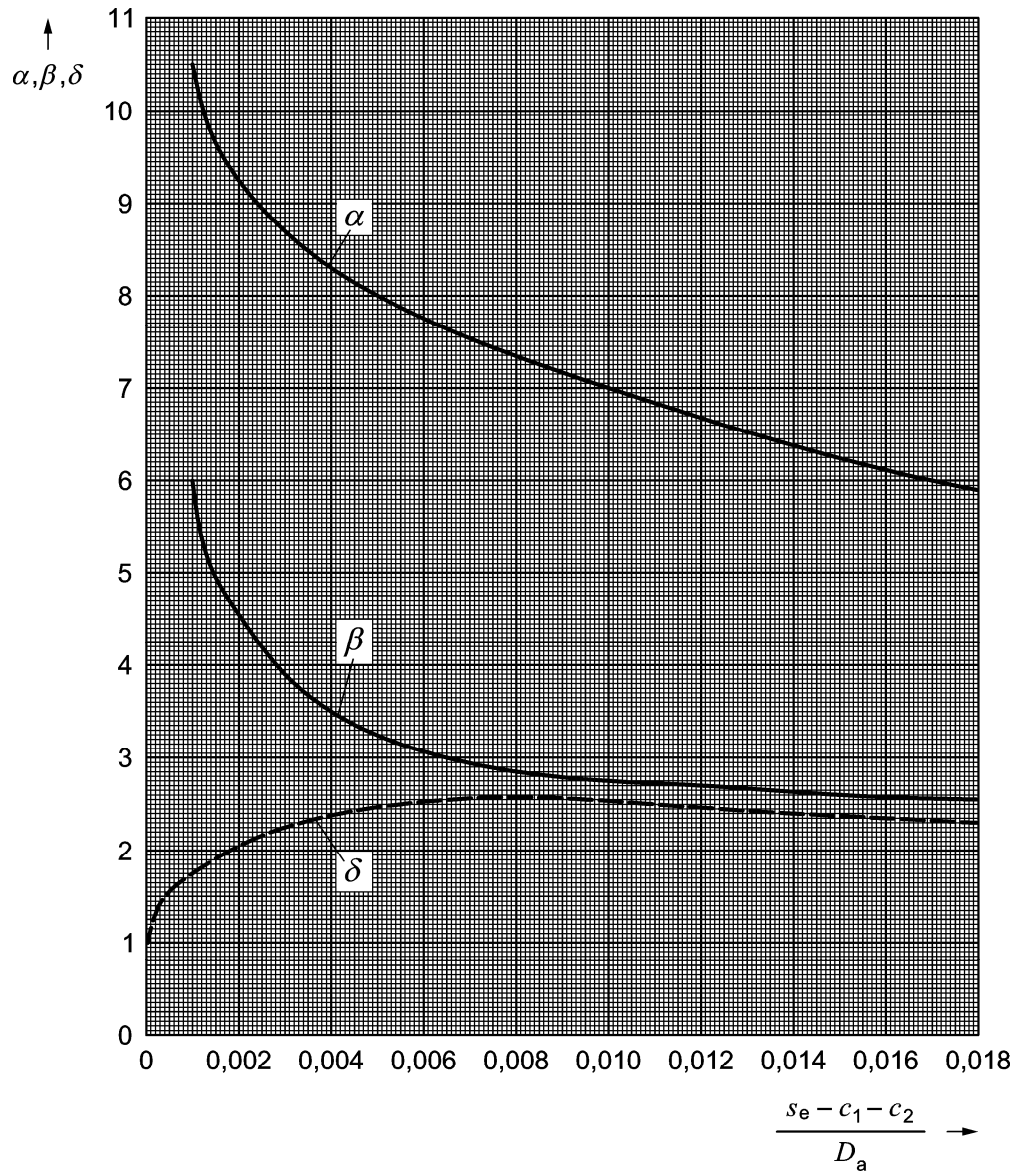


Bild A.2 — Berechnungsbeiwerte für Klöpperböden

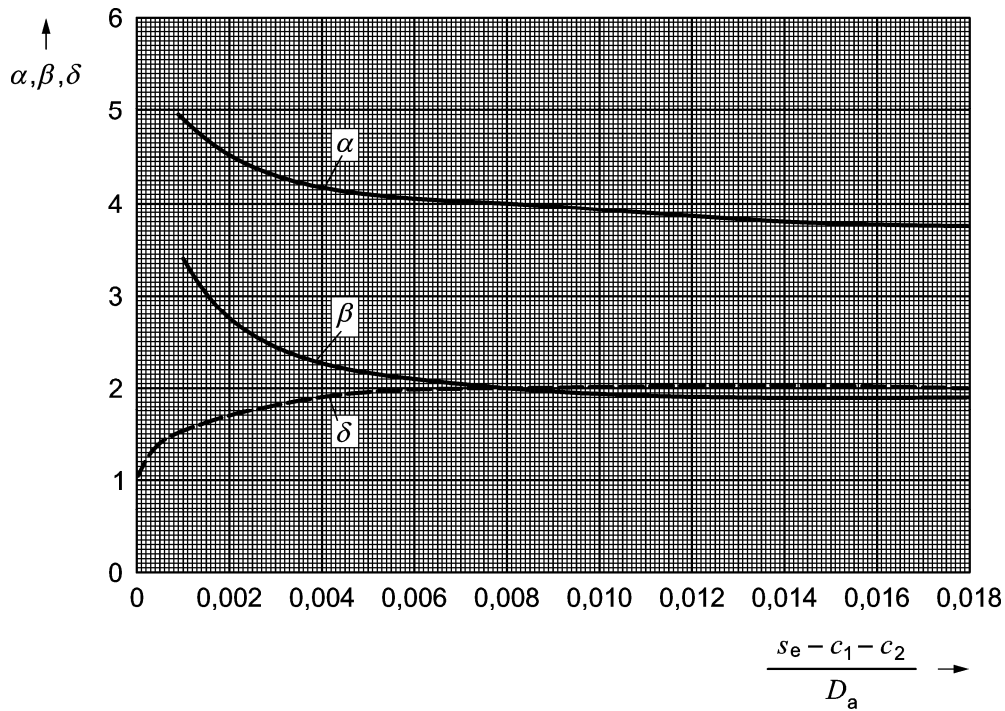


Bild A.3 — Berechnungsbeiwerte für Korbbogenböden

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