

# Ueber die günstigste Gestalt des vollen, gewölbten Bodens zylindrischer Kesseltrommeln gleicher Dicke und ihre Festigkeitsberechnung

Autor(en): **Huggenberger, A.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **91/92 (1928)**

Heft 18

PDF erstellt am: **12.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-42494>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

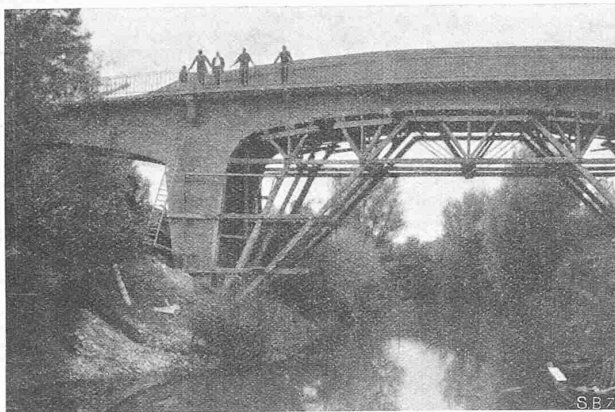


Fig. 4. Le nouveau pont de Labarthe avec son cintre.

de la résultante d'appui autour de la verticale est très petit, fixé qu'il est par le rapport de la poussée à la réaction verticale. Les armatures suivent alors la variation des efforts internes, comme il est bien visible sur le dessin de celles-ci (fig. 3).

Le cintre composé de cinq fermes, conçu en „Sprengwerk“ avec une petite partie médiane en „Hängewerk“ (fig. 4) put être judicieusement établi sur les deux plateformes créées dans la maçonnerie à la cote + 7,00 m.

Les cubatures de cet ouvrage se chiffrent par 206 m<sup>3</sup> de béton et 26 t d'acier. Y compris les cintres, l'ouvrage, sans l'aménagement des abords, a coûté 180 000 frs.

Il semble bien que l'architecte peut être aussi satisfait que l'ingénieur de l'architecture de ce pont, dont les lignes s'harmonisent pleinement avec les efforts statiques dans la construction; sans lourdeur, malgré le matériau employé, l'ouvrage ne dépare pas le paysage au passage de la route sur cette calme petite rivière.

### Ueber die günstigste Gestalt des vollen, gewölbten Bodens zylindrischer Kesseltrommeln gleicher Dicke und ihre Festigkeitsberechnung.

Von Dr. sc. techn. A. HUGGENBERGER, Ingenieur, Zürich,  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter des Schweizerischen Vereins von Dampfkessel-Besitzern.

(Schluss von Seite 208.)

#### II. DIE GÜNSTIGSTE FORM DES GEWÖLBTEN BODENS.

Die am Kaiser-Wilhelm-Institut Düsseldorf von Siebel und Körber<sup>1)</sup> durchgeführten Versuche an gewölbten Böden, sowie die Versuchsergebnisse des Schweizerischen Vereins von Dampfkesselbesitzern<sup>2)</sup> geben wertvolle Richtlinien für die zweckmässige Formgebung gewölbter Böden. Aus den genannten Versuchsergebnissen geht hervor, dass die grösste Beanspruchung in der Krempe und zwar auf der Innenseite der Bodenschale auftritt. Die Grösse des Wertes dieser Beanspruchung ist in erster Linie von der Grösse des Krempehalbmessers abhängig, wird aber in empfindlicher Weise von der übrigen Form des Bodenmeridians bedingt. Bach hat schon vor einem halben Jahrhundert auf die ungünstige Wirkung eines kleinen Krempehalbmessers hingewiesen. Die geringe Grösse des Krempehalbmessers bedingt bei der üblichen Form korbboigen Bodenschale, deren Berechnungsmöglichkeit und zweckmässige Gestaltung von Höhn auf empirischen Wege an

Hand der an der Schalenaußenseite in der Wölbung ermittelten grössten Dehnung untersucht wurde, in verschiedener Hinsicht besonders Beanspruchungen.

Betrachten wir vorerst eine Schale mit stetig gekrümmter Meridiankurve, z. B. eine elliptische Bodenschale mit verschiedenem grossem Krümmungshalbmesser  $r$  am Ende der grossen Axe  $a$ , so lehren die Gleichungen (1) und (2) auf Seite 203, dass die Hautspannungen mit abnehmendem Krempehalbmesser  $r$  beträchtliche Werte annehmen.<sup>1)</sup> Je kleiner der Krempehalbmesser  $r$  ist, umso ausgeprägter ist das Bestreben des Schalenrandes, sich nach der Drehaxe hin zu bewegen. Je grösser aber die gegenläufige Bewegung des Randes von Boden- und Zylinderschale ist, umso grösser fallen die Unstetigkeitspannungen aus, die durch den erzwungenen stetigen Uebergang der Schalenränder bedingt werden. Die resultierenden Spannungen müssen notwendigerweise hohe Werte aufweisen, trotz der stetigen Form der Meridiankurve. Um diese wichtige Tatsache noch klarer hervorzuheben, wurde nach dem erläuterten Rechenverfahren für eine Anzahl Behälter gleicher Blechdicke mit elliptischer Bodenschale und verschiedenem grossem Krempehalbmesser  $r$  u. a. die grösste Beanspruchung ermittelt. Die Werte sind in Abbildung 15 als Ordinate über  $\psi_r = a/r$  als Abszissen eingetragen, Linienzug  $\sigma'_{b \max}$ . Das Verhältnis  $a/r = 1$  bezieht sich auf den Behälter mit halbkugelförmigen Böden. Von  $a/r = 1$  bis  $a/r = 1,26$  tritt die grösste Beanspruchung der Bodenschale am Rand auf und ist durch die Normalspannung  $\sigma_{02}^*$  gegeben. Ist  $a/r > 1,26$ , so rückt das Spannungsmaximum, das bis  $a/r = 2,66$ , durch  $\sigma_{11}$  gegeben ist, vom Schalenrand ab. Da für  $a/r > 2,66$  die Ringnormalspannung  $\sigma_{22}$  an der Schaleninnenseite negativ wird, so ist für die grösste Beanspruchung nach Guest-Mohr die grösste Schubspannung, d. h. die Summe der absoluten Werte der beiden Normalspannungen massgebend, sodass die  $\sigma'_{b \max}$ -Linie vom Punkte B an einen besonders steilen Verlauf aufweist.<sup>2)</sup> Die  $\sigma'_{b \max}$ -Linie kann näherungsweise auch an Hand der Gl. (24), (26) und (27) ermittelt werden. Je grösser das Verhältnis  $a/r$  gegenüber dem Werte 2,66 ist, umso ungünstiger muss der Einfluss des Krempehalbmessers  $r$  bewertet werden. Für die elliptische Bodenschale vom Halbwert-

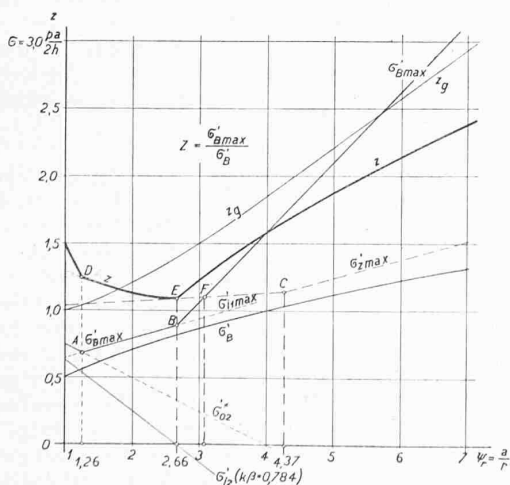


Abb. 15. Die berechnete grössten Beanspruchungen des zylindrischen Behälters gleicher Dicke mit elliptischen Böden in Abhängigkeit von  $a/r$ .

<sup>1)</sup> Siehe Anhang zum Jahresbericht 1923. Ueber die „Festigkeit elektrisch geschweisster Hohlkörper“. Verlag Julius Springer, Berlin 1924, Abschnitt V „Abriss der Theorie über die Festigkeit von Hohlkörpern“, von A. Huggenberger. S. 102 u. ff. und „Z. V. D. I.“ 1925, S. 159 u. ff.

<sup>2)</sup> Der von uns aus setzerechnischen Gründen gewählte Index „b“ ist gleichbedeutend mit dem Index „B“ in den Abbildungen. Red.

verhältnis  $a : b = 2 : 1$  beträgt  $a/r = 4$  und die grösste Beanspruchung ist nach Abbildung 15  $\sigma'_{b \max} = 1,6 \frac{p a}{2 h}$ . Eine gewisse Grösse muss dem Krepfen-Krümmungshalbmesser auch bei der stetig gekrümmten Bodenschale aufweisen, falls die grössten Beanspruchungen nicht zu gross ausfallen sollen. Wir werden weiter unten auf diese Frage zurückkommen.

Jede Unstetigkeit im Verlauf der Meridiankurve bedingt in gleicher Weise wie der unstetige Uebergang von der Bodenschale zur Zylinderschale zusätzliche Unstetigkeitsspannungen. Der Umstand, dass bei korb-bogenförmigem Meridian ein sprungweiser Uebergang von der Krepfenkrümmung und die Krümmung der mittlern Wölbung stattfindet, bedingt Unstetigkeitsspannungen, die selbst dann, wenn der Krepfenhalbmesser verhältnismässig gross ist, beträchtliche Werte erreichen. Besonders nachhaltig bestätigen dies die in nebenstehender Abbildung 16 enthaltenen Versuchsergebnisse, die wir an einem korb-bogenförmigen Boden von der Dicke  $2h = 2,64$  cm, dem mittlern Wölbungshalbmesser  $R = 139$  cm, dem Krepfenhalbmesser  $r = 25$  cm und dem Zylinder-schalenhalbmesser  $a = 73,4$  cm, womit  $a/r = 2,93$  wird, ermittelten. Die Meridiankurve ist vergleichsweise in Abbildung 22 auf Seite 220 (Kurve W) eingetragen. Bei 32 at betrug die grösste Beanspruchung in der Kreppe  $2\tau'_{M \max} = 1800$  kg/cm<sup>2</sup>, während der Mittelwert der Scheitelspannung  $768$  kg/cm<sup>2</sup> erreichte, sodass sich ein Spannungs-verhältnis  $2\tau'_{M \max} : \sigma'_{b \max} \cong 2,3$  ergibt. Für den oben erwähnten elliptischen Boden mit  $a/r = 4,13$  ergab der Versuch für die grösste Beanspruchung  $2\tau'_{M \max} = 1558$  kg/cm<sup>2</sup> und für die Spannung im Bodenscheitel  $1038$  kg/cm<sup>2</sup>, d. h. ein Spannungsverhältnis von 1,5. Trotzdem der Krepfenhalbmesser des korb-bogenförmigen Bodens bedeutend grösser ist, wie beim elliptischen Boden, erlangt die grösste Beanspruchung einen beträchtlich höhern Wert.

Diese Erkenntnis bedingt streng genommen eine stetige Vergrösserung der Krümmung der Meridiankurve vom Schalenrand bis zum Bodenscheitel. Trägt man den Krümmungshalbmesser  $R_1$  des Bodenmeridians über die in eine gerade ausgestreckte Meridianlinie auf, so erhält man einen stetigen Verlauf der  $R_1$ -Kurve (siehe z. B. Abbildung 3). Diegel gelangte auf empirischem Wege zu der Einsicht, dass der elliptische Boden vom Halbxenverhältnis 2 : 1 eine höhere Widerstandsfähigkeit aufweist als korb-bogenförmige Böden von gleicher Tiefe und Blechdicke. Wie wir an Hand der Rechnung und der Versuchsergebnisse gezeigt haben, stellt diese Bodenform aber nicht die günstigste Gestalt dar. Ausserdem ist zu beachten, dass die Ellipse als stetige Kurve nur einen Spezialfall darstellt und dass sich zwischen Bodenrand und Bodenscheitel streng genommen unendlich viele stetige Kurven einlegen lassen.

Der Konstrukteur des Kesselbaues wird im allgemeinen der Einsparung an Blechdicke für niedrige Betriebsdrücke

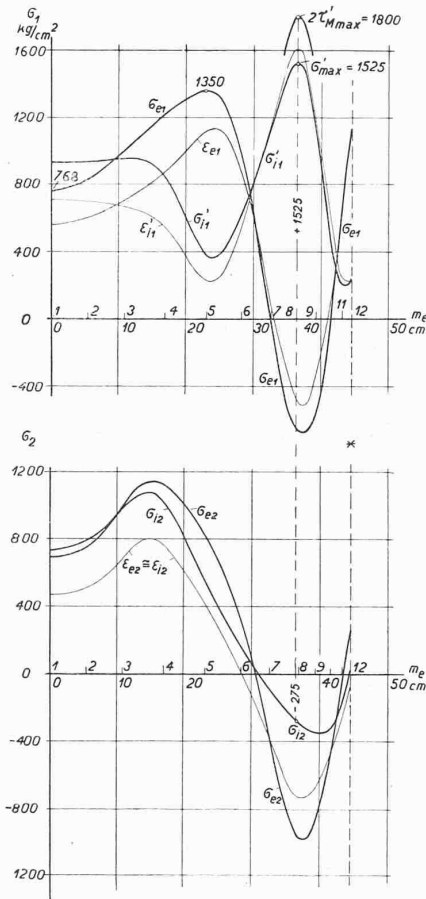


Abb. 16. Die aus den gemessenen Dehnungen und Verbiegungen ermittelten Normalspannungen an einem angieneteten korb-bogenförmigen Boden W eines Dampfkessels, bei  $p = 32$  at;  $2hb = 2,64$  cm,  $2h_2 = 2,6$  cm,  $R = 139,0$  cm,  $r = 25,0$  cm,  $a = 73,4$  cm,  $b = 33,4$  cm. \* = Schalenrand.

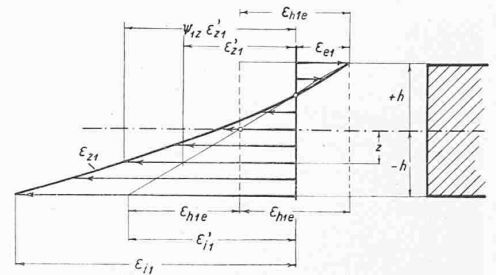


Abb. 17. Verlauf der Dehnungen über die Blechdicke bei grosser Blechdicke.

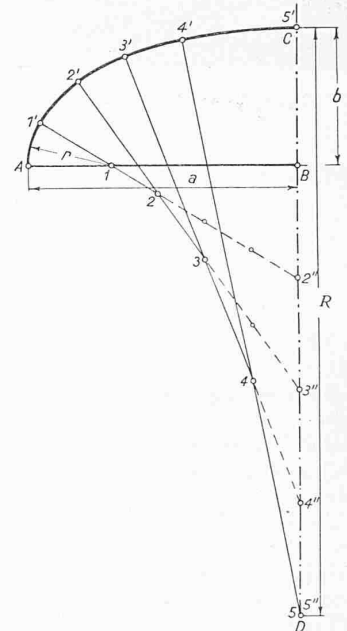


Abb. 18. Konstruktion der Meridiankurve der Bodenschale aus Kreisbogenstücken.

nur eine geringe Bedeutung beimessen, da die Wandstärke ohnehin klein ausfällt. Anders dagegen verhält es sich bei hohen Betriebsdrücken, die grosse Blechdicken, unter Umständen zudem noch einen hochwertigen und teuren Baustoff erfordern. Die vorstehenden Betrachtungen wurden unter der Annahme durchgeführt, dass die Blechdicke so klein sei, dass der Dehnungs- bzw. Spannungsverlauf über die Blechdicke linear angenommen werden dürfe. Dies trifft bei verhältnismässig grosser Blechdicke nicht mehr zu. Die Dehnungen verlaufen hyperbolisch und erreichen an der Schalenbegrenzungsfläche unter Umständen ein Vielfaches des Wertes, der dem linearen Verlauf zukommt (Abbildung 17). Ist z. B. an der Schaleninnenseite  $\epsilon'_{11}$  die Dehnung, die dem linearen Verlauf entspricht,  $\epsilon_{11}$  die Dehnung, die dem hyperbolischen Verlauf zukommt, so ist näherungsweise mit  $\psi_1 = (R_1 + h)/(R_1 - h)^1$

$$\epsilon_{11} = \psi_1 \epsilon'_{11} \dots \dots \dots (35)$$

Der Wert der Dehnung des hyperbolischen Verlaufes hängt sowohl von der Blechdicke, als auch von der Grösse des Krümmungshalbmessers  $R_1$  der Meridiankurve an der betreffenden Stelle ab. Je grösser die Wandstärke und je kleiner der Krümmungshalbmesser, umso stärker tritt der hyperbolische Verlauf hervor. Da die Kreppe den kleinsten Krümmungshalbmesser aufweist, wird sich dieser Einfluss dort in besonders hohem Masse geltend machen und trägt zu der weitem Erhöhung der an sich schon sehr grossen Beanspruchung der Bodenschale bei. Die zweckmässige Bemessung des Krepfenhalbmessers und die übrige Formgebung der Bodenschale nach den für die günstigste Gestalt gegebenen Richtlinien, ist für Hochdruckbehälter und Kessel auch von diesem Gesichtspunkte besonders angezeigt.

<sup>1)</sup> Siehe Huggenberger, l. c., Seite 98 u. f.

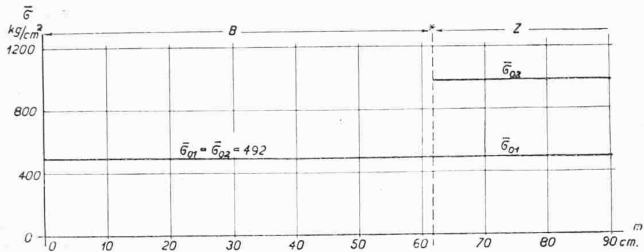


Abb. 19. Berechnete Hautspannungen des Behälters gleicher Dicke  $2h = 1,2$  cm und dem Halbmesser  $a = 39,4$  cm mit halbkugelförmigen Böden K für  $p = 30$  at.

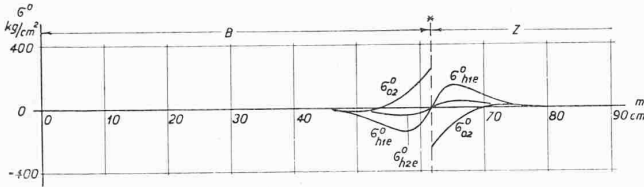


Abb. 20. Berechnete Unstetigkeitsspannungen des Behälters mit halbkugelförmigen Böden K für  $p = 30$  at.

Vom Standpunkt des praktischen Kesselbaues ist die Verwendung einer stetigen Meridiankurve kein unumgänglich notwendiges Erfordernis, um im Vergleich zum korbboğenförmigen Boden zu einer widerstandsfähigeren Bodenform zu gelangen. Viel wichtiger wie das strikte Einhalten der Forderung einer stetigen Meridiankurve ist das Befolgen der die günstigste Gestalt des Meridians charakterisierenden Hauptabmessungen, nämlich Krempehalbmesser  $r$ , Scheitelkrümmungshalbmesser  $R$  und Bodentiefe  $b$ , bzw. Axenverhältnis  $a : b$ . Die Bodenschale wird im Vergleich zu der Gestalt und den Abmessungen, die der Konstruktionszeichnung festgelegt ist, ohnehin Abweichungen aufweisen, die durch die Fabrikation bedingt sind. Auch der Baustoff wird nicht in allen Punkten der Schale die gleiche Beschaffenheit aufweisen. Diese unumgänglichen Unzulänglichkeiten bedingen gegenüber dem Idealboden stets zusätzliche Unstetigkeitspannungen. Praktisch werden wir gegenüber dem korbboğenförmigen Boden eine bedeutende Erhöhung der Widerstandsfähigkeit erhalten, wenn wir den Krümmungshalbmesser  $R_1$  vom Schalenrand nach dem Scheitel stufenweise zunehmen lassen und den schrittweisen Zuwachs so bemessen, dass die dadurch bedingten zusätzlichen Unstetigkeitspannungen von kleinerer Grössenordnung sind wie die Unstetigkeitspannungen, die durch die Fabrikation der Schale in Kauf genommen werden müssen. Der Meridian kann auf diese Weise durch Kreisbogenstücke zusammengesetzt werden, sodass wir einen treppenförmigen, also unstetigen Verlauf in der Veränderung des Krümmungshalbmessers  $R_1$  erhalten (siehe z. B. Abbildung 23). Da wir insbesondere in der Krempe des Bodens, wo die grössten Beanspruchungen auftreten, darnach trachten müssen, die zusätzlichen Unstetigkeitspannungen klein zu halten, sind dort kleine Stufen anzuwenden. Gegen den Bodenscheitel hin kann die stufenweise Zunahme bedeutend grösser ausgeführt werden. Die Aufteilung des Meridians in Kreisbogenstücke ermöglicht zudem eine einfache und bequeme Konstruktionsweise mit Hilfe von Zirkel und Lineal. In Abbildung 18 ist die Konstruktion des aus fünf Kreisbogenstücken bestehenden Meridians angedeutet, wobei die Hauptabmessungen des Bodens, nämlich Bodenschalenhalbmesser  $a$  (A B), die Tiefe  $b$  (B C), der Krempe-Krümmungshalbmesser  $r$  (A-1) und der Scheitel-Krümmungshalbmesser  $R$  (C D) als gegebene Grössen vorliegen. Man unterteilt die Strecke B D in  $5 - 1 = 4$  gleiche Teile. Der Krempe-Krümmungskreis reicht bis zur verlängerten Verbindungsgeraden der Teilpunkte  $2''$  und  $1$  (Schnittpunkt  $1'$ ). Hierauf unterteilt man die Strecke  $2''-1$  in vier gleiche Teile. Der Teilpunkt  $2$  ist der Krümmungsmittelpunkt des zweiten Kreisbogenstückes, dessen Endpunkt  $2'$  auf der Verlängerung der Verbindungsgeraden  $3''-2$  liegt. Zur Ermittlung des

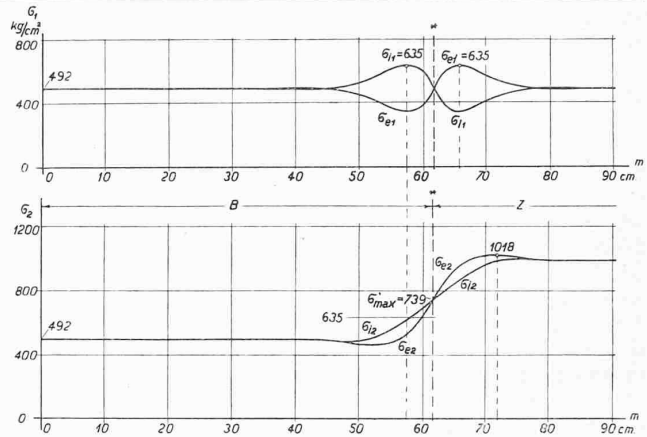


Abb. 21. Berechnete resultierende Normalspannungen des Behälters mit halbkugelförmigen Böden K für  $p = 30$  at.

dritten Krümmungsmittelpunktes  $3''-2$  wird  $3''-2$  in drei gleiche Teile geteilt. Durch diese Konstruktionsweise, die bis zum Bodenscheitel fortgesetzt wird, ist das Gesetz der Meridiankurve festgelegt und u. a. der Wölbungshalbmesser  $R$  und die Bodentiefe  $b$  eindeutig bestimmt. Genau genommen muss nur die Differenz  $BD = R - b$  festgegeben werden, um die Durchführung der Konstruktion zu ermöglichen. Die genauen Werte von  $b$  und  $R$  liefert die gesetzmässige Konstruktion des Meridians. Durch dieses Konstruktionsverfahren ist eine Unterteilung des Meridians in mindestens drei Kreisbogenstücke bedingt.

Die Forderung nach einem stetigen Verlauf der Meridiankurve und grossem Krempehalbmesser erfüllt die halbkugelige Bodenschale restlos. Es ist deshalb nicht verwunderlich, wenn in der Praxis des Kesselbaues die Ansicht vorherrscht, es sei die Kugelschale die wirtschaftlichste und günstigste Form der Bodenschale als Abschluss eines zylindrischen Behälters oder Kessels.

Um diese Frage näher zu erörtern, wurden nach dem oben angedeuteten Rechnungsverfahren die Hautspannungen (Abbildung 19), die Unstetigkeitspannungen (Abbildung 20) und die resultierenden Normalspannungen an der Schalen-Aussenseite und der Schalen-Innenseite (Abbildung 21) für einen Behälter von  $2h = 1,2$  cm,  $2a = 39,4$  cm und  $p = 30$  at ermittelt. Die beiden Hautspannungen sind an jeder Stelle der Kugelschale naturgemäss gleich gross, nämlich  $\sigma_{01} = \sigma_{02} = 492$  kg/cm<sup>2</sup> (Abbildung 19). Die Unstetigkeitspannungen erreichen nur sehr kleine Randwerte und klingen in einer sehr schmalen Randzone auf Null ab (Abbildung 20). Die grösste Beanspruchung tritt in der Zylinderschale auf und erreicht den Wert von 1018 kg/cm<sup>2</sup>. Die grösste Beanspruchung der Kugelschale tritt am Rande auf, sie beträgt 739 kg/cm<sup>2</sup>. Dieser Wert ist rd. 27% kleiner als die grösste Beanspruchung des Behälters. Ausser einer kleinen Randzone weist der übrige Teil der Kugelschale gegenüber dem erwähnten Höchstwert von 1018 kg/cm<sup>2</sup> eine um rd. 50% kleinere Beanspruchung auf. Neben den Nachteilen der grossen Bodentiefe liegt eine ausserordentlich unwirtschaftliche Ausnützung des Baustoffes vor, sodass dieser Schalenform unter dem Gesichtswinkel der „günstigsten Bodengestalt“ jede Bedeutung entgeht.

Die günstigste und wirtschaftlichste Form hinsichtlich der Beanspruchung würde dann vorliegen, wenn das Material sowohl in Richtung des Meridians als auch in der Ringrichtung gleich grossen Beanspruchungen unterliegt. Diese ideale Forderung kann aber für Böden bzw. Behälter gleicher Dicke nicht erfüllt werden, da der wellenförmige Verlauf der Spannungen naturgemäss nicht ausgemerzt werden kann. Wir müssen gezwungenermassen diese Forderung dahin einschränken, dass die Beanspruchung im Scheitel, die grösste Beanspruchung in der Krempe und in der Zylinderschale gleich gross ausfallen soll. Die elliptische Bodenschale erfüllt diese Forderung nicht,



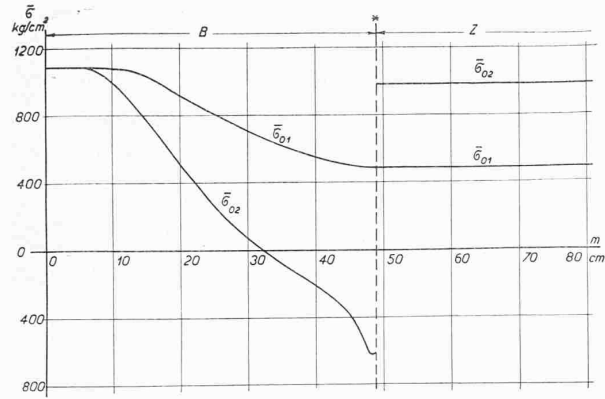


Abb. 24. Berechnete Hautspannungen des Behälters gleicher Dicke  $2h = 1,2$  cm und dem Halbmesser  $a = 39,4$  cm mit dem Boden  $H_1$  von günstigster Gestalt für  $p = 20$  at.

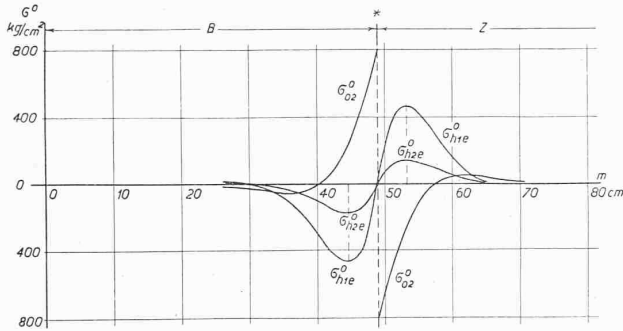


Abb. 25. Berechnete Unstetigkeitsspannungen des Behälters mit den Böden  $H_1$  für  $p = 30$  at.

Tabelle I. Die grössten Beanspruchungen des zylindrischen Kessels gleicher Dicke  $2h = 1,2$  cm mit der Bodenschale P,  $H_1$ ,  $H_2$ , und K, bei  $p = 30$  at.

Bodenform Abb. 20	$\frac{r}{a}$	$\frac{R}{a}$	$\frac{b}{a}$	Bodenschale		Zylinder- schale $\sigma'_{z \max}$ kg/cm <sup>2</sup>	Spannungs- verlauf s Abb.
				$\sigma'_{\theta \max}$ kg/cm <sup>2</sup>	$\sigma'_{\phi}$ kg/cm <sup>2</sup>		
P	0,24	2,031	0,492	1448	1000	1115	6
$H_1$	0,31	2,217	0,490 ÷ 0,538	1089	1015	1086	26
$H_2$	0,37	1,792	0,583 ÷ 0,615	895	884	1070	27
K	1,00	1,000	1,000	739	492	1018	21

Wir wollen noch kurz auf eine zweckmässige Verbindungsmöglichkeit von Boden und Trommel hinweisen, insofern diese nicht stumpf miteinander verschweisst werden. Ueber die Länge des zylindrischen Bordes bzw.

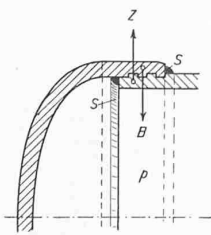


Abb. 23. Zweckmässige Befestigungsweise von Boden- u. Zylinderschale.

über die zweckmässige Lage der Schweissnaht sind in der erwähnten Arbeit nähere Angaben gemacht.<sup>1)</sup> Im allgemeinen ist die Verbindungsstelle näher an den eigentlichen Schalenrand zu verlegen, als dies bisher üblich war. Wie wir oben kurz angedeutet haben, ist der Bodenschalenrand bestrebt, sich in der Pfeilrichtung B (Abbildung 28) gegen die Kesselaxe zu bewegen, während die Zylinderschale sich in der Pfeilrichtung Z auszuweiten versucht.

Durch diese gegenläufige Bewegung der Schalenränder werden bei der üblichen Befestigungsweise, wo der Bodenschalenrand in die Zylinderschale eingeschoben wird, die Niete auf Zug beansprucht. Stülpen wir das zylindrische Bord des Bodens über die Zylinderschale, so werden die Niete von dieser Reaktionskraft entlastet. Die Schalenränder drücken unter dem innern Flüssigkeitsdruck  $p$  aufeinander. Um die Niete noch von

<sup>1)</sup> Siehe Huggenberger I, c., Seite 180 u. ff.

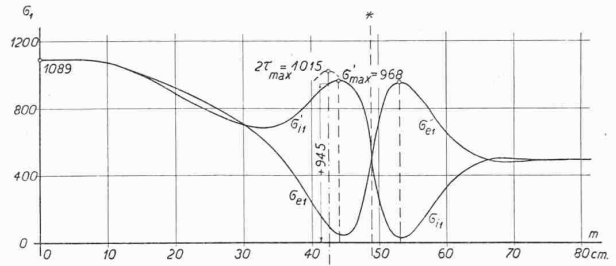


Abb. 26. Berechnete resultierende Normalspannungen des Behälters mit den Böden  $H_1$  für  $p = 30$  at.

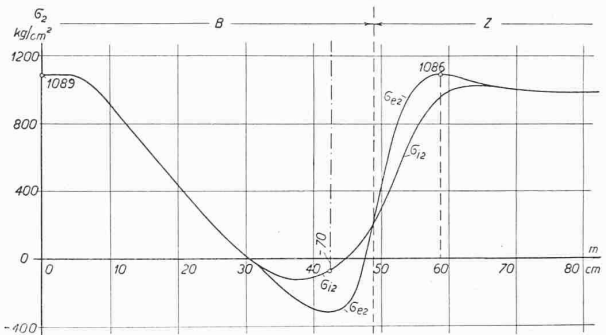


Abb. 27. Berechnete resultierende Normalspannungen des Behälters gleicher Dicke  $2h = 1,2$  cm und dem Halbmesser  $a = 39,4$  cm mit dem Boden  $H_2$  (Scheitelspannung = grösste Beanspruchung in der Kreppe) für  $p = 30$  at.

der Scherkraft zu entlasten, die von dem auf die Bodenfläche in Richtung der Kesselaxe wirkenden resultierenden Flüssigkeitsdruck herrührt, kann der Boden mit Nuten versehen werden, die in entsprechende Kerben des Zylinderschalensrandes eingreifen (Abbildung 28). Um den Zylinderschalensrand einzuziehen, ist der Bodenschalenrand zu erwärmen, bis die radiale Ausweitung die Höhe der Nute erreicht. Ein eigentliches Schrumpfen braucht nicht stattzufinden. Zur Abdichtung kann auf der Innen- und Aussen-seite eine leichte Dichtungsschweissung  $S$  vorgenommen werden. Durch diese Massnahmen wird unter Umständen die Vernietung überhaupt entbehrlich.

Zusammenfassung.

Es wird ein Näherungsverfahren zur Berechnung der Spannungen in einem zylindrischen mit stetig gewölbten Böden versehenen Behälter entwickelt und dessen Brauchbarkeit durch sorgfältig ausgeführte Messungen nachgewiesen. An Hand dieses Rechnungsverfahrens werden einfache Gleichungen zur Ermittlung der grössten Beanspruchung aufgestellt und die Frage der günstigsten und widerstandsfähigsten Bodenform eingehend erörtert.