Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 91/92 (1928)
Heft: 18

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

Autor: Huggenberger, A.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-42494

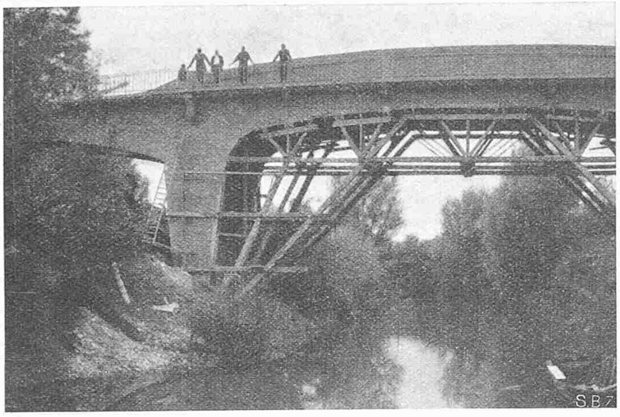

Fig. 4. Le nouveau pont de Labarthe avec son cintre.

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 m³ 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*[1]) durchgeführten Versuche an gewölbten Böden, sowie die Versuchsergebnisse des *Schweizerischen Vereins von Dampfkesselbesitzern*[2]) 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 Krempenhalbmessers 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 Krempenhalbmessers hingewiesen. Die geringe Grösse des Krempenhalbmessers bedingt bei der üblichen korbbogenförmigen 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 grosse Beanspruchungen.

Betrachten wir vorerst eine Schale mit stetig gekrümmter Meridiankurve, z. B. eine elliptische Bodenschale mit verschieden grossem Krümmungshalbmesser r am Ende der grossen Axe a, so lehren die Gleichungen (1) und (2) auf Seite 203, dass die Hautspannungen mit abnehmendem Krempenhalbmesser r beträchtliche Werte annehmen.[1]) Je kleiner der Krempenhalbmesser 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 Rechnungsverfahren für eine Anzahl Behälter gleicher Blechdicke mit elliptischer Bodenschale und verschieden grossem Krempenhalbmesser 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 σ^*_{02} gegeben. Ist $a/r > 1{,}26$, so rückt das Spannungsmaximum, das bis $a/r = 2{,}66$, durch σ_{i1} gegeben ist, vom Schalenrand ab. Da für $a/r > 2{,}66$ die Ringnormalspannung σ_{i2} 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.[2]) 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 Krempenhalbmessers r bewertet werden. Für die elliptische Bodenschale vom Halbaxen-

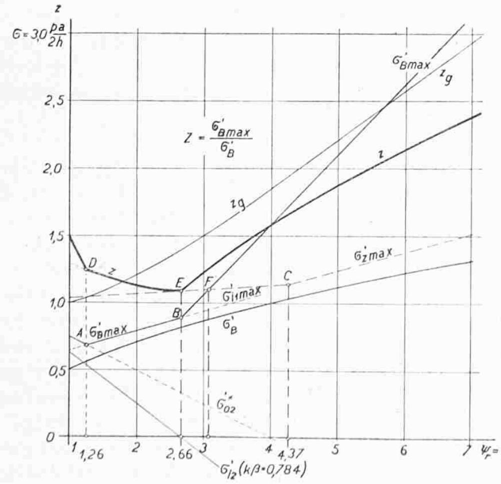

Abb. 15. Die berechneten grössten Beanspruchungen des zylindrischen Behälters gleicher Dicke mit elliptischen Böden in Abhängigkeit von a/r.

[1]) Siebel und Körber, „Versuche über die Anstrengung und Formänderung gewölbter Kesselböden mit und ohne Mannloch bei der Beanspruchung durch innern Druck". Abhandlung Nr. 59 und 60, Verlag Stahleisen Düsseldorf, 1926.

[2]) Versuche des Schweizerischen Vereins von Dampfkessel-Besitzern, deren Durchführung und graphische Austragung mir oblag, siehe l. c., Seite 43 u. ff., sowie teilweise in „S. B. Z.", Bd. 91, Seite 109.

[1]) 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.

[2]) Der von uns aus setzereitechnischen 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 Krempen-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 Unstetigkeitspannungen. Der Umstand, dass bei korbbogenförmigem Meridian ein sprungweiser Uebergang von der Krempenkrümmung und die Krümmung der mittlern Wölbung stattfindet, bedingt Unstetigkeitspannungen, die selbst dann, wenn der Krempenhalbmesser verhältnismässig gross ist, beträchtliche Werte erreichen. Besonders nachhaltig bestätigen dies die in nebenstehender Abbildung 16 enthaltenen Versuchsergebnisse, die wir an einem korbbogenförmigen Boden von der Dicke $2\,h = 2{,}64$ cm, dem mittlern Wölbungshalbmesser $R = 139$ cm, dem Krempenhalbmesser $r = 25$ cm und dem Zylinderschalenhalbmesser $a = 73{,}4$ 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 Krempe $2\,\tau'_{M\,\max} = 1800$ kg/cm², während der Mittelwert der Scheitelspannung 768 kg/cm² erreichte, sodass sich ein Spannungsverhältnis $2\,\tau'_{M\,\max} : \sigma'_b \cong 2{,}3$ 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/cm² und für die Spannung im Bodenscheitel 1038 kg/cm², d. h. ein Spannungsverhältnis von 1,5. Trotzdem der Krempenhalbmesser des korbbogenförmigen Bodens bedeutend grösser ist, wie beim elliptischen Boden, erlangt die grösste Beanspruchung einen beträchtlich höhern Wert.

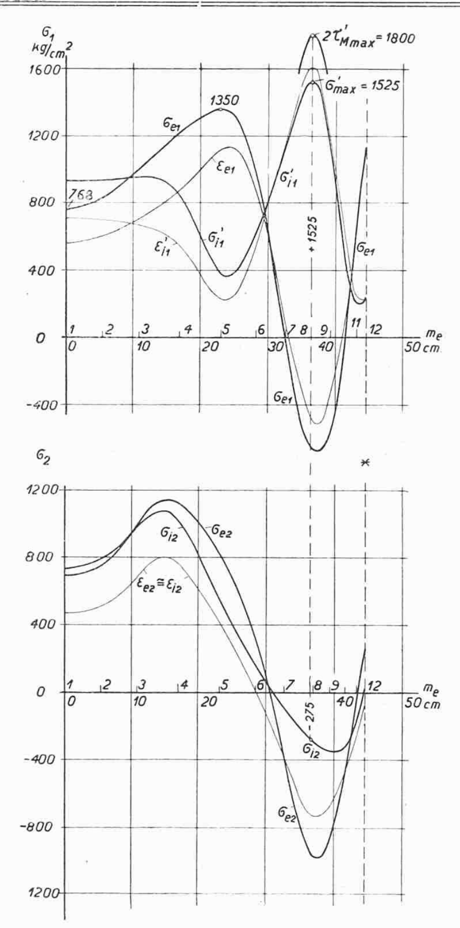

Abb. 16. Die aus den gemessenen Dehnungen und Verbiegungen ermittelten Normalspannungen an einem angenieteten korbbogenförmigen Boden W eines Dampfkessels, bei $p = 32$ at; $2\,h_b = 2{,}64$ cm, $2\,h_z = 2{,}6$ cm, $R = 139{,}0$ cm, $r = 25{,}0$ cm, $a = 73{,}4$ cm, $b = 33{,}4$ cm. * = Schalenrand.

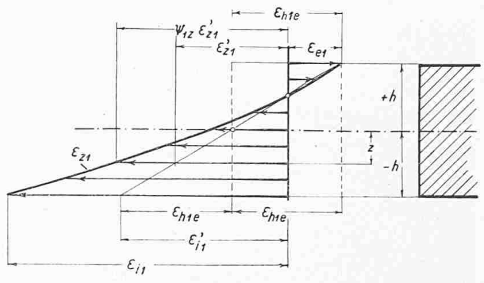

Abb. 17. Verlauf der Dehnungen über die Blechdicke bei grosser Blechdicke.

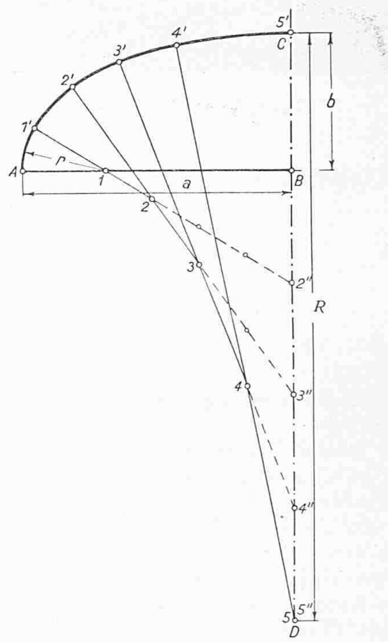

Abb. 18. Konstruktion der Meridiankurve der Bodenschale aus Kreisbogenstücken.

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 Halbaxenverhältnis 2 : 1 eine höhere Widerstandsfähigkeit aufweist als korbbogenförmige 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 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- bezw. Spannungsverlauf über die Blechdicke linear angenommen werden dürfe. Dies trifft bei verhältnismässig *grosser Bleckdicke* 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 ε'_{i1} die Dehnung, die dem linearen Verlauf entspricht, ε_{i1} die Dehnung, die dem hyperbolischen Verlauf zukommt, so ist näherungsweise mit $\psi_1 = (R_1 + h)/(R_1 - h)$ [1])

$$\varepsilon_{i1} = \psi_1\,\varepsilon'_{i1} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (35)$$

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 Krempe den kleinsten Krümmungshalbmesser aufweist, wird sich dieser Einfluss dort in besonders hohem Masse geltend machen und trägt zu der weitern Erhöhung der an sich schon sehr grossen Beanspruchung der Bodenschale bei. Die zweckmässige Bemessung des Krempenhalbmessers 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.

[1]) Siehe Huggenberger, l. c., Seite 98 u. f.

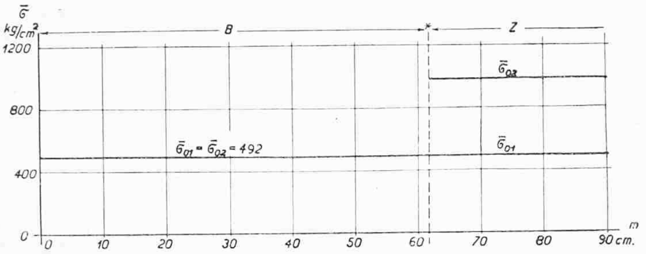

Abb. 19. Berechnete Hautspannungen des Behälters gleicher Dicke $2h = 1{,}2$ cm und dem Halbmesser $a = 39{,}4$ cm mit halbkugelförmigen Böden K für $p = 30$ at.

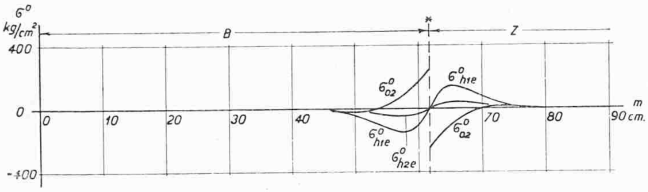

Abb. 20. Berechnete Unstetigkeitspannungen des Behälters mit halbkugelförmigen Böden K für $p = 30$ at.

Vom Standpunkt des praktischen Kesselbaues ist die Verwendung einer stetigen Meridiankurve kein unumgänglich notwendiges Erfordernis, um im Vergleich zum korbbogenförmigen Boden zu einer widerstandfähigern 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 Krempenhalbmesser r, Scheitel-Krümmungshalbmesser R und Bodentiefe b, bezw. 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 korbbogenförmigen 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 Krempen-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 Krempen-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

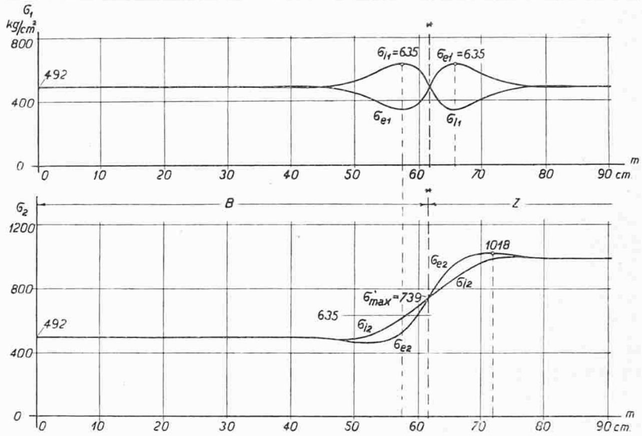

Abb. 21. Berechnete resultierende Normalspannungen des Behälters mit halbkugelförmigen Böden K für $p = 30$ at.

dritten Krümmungsmittelpunktes 3 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 Konstruktions-Verfahren ist eine Unterteilung des Meridians in mindestens drei Kreisbogenstücke bedingt.

Die Forderung nach einem stetigen Verlauf der Meridiankurve und grossem Krempenhalbmesser 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 $\bar{\sigma}_{01} = \bar{\sigma}_{02} = 492$ kg/cm² (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/cm². Die grösste Beanspruchung der Kugelschale tritt am Rande auf, sie beträgt 739 kg/cm². 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/cm² 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 bezw. 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, wie aus einer Gegenüberstellung der Gleichungen (24), (28) und (30) und den Versuchsergebnissen eindeutig hervorgeht. In Abbildung 15 auf Seite 217 ist ausser der grössten Beanspruchung $\sigma'_{b\,\max}$ in der Krempe auch die grösste Beanspruchung $\sigma'_{z\,\max}$ in der Zylinderschale nach Gl. (29) und (30) und die Scheitelspannung σ'_b nach der Gl. (28) in Abhängigkeit von a/r eingetragen. Von den betreffenden Linienzügen überschneiden sich nur die $\sigma'_{z\,\max}$- und $\sigma_{b\,\max}$-Linie im Punkte F, dem ein Verhältnis $a/r = 3{,}1$ entspricht. Die Scheitelspannung σ'_b beträgt in diesem Falle nur 80 % der beiden gleich grossen Höchstwerte, d. h. der Wölbungshalbmesser R im Scheitel fällt für die elliptische Schale zu klein aus. Von Interesse ist die elliptische Schale mit dem Verhältnis $a/r = 2{,}66$, für die der Unterschied zwischen $\sigma_{b\,\max}$ und σ'_b ein Minimum erreicht, sodass das Spannungsverhältnis $z = \sigma_{b\,\max}/\sigma'_b$ den kleinsten Wert aufweist (Abb. 15, Punkt E der z-Kurve). In diesem Falle ist die grösste Beanspruchung in der Zylinderschale grösser als die genannten Werte. Die eingehenden rechnerischen Untersuchungen zeigen, dass die Grundbedingungen der *günstigsten Bodenform* durch die Bodengestalt erfüllt wird, deren Meridiankurve durch die in Abb. 18 erläuterte Konstruktion festgelegt ist und deren Krempen-Krümmungshalbmesser r und Scheitel-Krümmungshalbmesser R

$$r = 0{,}31\,a \qquad R = 2{,}217\,a$$

ist. Diese Werte bedingen eine Bodentiefe

$$b = 0{,}490\,a \text{ bis } 0{,}538\,a$$

je nachdem der Meridian aus 3 bis 14 Kreisbogenstücken zusammengesetzt ist. Der Boden fällt höchstens 4 % tiefer aus wie der elliptische Boden vom Halbaxenverhältnis 2 : 1 und erfüllt somit alle oben formulierten Bedingungen der am zweckmässigsten geformten Bodenschale.

Um einen Vergleich mit den Ergebnissen des Behälters mit elliptischen Böden vom Halbaxenverhältnis rd. 2 : 1 vornehmen zu können, ist die Meridiankurve in 14 Kreisbogenstücke unterteilt. Die Konstruktion ist aus Abbildung 22, Meridiankurve H_1, ersichtlich. In Abbildung 23 sind die für den Meridian charakteristischen Werte, nämlich R_1, R_2, β und k_b über der abgewickelten Meridiankurve der Schalenmittelfläche m aufgetragen. Der Unterschied gegenüber Abbildung 3 liegt vor allen Dingen in der stufenweise Zunahme des Krümmungshalbmessers R_1. Die Berechnung der Spannungen wurde für $p = 30$ at in der erörterten Weise durchgeführt. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 24, 25 und 26 eingetragen. Infolge des grössern Krempenhalbmessers (bei der genannten elliptischen Schale beträgt der Krempenhalbmesser rd. $r = 0{,}25\,a$) nehmen sowohl die Haut- wie die Unstetigkeitspannungen in der Nähe des Schalenrandes wesentlich kleinere Werte an, als bei der betrachteten elliptischen Schale. Die Scheitelspannung beträgt 1089 kg/cm², die grösste Beanspruchung in der Krempe $2\,\tau'_{M\,\max} = 1015$ kg/cm² und die grösste Normalspannung in der Zylinderschale 1086 kg/cm². Die grösste Beanspruchung in der Krempe fällt etwas kleiner aus, wie die beiden übrigen Werte. Es ist aber zu beachten, dass durch die tatsächlich auftretenden Einspannungsbedingungen der Schalenränder dieser Wert sich erhöht, sodass in Wirklichkeit sämtliche drei Spannungswerte praktisch gleich gross ausfallen werden. Die grösste Beanspruchung des Behälters P mit elliptischen Böden (Abbildung 22), Meridiankurve P, $2\,\tau'_{M\,\max} = 1448$ kg/cm², ist 33 % grösser wie die grösste Beanspruchung des Behälters H_1 mit der Bodenform H_1 (Abbildung 22) die den Wert von 1089 kg/cm² erreicht. Bei gleich hoher Beanspruchung kann somit der Betriebsdruck des Behälters H_1 33 % höher festgelegt werden wie bei Behälter P. Die grösste Beanspruchung des Behälters H_1 folgt aus der Gleichung (24)

UEBER DIE GÜNSTIGSTE GESTALT DES VOLLEN GEWÖLBTEN BODENS ZYLINDRISCHER KESSELTROMMELN GLEICHER DICKE UND IHRE BERECHNUNG.

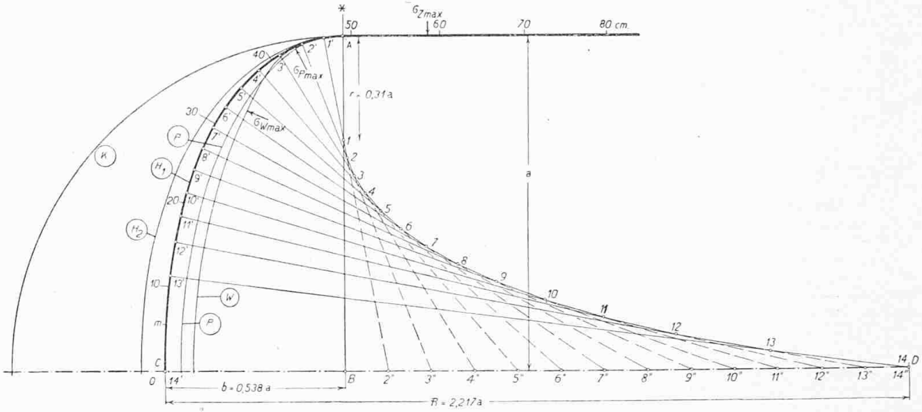

Abb. 22. Die Gestalt des Meridians der Schalenmittelfläche der Böden H_1, H_2, P, K und W.
Der Meridian der günstigsten Bodenform H_1 ist beispielsweise aus 14 Kreisbogenstücken zusammengesetzt.

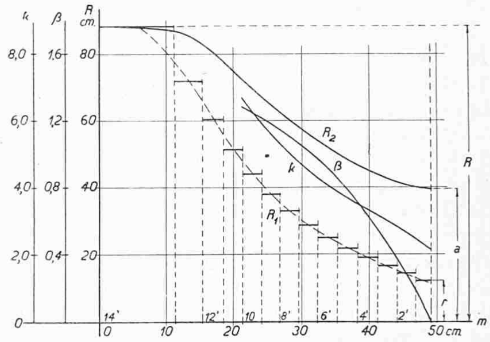

Abb. 23. Die Krümmungshalbmesser R_1, R_2 des günstigsten Bodens H_1
(Scheitelspannung des Bodens ≈ grösste Beanspruchung in der Krempe,
≈ grösste Beanspruchung in der Zylinderschale).

$$\sigma_{\max} = 2{,}22\,\frac{p\,a}{4\,h} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (34)$$

Dem gleichen Betriebsdruck p und der gleichen grössten Beanspruchung genügt bei Behälter H_1 eine Blechdicke von rd. 0,9 cm gegenüber 1,2 cm bei Behälter P. Die Blechdicke kann um 25 % kleiner gewählt werden.

Wird die Bedingung, dass die grössten Beanspruchungen gleich gross ausfallen sollen, nur auf die Bodenschale allein beschränkt, so führt die in Abbildung 18 erläuterte Konstruktion bei 14 Kreisbogenstücken zu einer tiefern Bodenform. In diesem Falle ist $r = 0{,}37\,a$ anzunehmen, womit $R = 1{,}79\,a$ und $b = 0{,}615\,a$ wird. Der Verlauf dieses Meridians H_2 ist aus Abbildung 22 ersichtlich, während der in bekannter Weise ermittelte Spannungsverlauf für $p = 30$ at in Abbildung 27 dargestellt ist. Die Normalspannung im Scheitel beträgt 884 kg/cm² und ist praktisch gleich gross wie die grösste Beanspruchung in der Krempe, die 895 kg/cm² beträgt. Es könnte somit der Betriebsdruck dieses Behälters H_2 rd. 62 % erhöht werden, um die gleiche Beanspruchung wie im Falle des Behälters P zu erhalten. Seine Tiefe ist jedoch um 25 % grösser. Ausserdem ist zu beachten, dass die grösste Normalspannung in der Zylinderschale einen grössern Wert, nämlich 1070 kg/cm² erreicht, also nahezu den selben Wert wie im Falle des Behälters H_1. Es kommt deshalb diesen Hauptabmessungen des Bodenschalen-Meridians praktisch nur eine untergeordnete Bedeutung zu. Die wichtigsten Ergebnisse der Berechnung des Spannungsverlaufes des Behälters mit der Bodenform H_1, H_2, K, P sind in der Tabelle I zusammengestellt.

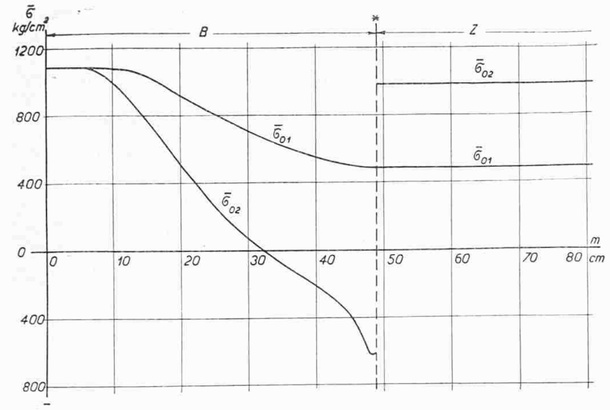

Abb. 24. Berechnete Hautspannungen des Behälters gleicher Dicke $2h = 1{,}2$ cm und dem Halbmesser $a = 39{,}4$ cm mit dem Boden H_1 von günstigster Gestalt für $p = 20$ at.

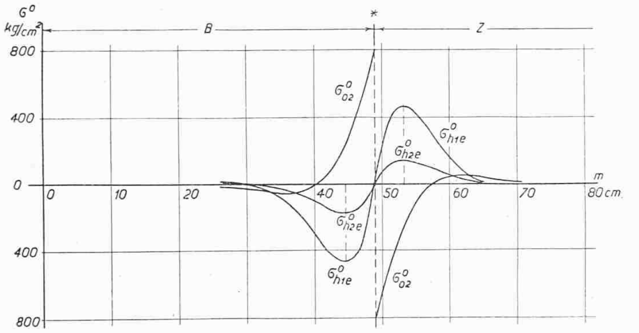

Abb. 25. Berechnete Unstetigkeitspannungen des Behälters mit den Böden H_1 für $p = 30$ at.

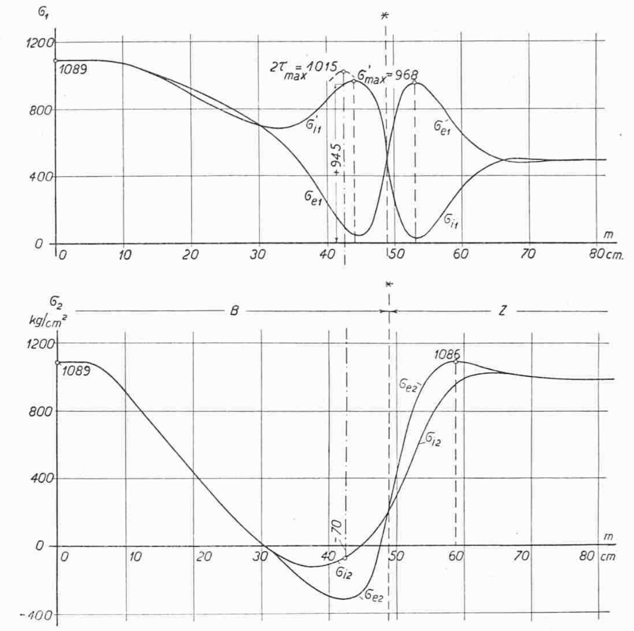

Abb. 26. Berechnete resultierende Normalspannnngen des Behälters mit den Böden H_1 für $p = 30$ at.

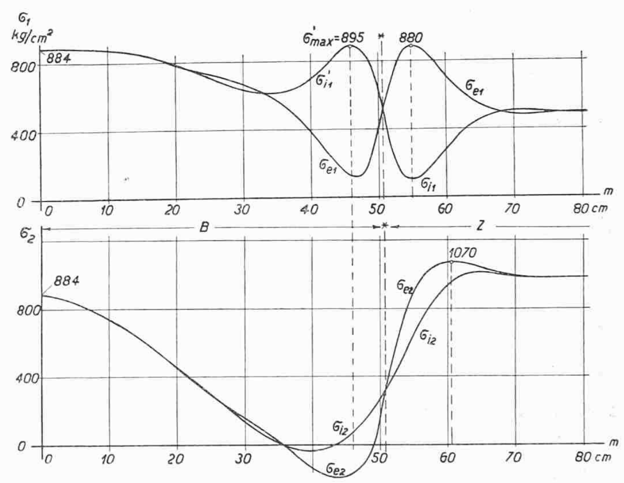

Abb. 27. Berechnete resultierende Normalspannungen des Behälters gleicher Dicke $2h = 1{,}2$ cm und dem Halbmesser $a = 39{,}4$ cm mit dem Boden H_2 (Scheitelspannung = grösste Beanspruchung in der Krempe) für $p = 30$ at.

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 $\sigma'_{b\,max}$ kg/cm²	Bodenschale σ'_b kg/cm²	Zylinderschale $\sigma'_{z\,max}$ kg/cm²	Spannungs-Verlauf s. Abb.
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 bezw. über die zweckmässige Lage der Schweissnaht sind in der erwähnten Arbeit nähere Angaben gemacht.[1]) 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 Nieten auf Zug beansprucht. Stülpen wir das zylindrische Bord des Bodens über die Zylinderschale, so werden die Nieten von dieser Reaktionskraft entlastet. Die Schalenränder drücken unter dem innern Flüssigkeitsdruck p aufeinander. Um die Nieten noch von 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 Zylinderschalenrandes eingreifen (Abbildung 28). Um den Zylinderschalenrand 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 Aussenseite eine leichte Dichtungschweissung S vorgenommen werden. Durch diese Massnahmen wird unter Umständen die Vernietung überhaupt entbehrlich.

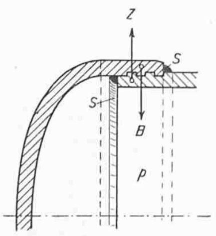

Abb. 23. Zweckmässige Befestigungsweise von Boden- u. Zylinderschale.

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.

[1]) Siehe Huggenberger l. c., Seite 180 u. ff.