

**Zeitschrift:** Schweizerische Bauzeitung  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 89 (1971)  
**Heft:** 42

**Artikel:** Zur Stabilität ringversteifter Rohre unter Aussendruckbelastung  
**Autor:** Feder, Georg  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-85006>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 19.04.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

## Zur Stabilität ringverstärkter Rohre unter Aussendruckbelastung

Von Dr.-Ing. Georg Feder, Linz

DK 539.319 : 621.643.23

Selten weist die Fachliteratur bei einem Problem derart widersprechende Meinungen auf, wie bei der an sich alten Frage des Bemessens ringverstärkter Rohre gegen Beulen. Die folgenden Ausführungen gehen auf die Ursachen dieser Diskrepanzen ein und versuchen damit eine Klärung herbeizuführen.

### 1. Freiliegendes Rohr mit fest angeschlossenen Ringen

#### 1.1 Rohrschale

Einheitlichkeit herrscht über die Lösung des in Bild 1 dargestellten Beulfalles. Die Rohrschale beult dabei allein; ihr kritischer Aussendruck ist von der Steifigkeit der Ringe unabhängig. Es stehen zahlreiche Lösungen dieses Stabilitätsproblems zur Verfügung, die sich gegenseitig ergänzen [1] bis [8].

#### 1.2 Versteifungsring

Der Beulfall nach Bild 1 ist für das Tragvermögen des Rohres nur dann massgebend, wenn die Versteifungsringe stark genug sind, den in Bild 2 dargestellten Beulfall zu verhindern. Bei diesem wird zuerst der Ring labil, was ein gemeinsames Beulen von Ring und Rohr zur Folge hat, das man eigentlich wegen der konstanten Verhältnisse in der Längsrichtung des Rohres als Knicken ansprechen muss. Über die Grösse der zum Verhindern dieses Beulfalles erforderlichen Ringsteifigkeit weichen nun die Meinungen beachtlich voneinander ab.

Bezeichnet man nach Bild 3 den Ringabstand mit  $l$ , die Breite der mit dem Ring wirkenden Rohrschale mit  $l_m$  [nach Gl. (45)] und den kritischen Aussendruck des Rohres mit  $p_{kr}$ , dann ist der Ring so zu bemessen, als ob er allein eine konzentrische Linienlast  $q_{kr}$  aufzunehmen hätte, die sich nach Meinung A [3], [7], [18], [19] mit

$$(1) \quad q_{kr} = p_{kr} l$$

nach Meinung B [6] zum Teil auch [8] mit

$$(2) \quad q_{kr} = p_{kr} l_m$$

nach Meinung C [9] mit

$$(3) \quad q_{kr} = \sigma_{SF} t s$$

ergibt. Gleichung (3) fasst die Ringbemessung als Spannungsproblem auf, wobei  $\sigma_{SF}$  die Fließgrenze des Mantelbleches bezeichnet. Sie wird bei der folgenden Stabilitätsuntersuchung nicht weiter verfolgt.<sup>1)</sup>

Die beiden nach [10] erforderlichen, aus den Gln. (1) und (2) ermittelten Biegesteifigkeiten des Versteifungsringes sind

$$(4) \quad (J_V E_V)_{erf} = q_{kr} r^3 / 3.$$

Sie weichen demnach – so wie  $l_m$  von  $l$  – um ein Vielfaches voneinander ab. Ähnliches gilt für die Ermittlung der Ringbeanspruchung.

<sup>1)</sup> Diese Gleichung ist vor allem für den Anschluss des Ringes an die Rohrschale abgeleitet worden. Für die Ringbemessung selbst wird in der letzten Auflage von [9] eine weitere Gleichung angegeben, die der Meinung A entspricht.

$$(5) \quad \sigma_{V, kr} = q_{kr} r / F_V$$

Ein Abschätzen der richtigen Vorgangsweise lässt sich mit der folgenden grundsätzlichen Betrachtung des Knickverhaltens mehrteiliger Systeme zeigen, deren parallel angeordnete Einzelemente wohl ungleich beansprucht, jedoch so untereinander gekoppelt sind, dass sie nur gleichzeitig und nur nach einer gemeinsamen Biegelinie knicken können.

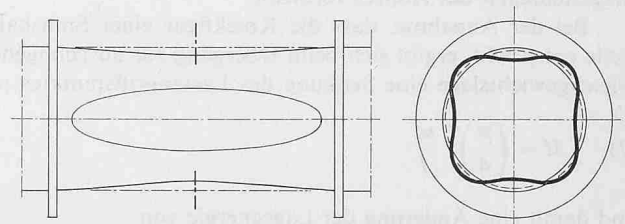


Bild 1. Stabilitätsverlust durch Beulen der Rohrschale allein

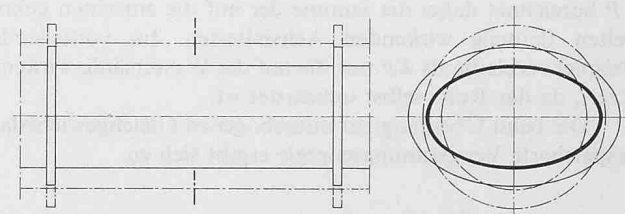


Bild 2. Stabilitätsverlust durch Knicken der Versteifungsringe. Die Rohrschale gleicht dabei ihre Querschnittsform der Knickfigur der Versteifungsringe an

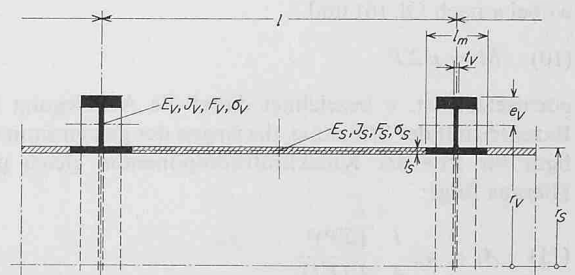


Bild 3. Bezeichnung der Ausgangswerte für die Bemessung ringverstärkter Rohre

Zur besseren Anschaulichkeit sei zunächst vom ringverstärkten Rohr abgegangen und ein aus zwei parallelen Elementen bestehender Knickstab nach Bild 4 als analoges Stabilitätsproblem betrachtet. Das eine Element besteht hier aus der Wassersäule. Sie hat die gesamte Druckkraft aufzunehmen, hat aber selbst keine Biegesteifigkeit. Das zweite Element dieses Knickstabes ist das, die Wassersäule umschliessende Rohr. Es hat wohl eine Biegesteifigkeit  $E_R J_R$ , ist aber selbst infolge der besonderen Krafteinleitung axial unbelastet.

Beim Knickvorgang eines solchen Stabes folgen Rohr und Wassersäule einer gemeinsamen Biegelinie. Die Krümmung  $\kappa$  der gemeinsamen Biegelinie folgt bekanntlich dem Gesetz

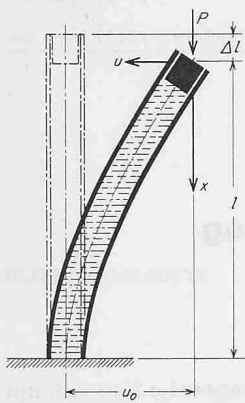


Bild 4. Grundsätzliches Beispiel zum Stabilitätsverhalten mehrteiliger Tragsysteme, die so gekoppelt sind, dass sie nur nach einer gemeinsamen Biegelinie knicken können

$$(6) \quad \kappa = -\frac{M}{\Sigma(EJ)},$$

wobei im vorliegenden Fall als  $\Sigma(EJ)$ , also als die Summe der dem Moment entgegenwirkenden Biegesteifigkeiten, nur die Biegesteifigkeit des Rohres verbleibt.

Bei der Annahme, dass die Knickfigur einer Sinushalbwellen entspricht, ergibt sich beim Übergang zur ausgebogenen Gleichgewichtslage eine Senkung des Lastangriffspunktes um

$$(7) \quad \Delta l = \left(\frac{\pi}{4}\right)^2 \frac{u_0^2}{l}$$

und damit eine Änderung der Lageenergie von

$$(8) \quad A_p = -\Delta l \Sigma P$$

$\Sigma P$  bezeichnet dabei die Summe der auf die einzelnen gekoppelten Bauteile wirkenden Achsiallasten. Im vorliegenden Beispiel verbleibt als  $\Sigma P$  nur die auf die Wassersäule wirkende Kraft, da das Rohr selbst unbelastet ist.

Die beim Übergang zur ausgebogenen Gleichgewichtslage gespeicherte Verspannungsenergie ergibt sich zu

$$(9) \quad A_i = \frac{1}{2} \int_{x=0}^l M \cdot \kappa \, dx,$$

wobei  $\kappa$  nach Gl. (6) und

$$(10) \quad M = u \Sigma P$$

einzusetzen ist.  $u$  bezeichnet dabei die Ausbiegung bzw. die Exzentrizität der Stützlinie, die wegen der gemeinsamen Knickfigur für jede der Knickkraftkomponenten gleich gross ist. Hieraus folgt:

$$(11) \quad A_i = u_0^2 \frac{l}{4} \frac{(\Sigma P)^2}{\Sigma(EJ)}$$

und das Energiepotential aus (7), (8) und (11)

$$(12) \quad \Pi = u_0^2 \left[ -\left(\frac{\pi}{4}\right)^2 \frac{\Sigma P}{l} + \frac{l}{4} \frac{(\Sigma P)^2}{\Sigma(EJ)} \right]$$

Wird zum Ermitteln des Verzweigungspunktes die zweite Variation des Energiepotentials Null gesetzt, so folgt hieraus die kritische Lastsumme

$$(13) \quad (\Sigma P)_{kr} = P_{kr} = \pi^2 \frac{\Sigma EJ}{(2l)^2}$$

Für den einteiligen Knickstab gilt nach Euler bekanntlich

$$(13a) \quad P_{kr} = \pi^2 \frac{EJ}{(2l)^2}$$

Sobald also bei einem zusammengesetzten System eine für alle Teile einheitliche Knickfigur auftritt, kann demnach wie beim einteiligen Stab die Eulersche Gleichung angesetzt werden, wobei jedoch die Biegesteifigkeit durch die Summe der Biegesteifigkeiten der Einzelelemente zu ersetzen ist. Die Knickkraft selbst tritt als Summe der auf die Einzelelemente wirkenden Komponenten auf, wobei die Verteilung der Einzelanteile gleichgültig ist. So zeigt auch unser Beispiel im elastischen Bereich eine Knicklast

$$P_{kr} = \pi^2 \frac{E_R J_R + 0}{(2l)^2},$$

die genauso gross ist, wie wenn die Kraft statt in die Wassersäule in das Rohr selbst eingeleitet worden wäre<sup>2)</sup>. Das Ergebnis ändert sich auch dann nicht, wenn die gleiche Kraft zum Teil durch die Wassersäule und zum anderen Teil durch das Rohr geleitet wird.

Aus diesem Beispiel kann der Schluss gezogen werden, dass man sich bei der Knickuntersuchung solcher zusammengesetzter Systeme nicht von der Kraftaufteilung täuschen lassen darf. Es wäre in unserem Beispiel ein Trugschluss, aus der Tatsache, dass das rohrförmige Element des Knickstabes ohnedies keinen Kraftanteil bekommt, zu schliessen, dass es auch keine Biegesteifigkeit braucht. – Es muss im Gegenteil hier den alleinigen Träger der gesamten Biegesteifigkeit des Systems verkörpern.

Zieht man nun den Analogieschluss zum aussendruckbelasteten, ringversteiften Rohr im Beulfall nach Bild 2, so kann man folgendes feststellen:

a) Das System besteht aus zwei Elementen: dem Versteifungsring (samt mittragender Rohrlänge  $l_m$ ) mit den Querschnittswerten  $F_V, J_V, i_V$  und der Umfangskraft  $N_V$  einerseits, und der dazwischen liegenden Rohrschale andererseits mit den Querschnittswerten  $F_S, J_S, i_S$  und der Umfangskraft  $N_S$ .

b) Beim Knicken des Versteifungsrings nach Bild 2 wird der Rohrschale die Biegelinie des Ringes aufgezwungen, so dass beide Elemente stets die gleichen Biegelinien aufweisen. Es liegen somit grundsätzlich gleiche Gesetze vor, wie beim mehrteiligen Druckstab des vorgeführten Beispiels.

c) Betrachtet man das versteifte Rohr als eine Folge von Rohrelementen von der Länge  $l$ , von denen jedes also gerade ein Ringintervall einschliesslich Versteifungsring enthält, so gilt für die Umfangskraft  $N_{kr}$  infolge des kritischen Aussendruckes  $p_{kr}$

$$(14) \quad N_{kr} = (\Sigma N)_{kr} = p_{kr} r l.$$

Diese Umfangskraft ist mit der Knickkraft im Beispiel vergleichbar. Ihre Aufteilung in die Anteile  $N_V$  und  $N_S$  auf Versteifungsring und Rohrschale ist demnach für das elastische Beulen (bzw. Knicken) belanglos, denn das durch eine Ausbiegung  $u$  verursachte Biegemoment hat in jedem Fall die Grösse  $u \Sigma N$ .

d) Infolge der gleichen Biegeverformung von Rohr und Ring ergibt sich auch hier der Biegeverstand aus der Summe der Biegesteifigkeiten der Einzelteile mit

$$(15) \quad \Sigma(EJ) = E_S J_S + E_V J_V.$$

Analog zu Gl. (12) hat der (hier nicht abgeleitete) Ausdruck des Energiepotentials beim Übergang zur nach Bild 2

<sup>2)</sup> Zum gleichen Ergebnis kommt man auch auf einem anderen Weg, aus einer Ableitung von W. Flüge [5] für das Druckrohr ohne Längskraft.

ausgebeulten (zweiwelligen) Gleichgewichtslage des Rohres die Form

$$(16) \quad \Pi = \frac{\pi}{4} \left\{ 3 \left[ 3 \frac{\Sigma(EJ)}{r} - r \Sigma N \right] \left( \frac{u_0}{r} \right)^2 + 2 \left[ \frac{\Sigma(EJ)}{r} + r \Sigma N \right] \left( \frac{u_0}{r} \right)^4 \right\}$$

Hieraus folgt analog Gl. (13) durch Nullsetzen der 2. Variation die kritische Summe der in Rohrmantel und Ring wirkenden Umfangskräfte mit

$$(17) \quad (\Sigma N)_{kr} = \frac{3 \Sigma(EJ)}{r^2}$$

Aus den Gln. (14), (15) und (17) folgt damit

$$(18) \quad E_S J_S + E_V J_V \geq p_{kr} l \frac{r_S r_V^2}{3} \cong p_{kr} l \frac{r^3}{3},$$

was für das Ermitteln der erforderlichen Ringsteifigkeit, die eingangs zitierte Meinung A, Gl. (1) bestätigt, da  $E_S J_S$  im allgemeinen gegenüber  $E_V J_V$  verschwindet.

Obwohl es sich bei Rohrmantel und Ring meist um den gleichen Werkstoff handelt, wurde in Gl. (18) der jeweilige  $E$ -Modul gesondert ausgewiesen, da die Spannungen im Versteifungsring  $\sigma_V$  wesentlich unter denen der Rohrschale  $\sigma_S$  liegen können. Für das Ermitteln der Spannung  $\sigma_V$  im Versteifungsring gilt nämlich keinesfalls die Gl. (1), sondern, wie [11] nachweist, die Gl. (2). Aus (2) und (5) folgt somit

$$(19) \quad \sigma_{V, kr} = p_{kr} \frac{r_S \cdot l_m}{F_V}$$

$$(20) \quad \sigma_{S, kr} = p_{kr} \frac{r_S}{t_S} \quad \left( \begin{array}{l} \text{hinreichend grosser Abstand} \\ \text{vom Ring vorausgesetzt} \end{array} \right)$$

Die Tatsache, dass für die *Ringsteifigkeit* Gl. (1), hingegen für die *Spannung* im Ring der wesentlich kleinere Wert nach Gl. (2) massgebend ist, wirkt sich sehr günstig im Falle des teilplastischen Beulens aus. Der Ring, der ja den Hauptteil zur Biegesteifigkeit des Systems beitragen muss, liegt mit Gl. (19) beim kritischen Aussendruck meist noch immer im elastischen Bereich, wenn auch die Rohrschale mit Gl. (20) die Proportionalitätsgrenze schon überschritten hat. In diesem häufigen Fall wird in Gl. (15), bzw. (18) nur der ohnedies relativ kleine Summand  $E_S J_S$  durch das Absinken von  $E_S$  verkleinert, was im Endeffekt kaum ins Gewicht fällt.

## 2. Freiliegendes Rohr mit lose aufgesetzten Ringen

### 2.1 Rohrschale

Der Beufall nach Bild 1 bedarf im Falle lose aufgesetzter Ringe einer ergänzenden Untersuchung, weil in einem solchen Falle unter der Wirkung eines Aussendruckes die Ringe spannungslos bleiben, was zur Folge hat, dass die Rohrschale kleiner wird und sich zwischen Rohr und Ring ein Spielraum bildet. Die Rohrschale beult dann innerhalb des Ringes ähnlich wie eine Stollenpanzerung innerhalb des Hinterfüllbetons, wobei am Umfang nurmehr eine Beule auftritt. Dieses Beulproblem wurde von E. Amstutz [13], [14], und H. Juillard [15] gelöst.

Im Gegensatz zur Gebirgsbettung stellt jedoch der aufgesetzte Versteifungsring ein Element dar, das auf die Abtriebskraft  $Z$  wesentlich elastischer reagiert. Die Kraft  $Z$  tritt gemäss Bild 5 an den Übergangspunkten der Stützlinie des freien zu der des anliegenden Bereiches auf.

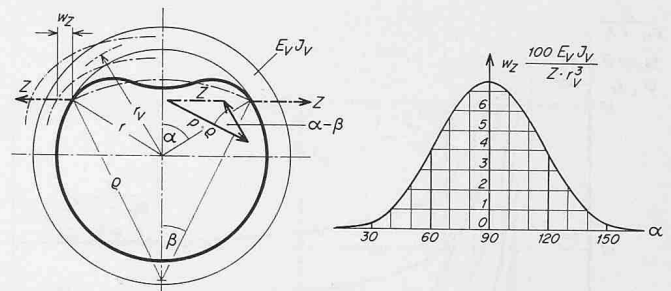


Bild 5. Verformung loser oder im Zuge des Belastungsvorganges lose gewordener Versteifungsringe infolge Beulens der Rohrschale

Es wird im folgenden vorausgesetzt, der Ringabstand sei so klein, dass beim Beulvorgang das Verkrümmen der Rohr-erzeugenden vernachlässigt werden kann. Bei grösserem Ringabstand ist zur Ausbiegung  $w_Z$  des Ringes nach Gl. (22) noch die Ausbiegung der Erzeugenden  $w_{ZS}$  zuzuschlagen. In Annäherung an [20] gilt dann

$$w_{ZS} = \frac{Z \cos^2 \alpha}{l E} \cdot 0,0305 [12 (1 - \nu^2)]^{5/8} \frac{r_S^{3/4} l^{3/2}}{t_S^{9/4}}$$

$$(21) \quad Z \cong p_{kr} l \varrho \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin \alpha}$$

Unter dieser Belastung tritt infolge der Elastizität des Versteifungsringes die Verschiebung  $w_Z$  auf.

$$(22) \quad w_Z = \frac{Z r^3}{\pi E_V J_V} \left[ 1,5 \left( \frac{\pi^2}{4} - \alpha^2 \right) - 3\alpha \sin \alpha \cos \alpha - \left( 1,5 + \frac{\pi^2}{4} - \alpha^2 \right) \cos^2 \alpha + \frac{1}{2} \cos^4 \alpha \right]$$

Die Auswirkung dieser Verschiebung auf die Beulenform ist annähernd die gleiche, wie wenn statt in der Wurzel, im Scheitel der Beule durch Wegnehmen einer Umfangslänge  $w_Z$  auf jeder Seite der Spielraum zur Beulenbildung vergrössert worden wäre. Demgemäss lauten die Gl. (38) und (44) von [14]<sup>3)</sup> wie folgt:

$$(23) \quad \left( \frac{\sigma_N - \sigma_v}{E} + \frac{w_Z}{r \pi} \right) n^3 \leq \leq \Phi \frac{2r}{t} \frac{\sigma_F - \sigma_N}{E} \left[ 1 - \Psi \frac{2r}{t} \frac{\sigma_F - \sigma_N}{E} \right]$$

mit

$$(24a, b) \quad p_{kr} = \frac{t}{r} \frac{\sigma_N}{\varrho/r}; \quad n = \sqrt{1 + 12 \left( \frac{r}{t} \right)^2 \frac{\sigma_N}{E}}$$

wobei

$$(25) \quad \frac{\varrho}{r} = 1 + \Omega \frac{2r}{t} \frac{\sigma_F - \sigma_N}{E} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$$

Die Vorspannung  $\sigma_v$  ist im Regelfall null. Sitzt aber am unbelasteten Rohr der Ring bereits mit einem radialen Spielraum  $k_0$  auf, so wird die Vorspannung  $\sigma_v$  ersetzt durch den Wert  $-k_0 E/r$ .

<sup>3)</sup> Bei Benützung der Arbeit [14] wird empfohlen, dort in Gl. (48) das Wurzelzeichen nicht zu berücksichtigen und in Gl. (49) und (50) im Hinblick auf das Vernachlässigen der Formfehler und das Absinken des  $E$ -Moduls  $\mu = 1,0$  zu setzen, wie dies auch in der Arbeit [13] vorgeschlagen wurde. Weiter sind in den Gln. (26) bis (29) von [14] die Vorzeichen umzukehren, da  $\Delta_2$  als Verkürzung definiert ist, die Neigung der elastischen Linie jedoch eine geometrische Verlängerung darstellt.

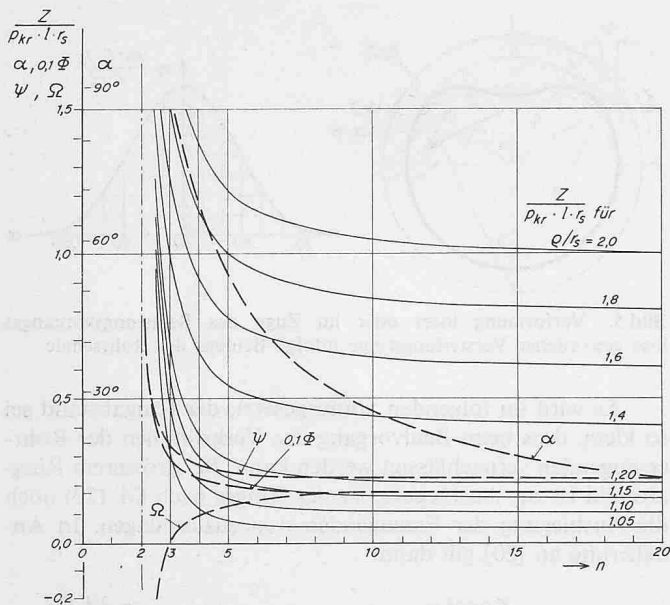


Bild 6. Lösung der Gleichung (26) (volle Linien) und der Hilfsfunktionen  $0,1\Phi$ ,  $\Psi$  und  $\Omega$  nach [14] (strichliert)

Aus den Gln. (21) und (25) folgt:

$$(26) \quad \frac{Z}{p_{kr} l r} = \sqrt{\left(\frac{q}{r}\right)^2 - \sin^2 \alpha - \cos \alpha}$$

Die Funktion Gl. (26) sowie die in [14] abgeleiteten Funktionen  $\Phi$ ,  $\Psi$  und  $\Omega$  sind Bild 6 zu entnehmen. Die Lösung des Gleichungssystems (21) bis (26) erfolgt durch Probieren bei Vorabschätzung von  $q/r$ .

## 2.2 Versteifungsring

Der Beulfall nach Bild 2, bei welchem die Ringe vorzeitig knicken und dabei der Rohrschale ihre Biegelinie aufzwingen, kann nach den Ermittlungen des Abschnittes 1 Gl. (18) gelöst werden, wobei jedoch  $l_m = 0$  zu setzen ist.

Das Biegemoment im Ring infolge  $Z$  (Bild 5) ergibt sich zu

$$(26a) \quad M_V = \frac{Z r_V}{\pi} \sin^3 \alpha.$$

## 3. Freiliegendes Rohr mit vorgespannten losen Versteifungsringen

### 3.1 Rohrschale

Für den Beulfall nach Bild 5 können die Gleichungen des Abschnittes 2.1 angesetzt werden, wobei für  $\sigma_v$  die Druckspannung in der Rohrschale einzusetzen ist, welche bei einer dem radialen Schrumpfmass  $\Delta r$  entsprechenden elastischen Radiusverkleinerung auftritt.

$$\sigma_v = E \cdot \Delta r / r_s$$

Die in [13] [14]<sup>3)</sup> getroffene Annahme, dass der  $E$ -Modul bis zur Streckgrenze konstant ist, kann so lange akzeptiert werden, als beim kritischen Aussendruck die Spannung  $\sigma_{S, kr}$  (in der Rohrschale aus der Normalkraft allein) die Proportionalitätsgrenze nicht überschreitet. Für die Biegespannungen, die dann den Restbetrag (etwa 20%) bis zur Streckgrenze bilden, spielt das Absinken des  $E$ -Moduls keine grosse Rolle, da dies dann nur an der Aussenfaser des Mantels und nur auf einer Seite auftritt.

Infolge der Vorspannung der Bandagen verschiebt sich nun aber das Verhältnis zwischen Normalkraft- und Biegebeanspruchung in Richtung wesentlich grösserer Normalspannungen. Übersteigt dadurch die kritische Normalspan-

nung  $\sigma_{S, kr}$  die Proportionalitätsgrenze<sup>4)</sup>, dann wirkt sich das Absinken des  $E$ -Moduls auf die gesamte Umfangsstauchung und damit auch auf den zur Beulenbildung erforderlichen Spielraum aus. Der Einfluss ist wesentlich, da dann ausser der von der kritischen Normalkraft ausgelösten Umfangsspannung auch noch mit einer plastischen Umfangsstauchung bis zu 0,2% zu rechnen ist. (Dabei ist vorausgesetzt, dass  $\sigma_{S, kr}$  kleiner als die Fließsgrenze, aber grösser als die Proportionalitätsgrenze ist.) Ein Erhöhen von  $\sigma_{S, F}$  aufgrund der Querdehnungsbehinderung scheint hier nicht zulässig wegen der Biegezugspannungen in Rohrlängsrichtung infolge der Einschnürung durch die Bandagen.

### 3.2 Versteifungsring

Für den Beulfall nach Bild 2 ist Gl. (18) massgebend, wobei nun wieder  $l_m = 0$  ist, da ein allfälliger Reibungschluss zwischen Versteifungsring und Rohr mit dem Aussendruck absinkt. Die Vorspannung wirkt sich auf das elastische Beulen nicht aus, da sich diese Kräfte mit  $\Sigma N$  eliminieren.

### 3.3 Nachweis des elastischen Verhaltens

Bei vorgespannten Bandagen spielt, wie erwähnt, für beide Beulfälle das Absinken des  $E$ -Moduls der Rohrschale infolge des Überschreitens der Proportionalitätsgrenze eine wesentliche Rolle. Bei der zum Bestimmen des  $E$ -Moduls erforderlichen Ermittlung der Beanspruchungen in Versteifungsring  $\sigma_{V, kr}$  und Rohrschale  $\sigma_{S, kr}$  ist zu unterscheiden, ob beim kritischen Aussendruck die Bandage noch mitwirkt oder ob sie bereits lose geworden ist.

Zustand a: «Bandage noch mitwirkend»  $\left( p_{kr} \frac{r_s}{t_s} < \sigma_v \right)$

$$(27) \quad \sigma_{V, kr} = \frac{-\sigma_v + p_{kr} r_s / t_s}{1 + \frac{F_V}{r_s t_s} \sqrt{\frac{r_s}{t_s} \bar{n}(x)}}$$

$$(28) \quad \sigma_{S, kr} = p_{kr} \frac{r_s}{t_s} - \sigma_{V, kr} \frac{F_V}{r_s t_s} \sqrt{\frac{r_s}{t_s} [\bar{n}(x) \pm \nu \bar{m}(x)]}$$

Der letzte Summand des Klammerausdrucks verkörpert den Biegeanteil.

Zustand b: «Bandage bereits lose»  $\left( p_{kr} \frac{r_s}{t_s} > \sigma_v \right)$

Der Beulfall nach Bild 5 ist nur in diesem Zustand möglich.

$$(29) \quad \sigma_{V, kr} = 0$$

$$(30) \quad \sigma_{S, kr} = p_{kr} \frac{r_s}{t_s}$$

Dabei wurden Druckspannungen positiv angesetzt und ferner nach [21] folgende Bezeichnungen eingeführt:

$$(31) \quad \bar{n}(x) = 0,645 \left[ 1 + 2 \sum_{j=1}^{\infty} e^{-j \lambda l} (\sin j \lambda l + \cos j \lambda l) \right]$$

$$(32) \quad \bar{m}(x) = 1,17 \left[ 1 + 2 \sum_{j=1}^{\infty} e^{-j \lambda l} (-\sin j \lambda l + \cos j \lambda l) \right]$$

<sup>4)</sup> Bei Rohrschalen, die bereits einen plastischen Dehnvorgang durchlaufen haben, ist zusätzlich zu beachten, dass sich bei dem späteren Stauchvorgang die Proportionalitätsgrenze bereits bei kleineren Beanspruchungen einstellt [22].

Die Reihen konvergieren rasch, so dass meist bei  $j = 2$  abgebrochen werden kann.

$$(33) \quad \lambda = \frac{1}{0,78 \sqrt{r_s t_s}} = \sqrt[4]{\frac{3(1-\nu^2)}{r_s^2 t_s^2}}$$

Ausser dem Stabilitätsnachweis kann zuweilen für die Rohrschale auch der reine Druckspannungsnachweis massgebend sein.

$$(34) \quad \sigma_{S, kr} \leq \sigma_{SF} \frac{\nu_{kr}}{\nu_F}$$

Dabei bezeichnet

- $\sigma_{S, F}$  garantierte Fließgrenze der Rohrschale
- $\nu_{kr}$  Beulsicherheit
- $\nu_F$  Sicherheit gegen Erreichen der Fließgrenze

#### 4. Stollenpanzerung mit fest verbundenen Versteifungsringen

##### 4.1 Rohrschale

Für den Beulfall nach Bild 1 kann wie beim freiliegenden, ringversteiften Rohr vorgegangen werden, da die Betonumhüllung nicht in der Lage ist, diese Beulform zu behindern. Versuche zeigen allerdings im allgemeinen nur eine Beule am Umfang (Bild 7), doch stimmt der aus Versuchen ermittelte Beuldruck mit dem der Theorie des freiliegenden Rohres gut überein.

Es sei darauf hingewiesen, dass eine versteifende Wirkung durch Ringe bei einer Stollenpanzerung erst dann auftritt, wenn sie die versteifende Wirkung durch die Betonumhüllung übersteigt.

##### 4.2 Versteifungsring

Die Knickfigur des Ringes zeigt wieder eine einzige Beule am Umfang, deren Knicklinie auch die Rohrschale folgt. Zur Bemessung können die Verfahren [12] und [14] herangezogen werden, doch tritt auch in diesen Veröffentlichungen die eingangs behandelte Meinungsverschiedenheit über die Ringbelastung zu Tage. In [12] wird die Meinung A, in [14] die Meinung B vertreten (vgl. 1.2). Der wesentliche Punkt dabei ist, ob beim Berechnen des Trägheitsradius  $i$  die Summe der Querschnittsflächen von Ring und Rohr (Meinung A) oder nur die des Ringes (B) eingesetzt werden soll. Da  $i$  zum Bestimmen der Beulwellenlänge des Ringes verwendet wird, ist analog Abschnitt 1.2 der Meinung A recht zu geben. Zweckmässigerweise soll im folgenden auf ein Zusammenfassen zu  $i$  verzichtet werden.

Dem Biegemoment  $N\eta$  infolge der Umfangskraft  $N$  ( $= N_V + N_S$ ) und der Ausbiegung  $\eta$  wirkt die Biegesteifigkeit  $\Sigma EJ = E_V J_V + E_S J_S$  entgegen. Die Gleichung (37) von [14] lautet daher in ausführlicher Schreibweise

$$(35) \quad n = \sqrt{1 + \frac{N_V + N_S}{E_V J_V + E_S J_S} r_V^2}$$

( $n$  wird in [14] mit  $\varepsilon$  bezeichnet.)

Ein weiterer Anlass zu Unstimmigkeiten ist der Wert für  $\sigma_N$ . Die Umfangsspannung  $\sigma_N$  ist nämlich im Ring kleiner als im Rohr. Soll  $\sigma_N$  für den Ringbereich gelten, so ist

$$(36) \quad \sigma_N = p_{kr} \frac{l_m \varrho}{F_V}$$

und

$$(37) \quad N_V + N_S = p_{kr} l \varrho = \sigma_N F_V \cdot l/l_m$$

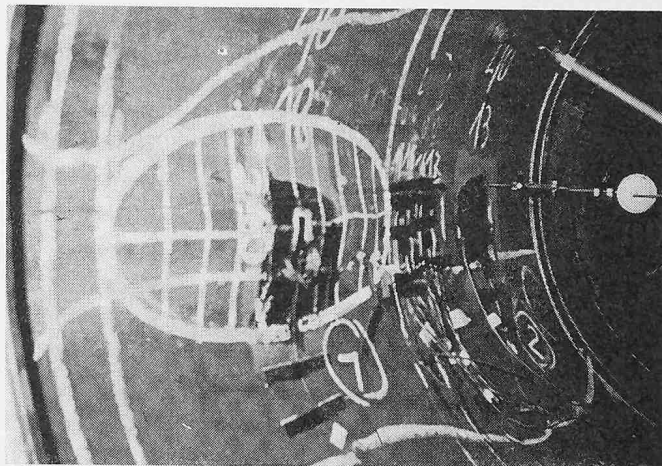


Bild 7a. Beulen der Rohrschale eines Feldes (Werkphoto VÖEST)

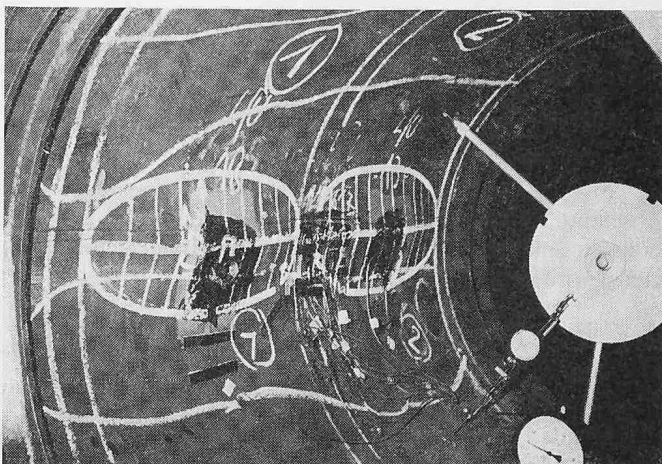


Bild 7b. Beulen der Rohrschale im Nachbarfeld. Die geringe Ringverformung beim Auftreten der Beule im ersten Feld gibt den Anlass, dass im Nachbarfeld die Beule an der gleichen Erzeugenden auftritt (Werkphoto VÖEST)

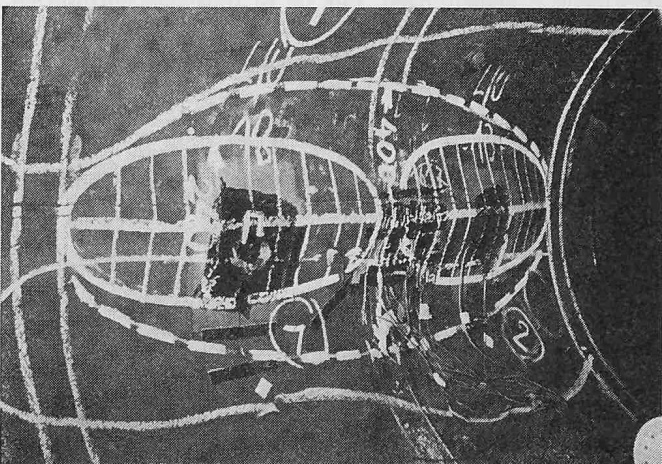


Bild 7c. Knicken des zwischen den Beulen liegenden Ringteiles nach einer weiteren Laststeigerung, da sich die Umfangskräfte in diesem Zustand auf den Ringbereich konzentrieren (Werkphoto VÖEST)

Bild 7. Beulvorgang an einer Stollenpanzerung mit ausreichend steif bemessenen Ringen (Zerstörungsversuch am Modell  $\Phi 1000$  mm)

woraus

$$(38) \quad n = \sqrt{1 + \frac{\sigma_N}{E_V} \frac{l}{l_m} \frac{F_V r_V^2}{J_V + J_S \cdot E_S/E_V}}$$

Eine Bemerkung noch zum Randabstand  $e_V$  in Gl. (39) in [14]. Der Ausdruck  $(\sigma - \sigma_N)/(e_V E_V)$  soll den elastischen Krümmungszuwachs  $\varkappa$  im Ring darstellen, unter welchem die Umfangsspannung der äussersten Randfaser des Ringes von

$\sigma_N$  auf  $\sigma_F$  ansteigt. Die Ausdrücke  $e$  und  $E$  beziehen sich auf ein Spannungsproblem und daher auf den Ring allein, das heisst, dass beim Bestimmen der Schwerpunktslage des Ringquerschnittes nur der Bereich  $l_m$  der Rohrschale mit in Betracht gezogen wird. Damit lautet die Stabilitätsbedingung (38) und (44) von [14]:

$$(39) \quad \left( \frac{\sigma_N}{E_V} + \frac{k_0}{r_s} \right) n^3 \leq \Phi \frac{r_V}{e_V} \frac{\sigma_F - \sigma_N}{E_V} \left( 1 - \Psi \frac{r_V}{e_V} \frac{\sigma_F - \sigma_N}{E_V} \right)$$

$$(36a) \quad p_{kr} = \sigma_N \frac{F_V}{l_m \varrho}$$

$$(40) \quad \varrho = r \left( 1 + \Omega \frac{r_V}{e_V} \frac{\sigma_F - \sigma_N}{E_V} \right)$$

Gl. (39) steht im Widerspruch zu Abschnitt 3a von [14], womit jedoch der Wert der bahnbrechenden Arbeiten von E. Amstutz nicht geschmälert werden soll.

## 5. Stollenpanzerung mit vorgespannten Versteifungsringen

### 5.1 Rohrschale

Für den Beulfall nach Bild 5 ist die Vorgangsweise nach Abschnitt 3.1 bzw. 2.1 anwendbar, wobei jedoch  $w_Z$  durch den radialen Spielraum  $k$  zwischen Ring und Hinterfüllbeton begrenzt wird.

$$(41) \quad w_Z \leq k / \sin \alpha, \text{ wobei } k = k_0 + \left| \sigma_{V, p=0} - \sigma_{V, kr} \right| \frac{r_V}{E_V}$$

### 5.2 Versteifungsring

Für das gemeinsame Beulen von Rohr und Bandage gilt Abschnitt 4.2 mit folgenden Ergänzungen:

a) Es sind gesonderte Nachweise für Bandage und Rohrschale erforderlich.

b) In der Hauptgleichung (39) haben die Ausdrücke  $\sigma_N$  nun verschiedene Bedeutungen. Für sie ist folgendes einzusetzen: Im ersten Klammerausdruck stellt  $\sigma_N/E_V$  die elastische Radialstauchung durch den Aussendruck dar. Dieser Ausdruck wird ersetzt durch

$$p_{kr} l r / (F_S + F_V) \cdot E$$

Im Ausdruck  $n$ , Gl. (35) bzw. (38), stellt der zweite Summand den Wert  $r^2 \Sigma N / \Sigma (EJ)$  dar. Er wird ersetzt durch

$$p_{kr} l r s^3 / (E_V J_V + E_S J_S).$$

Rechts vom Gleichheitszeichen bezeichnet  $\sigma_N$  die grösste Randspannung, jedoch noch ohne die Biegebeanspruchung durch die Beulwelle. Hier wird für  $\sigma_N$  der Wert nach Gl. (27) bzw. (28) eingesetzt.

c) Ein Erhöhen von  $\sigma_{S, F}$  aufgrund der Querdehnungsbehinderung scheint hier nicht zulässig wegen den Biegezugspannungen in Rohrlängsrichtung infolge der Einschnürung durch die Bandagen.

Demnach gilt für die Bandage mit der Höhe  $h_V$

$$(42) \quad n = \sqrt{1 + \frac{p_{kr}}{E_V} \frac{l r v^3}{J_V + J_S E_S / E_V}}$$

$$(43)^5 \quad \left( \frac{p_{kr}}{E_V} \frac{l r s}{F_V + F_S E_S / E_V} + \frac{k_0}{r} \right) n^3 \leq$$

<sup>5)</sup> Der Ausdruck  $\sigma_{V, F} - |\sigma_{V, kr}|$  soll jenen Betrag verkörpern, den die Biegespannung erreichen darf, ohne dass dabei die Gesamtbeanspruchung die Fließgrenze  $\sigma_{V, F}$  erreicht. Da bei vorgespannten Ringen die Normalspannung im kritischen Zustand  $\sigma_{V, kr}$  auch negativ (Zug) sein kann, ist deren Wert  $\sigma_{V, kr}$  als absoluter Betrag einzusetzen.

$$\leq \Phi \frac{2 r_V}{h_V} \frac{\sigma_{V, F} - |\sigma_{V, kr}|}{E_V} \left( 1 - \Psi \frac{2 r_V}{h_V} \frac{\sigma_{V, F} - |\sigma_{V, kr}|}{E_V} \right)$$

und für die Rohrschale

$$(44) \quad \left( \frac{p_{kr}}{E_V} \frac{l r s}{F_V + F_S E_S / E_V} + \frac{k_0}{r} \right) n^3 \leq \Phi \frac{2 r_S}{t_S} \frac{\sigma_{S, F} - \sigma_{S, kr}}{E_S} \left( 1 - \Psi \frac{2 r_S}{t_S} \frac{\sigma_{S, F} - \sigma_{S, kr}}{E_S} \right)$$

### 5.3 Nachweis des elastischen Verhaltens

Auch hier kann die Tragkraftbegrenzung durch ein plastisches Stauchen der Rohrschale massgebend werden<sup>4)</sup>. Ein solches Stauchen hätte einen teilweisen Verlust der Vorspannung und gegebenen Falles eine Gegenplastizierung bei Innendruck zur Folge. Mit den Sicherheitsfaktoren gegen Beulen  $\nu_{kr}$  und Fließen  $\nu_F$  gilt wieder Gl. (34).

## 6. Anmerkungen zur «Mittragenden Breite»

Die mittragende Breite wurde mit

$$(45) \quad l_m = t_V + 2 \cdot 0,78 \sqrt{r_S t_S}$$

angesetzt, was eigentlich nur für die Ermittlung der Normalspannungen berechtigt ist [11]. Für das Bestimmen des Trägheitsmomentes wäre es richtiger, eine mittragende Breite im Sinne der Rippenplattenberechnung [16] zu bestimmen, wobei als Stützweite der Wendepunktabstand der abgewinkelten Knickfigur (beim freien Rohr ein Viertel der Umfangslänge, bei der Stollenpanzerung das  $\pi/n$ -fache des Stützlinienradius) anzusetzen ist. Das Trägheitsmoment wäre noch mit Rücksicht auf das Querausweichen der Gurte krummer Biegeträger im Sinne von [17] zu verringern.

## 7. Zahlenbeispiele

### Zu 1.1 Freiliegendes Rohr mit fest angeschlossenen Ringen

$r_S = 100$  cm;  $t_S = 1,0$  cm;  $l = 1000$  cm

Nach [3] ergibt sich:

$$p_{kr} = E \cdot K (t_S / 2 r_S)^3 = 2,1 \cdot 10^6 \cdot 7,4 (1/200)^3 = 1,9 \text{ atü (nach [6] 1,8 atü)}$$

Der Beulwert  $K$  wurde der Veröffentlichung [3], Fig. 4, entnommen.

### Zu 1.2 Versteifungsring zu 1.1

Aus Gl. (18) ergibt sich

$$J_V \geq \frac{1,9 \cdot 1000 \cdot 100^3}{3 \cdot 2,1 \cdot 10^6} - \frac{1000 \cdot 1,0^3}{12} = 300 - 80 = 220 \text{ cm}^4$$

(nach [18] 236 cm<sup>4</sup>; nach [8] 8 cm<sup>4</sup>; nach [6] 7 cm<sup>4</sup>!)

### Zu 2.2 Freiliegendes Rohr mit losen Ringen aus Profil IPE80

$$\begin{array}{lll} r_S = 100 \text{ cm} & J_V = 80,10 \text{ cm}^4 & r_V = 104 \text{ cm} \\ t_S = 1 \text{ cm} & W_V = 20,00 \text{ cm}^3 & p_{kr} = 10 \text{ atü} \\ l = 50 \text{ cm} & F_V = 7,64 \text{ cm}^2 & \end{array}$$

Lichter radialer Spielraum (Mittelwert) zwischen Ring und Rohr  $k_0 = 0,02$  cm

Werkstoff: Rohr Aldur 47  $\sigma_F = 3300$  kp/cm<sup>2</sup>  
Ring ST 37-2  $\sigma_F = 2400$  kp/cm<sup>2</sup>

Infolge der Querdehnungsbehinderung gilt für die Rohrschale (mit der Querdehnungszahl  $\nu = 0,3$ )

$$E_S = \frac{E}{1 - \nu^2} = 2,3 \cdot 10^6 \text{ kp/cm}^2$$

$$\sigma_{S, F} = \frac{\sigma_F}{\sqrt{1 - \nu + \nu^2}} = 3710 \text{ kp/cm}^2$$

für den Versteifungsring nach Gl. (18)

$$2,3 \cdot 10^6 \frac{50 \cdot 1,0^3}{12} + 2,1 \cdot 10^6 \cdot 80,1 \geq 10 \cdot 50 \cdot \frac{100 \cdot 104^2}{3}$$

$$178 \cdot 10^6 \cong 180 \cdot 10^6$$

somit ist die Ringsteifigkeit ausreichend.

### Zu 2.1 Beulsicherheit der Rohrschale von 2.2

Der Beulfall nach Bild 1 tritt wegen des losen Ringsitzes nicht auf. Er hätte nach [3] elastostatisch einen Beuldruck von 63 atü ergeben. Der Beulfall nach Bild 5 stellt sich wesentlich früher ein und wird im folgenden untersucht.

Bei Annahme von  $q/r_S = 1,05$  folgt aus den Gln. (20), (24), (25)

$$\sigma_N = \sigma_{S, kr} \frac{q}{r_S} = 10 \frac{100}{1,0} 1,05 = 1050 \text{ kp/cm}^2$$

und mit Gl. (24b)

$$n = \sqrt{1 + 12 \cdot \left(\frac{100}{1,0}\right)^2 \frac{1050}{2,3 \cdot 10^6}} = 7,5$$

Aus Bild 6 ergeben sich

$$\alpha = 34^\circ; \Phi = 1,70; \Psi = 0,23; \Omega = 0,15$$

$$Z = 0,06 \cdot 10 \cdot 50 \cdot 100 = 3000 \text{ kp/Ring}$$

Nach Bild 5 ist die Verschiebung

$$w_Z = 0,4 \frac{3000 \cdot 104^3}{100 \cdot 2,1 \cdot 10^6 \cdot 80,1} = 0,08 \text{ cm}$$

Gl. (23) lautet in Zahlen

$$\left( \frac{1050}{2,3 \cdot 10^6} + \frac{0,02}{100} + \frac{0,08}{100 \cdot \pi} \right) \cdot 7,5^3 \leq$$

$$\leq 1,70 \frac{2 \cdot 100}{1,0} \frac{3710 - 1050}{2,3 \cdot 10^6}$$

$$\left( 1 - 0,23 \frac{2 \cdot 100}{1,0} \frac{3710 - 1050}{2,3 \cdot 10^6} \right)$$

$$0,3780 \leq 0,3800$$

Es wird somit bei  $p_{kr} = 10$  atü in der nach Bild 5 ausgebogenen Schale die Streckgrenze fast erreicht.

Nun ist nach Gl. (25)

$$q/r = 1 + 0,15 \frac{2 \cdot 100}{1,0} \frac{3710 - 1050}{2,3 \cdot 10^6} =$$

$$= 1,04 \sim 1,05 \text{ wie angenommen}$$

und nach Gl. (24a)

$$p_{kr} = \frac{1,0}{100} \frac{1050}{1,04} = 10,1 \text{ atü}$$

### Zu 2.2 Ringbeanspruchung infolge Z

Gl. (26a)

$$M_V = \frac{3000 \cdot 104}{\pi} \sin^3 34^\circ = 17500 \text{ kpcm}$$

$$N_V \cong Z = 3000 \text{ kp}$$

$$\sigma_V = \frac{3000}{7,64} + \frac{17500}{20} = 1280 \text{ kp/cm}^2$$

Somit liegt  $\sigma_V$  noch im elastischen Bereich.

### Zu 3.2 Freiliegendes Rohr mit vorgespannten Versteifungsringen 40 x 50 mm

$r_S = 100 \text{ cm}$	$r_V = 102 \text{ cm}$	Radiales
$t_S = 1,0 \text{ cm}$	$t_V = 5,0 \text{ cm}$	Schrumpfmass
$l = 20 \text{ cm}$	$h_V = 4,0 \text{ cm}$	$\Delta r = 0,1 \text{ cm}$
$F_S = 20 \text{ cm}^2$	$F_V = 20 \text{ cm}^2$	Sicherheit gegen
$J_S = 1,7 \text{ cm}^4$	$J_V = 26,6 \text{ cm}^4$	Fliessen $\nu_F = 2,0$
$\sigma_{S, F} = 2200 \text{ kp/cm}^2$	$\sigma_{V, F} = 5000 \text{ kp/cm}^2$	Beulen $\nu_{kr} = 1,7$

Kritischer Druck des Beulfalles nach Bild 2 und Gl. (18)

$$2,3 \cdot 10^6 \cdot 1,7 + 2,1 \cdot 10^6 \cdot 26,6 = p_{kr} \cdot 20 \cdot 100^3/3$$

$$p_{kr} = 9,0 \text{ atü}$$

### Zu 3.1 Beulsicherheit der Rohrschale von 3.2

Der in Bild 5 dargestellte Beulfall kann erst auftreten, wenn die Bandage lose geworden ist, das heisst, wenn

$$p_{kr} \frac{r_S}{t_S} > \sigma_v = E \Delta r / r_S = 2100 \text{ kp/cm}^2$$

Dies trifft bei  $p_{kr} = 9$  atü noch nicht zu (erst bei 21 atü), daher ist dieser Beulfall hier nicht massgebend.

### Zu 3.3 Elastisches Verhalten der Rohrschale von 3.2 und deren Verformungssicherheit

Nach Gl. (33) ist

$$\lambda \cdot l = \frac{20}{0,78 \sqrt{100 \cdot 1,0}} = 2,56 = 146,5^\circ$$

$$j \quad e^{-j\lambda l} \quad \sin j\lambda l \quad \cos j\lambda l \quad e^{-j\lambda l} (\sin j\lambda l + e^{-j\lambda l} (-\sin j\lambda l + \cos j\lambda l) + \cos j\lambda l)$$

1	0,077	0,834	-0,552	+0,0217	-0,1065
2	0,006	-0,920	+0,391	-0,0032	+0,0079
			+0,0185		-0,0986

$$(31) \quad \bar{n}(x) = 0,645 (1 + 2 \cdot 0,0185) = 0,670$$

$$(32) \quad \bar{m}(x) = 1,17 (1 - 2 \cdot 0,0986) = 0,940$$

$$(27) \quad \sigma_{V, kr} = \frac{-2100 + 9,0 \cdot 100/1,0}{1 + \frac{20}{100 \cdot 1,0} \sqrt{\frac{100}{1,0}} \cdot 0,670} = -513 \text{ kp/cm}^2$$

(negativ weil Zug)

$$(28) \quad \sigma_{S, kr} = 9,0 \frac{100}{1,0} +$$

$$+ 513 \frac{20}{100 \cdot 1,0} \sqrt{\frac{100}{1,0}} (0,670 + 0,3 \cdot 0,940) =$$

$$= 900 + 970 = 1870 \text{ kp/cm}^2$$

$$(34) \quad 1870 < 2200 \frac{1,7}{2,0} = 1880$$

Beim Beuldruck von 9,0 atü wird also im vorliegenden Beispiel gleichzeitig auch die Sicherheit gegen die (Druck-) Fließgrenze voll ausgenutzt.

Die beim Beuldruck in der Rohrschale vorhandene Spannung  $\sigma_{S, kr} = 1870 \text{ kp/cm}^2$  liegt bereits über der Proportionalitätsgrenze von  $0,8 \cdot \sigma_{S, F} = 1760 \text{ kp/cm}^2$ . Im Beispiel zu 3.2 müsste daher im 1. Glied der Gl. (18) der  $E$ -Modul reduziert werden, was im vorliegenden Falle allerdings das Ergebnis nicht nennenswert verändert.

#### Zu 4.1 Stollenpanzerung mit fest angeschlossenen Ringen

$$\begin{aligned} 90 \times 10 \text{ mm} \\ r_S = 100 \text{ cm} \quad r_V = 102,3 \text{ cm} \quad k_0 = 10^{-3} \cdot r_S \\ t_S = 1,0 \text{ cm} \quad t_V = 1,0 \text{ cm} \\ l = 100 \text{ cm} \quad F_V = 25,0 \text{ cm}^2 \\ l_m = 16 \text{ cm}^*) \quad J_V = 200 \text{ cm}^4 \quad *) \text{ nach Gl. (45)} \\ J_S = 7,0 \text{ cm}^4 \quad e_V = 7,7 \text{ cm} \end{aligned}$$

Werkstoff von Rohrschale und Ring: Aldur 47

$$\sigma_F = 3300 \text{ kp/cm}^2$$

Nach [3] ergibt sich aus Fig. 4

$$K = 100 \text{ und}$$

$$p_{kr} = 100 \cdot 2,1 \cdot 10^6 \left( \frac{1,0}{200} \right)^3 = 26,3 \text{ atü}$$

$$\sigma_{kr} = p_{kr} \frac{t_S}{r_S} = 2630 \text{ kp/cm}^2 < 0,8 \sigma_F$$

$\sigma_{kr}$  befindet sich somit im elastischen Bereich

#### Zu 4.2 Versteifungsring zu 4.1

$$q/r = 1,0 \text{ angenommen}$$

$$(36) \quad \sigma_N = 26,3 \frac{16 \cdot 100}{25} = 1680 \text{ kp/cm}^2$$

$$(38) \quad n = \sqrt{1 + \frac{1680}{2,1 \cdot 10^6} \frac{100}{16} \frac{25,0 \cdot 102,3^2}{200 + 7 \cdot 1,1}} = 2,70$$

Mit diesem Wert von  $n$  erhält man aus Bild 6<sup>e</sup>)

$$\Phi = 3,5; \quad \Psi = 0,4; \quad \Omega = -0,11$$

$$(39) \quad \left( \frac{1680}{2,1 \cdot 10^6} + 10^{-3} \right) \cdot 2,70^3 \leq \\ \leq 3,5 \frac{102,3}{7,7} \frac{3300 - 1680}{2,1 \cdot 10^6} \left( 1 - 0,4 \frac{102,3}{7,7} \frac{3300 - 1680}{2,1 \cdot 10^6} \right) \\ 0,0356 \leq 0,0357$$

Es wird somit beim Beuldruck der Rohrschale  $p_{kr} = 26,3$  atü auch im Versteifungsring gerade die Tragfähigkeitsgrenze erreicht. Die Aussendruckssicherheiten von Rohrschale und Ring sind somit gleich gross.

Kontrolle der Stützlinienkrümmung:

$$(40) \quad \frac{q}{r} = 1 + (-0,11) \frac{102,3}{7,7} \frac{3300 - 1680}{2,1 \cdot 10^6} = 0,99 \cong 1,0$$

wie oben angenommen.

Nachweis des elastischen Verhaltens:

$$\sigma_N = 1680 < 0,8 \cdot \sigma_{V, F} = 2640 \text{ kp/cm}^2$$

$\sigma_N$  befindet sich somit im elastischen Bereich.

e) Die Kurve in Bild 6 stellt nicht  $\Phi$ , sondern  $0,1 \Phi$  dar.

Zu 5.1 Stollenpanzerung mit vorgespannten Versteifungsringen wie im Beispiel zu 3.2, jedoch als einbetonierte Stollenpanzerung verlegt mit einem Koaxialspalt  $k_0 = 8 \cdot 10^{-4} \cdot r_S$ . Die Sicherheit gegen einen kritischen Aussendruck von  $p_{kr} = 15$  atü ist zu untersuchen.

Das Beulen der Rohrschale innerhalb der Ringe (Bild 5) ist, wie im Beispiel zu 3.1 gezeigt, erst ab 21 atü möglich;  $p_{kr}$  liegt somit bei diesem Beulfall mit Sicherheit über 15 atü.

#### Zu 5.2 Gemeinsames Beulen von Ring und Rohrschale von 5.1

$$\text{Gl. (42)} \quad n = \sqrt{1 + \frac{15}{2,1 \cdot 10^6} \frac{20 \cdot 102^3}{26,6 + 1,7 \cdot 1,1}} = 2,5$$

Bild 6 entnimmt man  $\Phi = 4,1$ ;  $\Psi = 0,43$ ;  $\Omega = -0,19$

Unter Annahme von  $q/r = 1,0$  ergeben sich für den Ring mit

$$\text{Gl. (27)} \quad \sigma_{V, kr} = \frac{-2100 + 15 \cdot 100/1,0}{1 + \frac{20}{100 \cdot 1,0} \sqrt{\frac{100}{1,0}}} = -256 \text{ kp/cm}^2 \text{ (negativ, weil Zug)}$$

$$\text{Gl. (43)} \quad \left( \frac{15}{2,1 \cdot 10^6} \cdot \frac{20 \cdot 0 \cdot 100}{20 + 20 \cdot 1,1} + 8 \cdot 10^{-4} \right) \cdot 2,5^3 \leq \\ \leq 4,1 \frac{2 \cdot 102}{4,0} \frac{5000 - 256}{2,1 \cdot 10^6} \left( 1 - 0,43 \frac{2 \cdot 102}{4,0} \frac{5000 - 256}{2,1 \cdot 10^6} \right) \\ 0,018 \leq 0,45$$

Im Ring wird also die Fließgrenze bei weitem nicht erreicht.

Für die Rohrschale folgt mit

$$\text{Gl. (28)} \quad \sigma_{S, kr} = 15 \frac{100}{1,0} + \\ + 256 \frac{20}{100 \cdot 1,0} \sqrt{\frac{100}{1,0}} (0,670 + 0,3 \cdot 0,940) = \\ = 1500 + 490 = 1990 \text{ kp/cm}^2$$

$$\text{Gl. (44)} \quad \left( \frac{15}{2,1 \cdot 10^6} \cdot \frac{20 \cdot 100}{20 + 20 \cdot 1,1} + 8 \cdot 10^{-4} \right) \cdot 2,5^3 \leq \\ \leq 4,1 \frac{2 \cdot 100}{1,0} \frac{2200 - 1990}{2,3 \cdot 10^6} (0,99) \\ 0,018 \leq 0,074$$

Auch in der Rohrschale wird – elastisches Verhalten vorausgesetzt – bei  $p_{kr} = 15$  atü die Fließgrenze nicht erreicht.

$$\text{Gl. (25)} \quad q/r = 1 + (-0,19) \frac{2 \cdot 100}{1,0} \frac{2200 - 1990}{2,3 \cdot 10^6} = \\ = 0,99 = 1,0 \text{ wie angenommen}$$

#### Zu 5.3 Nachweis des elastischen Verhaltens der Rohrschale von 5.1

$$\sigma_{S, kr} = 1990 = 0,91 \cdot \sigma_{S, F}$$

Die Beanspruchung der Rohrschale liegt bereits vor einem Beulen so weit über der Proportionalitätsgrenze, dass die Vorspannung durch Plastizieren teilweise abgebaut wird. Das Tragvermögen unter Aussendruckbelastung wird hier nicht durch ein Stabilitätsproblem begrenzt, sondern durch das plastische Stauchen der Rohrschale. Der damit verbundene Abbau der Bandagenvorspannung kann bei späterer Innendruckbelastung zu Gegenplastizierungen und bei Wiederholungen zu einer Frage der Zeitfestigkeit führen<sup>4)</sup>.

Adresse des Verfassers: Dipl.-Ing. Dr. techn. Georg Feder, A-4020 Linz, Joh.-Seb.-Bachstrasse 18

## Literaturverzeichnis

- [1] R. v. Mises: Der kritische Aussendruck zylindrischer Rohre. «Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure» 58 (1914) Nr. 19, S. 750–755.
- [2] K. v. Sanden und F. Tölke: Über Stabilitätsprobleme dünner Schalen. «Ing.-Archiv», III. Band (1932), S. 24–66.
- [3] R. G. Sturm: A study of the collapsing pressure of thinwalled cylinders. Proceedings 1941, Illinois Engineering Experiment Station.
- [4] S. Timoshenko: Theorie of Elastic Stability. New York 1961, McGraw-Hill Book Co.
- [5] W. Flüge: Die Stabilität der Kreiszyinderschale. «Ing.-Archiv» 1932, S. 463.
- [6] C. Kollbrunner und S. Milosavljevic: Neuer Beitrag zur Berechnung von auf Aussendruck beanspruchten kreiszyndrischen Rohren. Zürich 1965, Verlag Leemann.
- [7] British Standard 1500: Fusion welded pressure vessels, Part. 1.
- [8] AD Merkblatt B6: Zylindrische Mäntel mit äusserem Überdruck.
- [9] S. Schwaigerer: Fertigkeitsberechnung von Bauelementen des Dampfkessel-, Behälter- und Rohrleitungsbaues. Berlin Göttingen Heidelberg 1961, Springer-Verlag.
- [10] A. Pflüger: Stabilitätsprobleme der Elastostatik. Berlin 1964, Springer-Verlag.
- [11] F. Mang: Baustatische Untersuchung der Auflageringe stählerner Druckrohrleitungen. Diss., Karlsruhe 1965.
- [12] E. Amstutz: Das Einbeulen von Schacht- und Stollenpanzerungen. Schweizerische Bauzeitung 68 (1950) Nr. 9, S. 102.
- [13] E. Amstutz: Das Einbeulen von vorgespannten Schacht- und Stollenpanzerungen. Schweizerische Bauzeitung 71 (1953) Nr. 16, S. 229.
- [14] E. Amstutz: Das Einbeulen von Schacht- und Stollenpanzerungen. Schweizerische Bauzeitung 87 (1969) H. 28, S. 541.
- [15] H. Julliard: Knickprobleme an geraden Stäben, Kreisbogensegmenten und Zylindern. Schweizerische Bauzeitung 70 (1952) Nr. 32, S. 451; Nr. 33, S. 468; Nr. 34, S. 487.
- [16] DIN 19704: Bemessungsgrundlagen für Stahlwasserbauten.
- [17] H. Atrops: Stählerne Druckrohrverzweigungen. Berlin Göttingen Heidelberg 1963, Springer-Verlag.
- [18] ASME – Code Section VIII: Rules for construction of unfired pressure vessels.
- [19] A. und L. Föppl: Drang und Zwang. Bd. 1, München und Berlin 1920, R. Oldenbourg.
- [20] R. J. Roark: Formulas for stress and strain. New York 1965, McGraw-Hill Book Co.
- [21] R. Wasmund und R. Krüger: Entlastung eines Druckzylinder-mantels durch nachträglich aufgebrachte Ringrippen. «Konstruktion» 15 (1963), S. 270–274.
- [22] J. Bauschinger: Über die Veränderung der Elastizitätsgrenze und des Elastizitätsmoduls verschiedener Metalle. «Civiling». N.F. 27 (1881) Sp 289–348.

## Führungsaufgaben im Architekturbüro

DK 65.012.3 : 72

Von Dr. Jürg Bühler, Architekt SIA, Zürich

### Vorwort

Der Verfasser des hier veröffentlichten Beitrages, Dr. Jürg Bühler, Architekt SIA, Zürich, hat mit dem Dissertationsthema «Organisatorische Massnahmen als Voraussetzungen für die Arbeit des Architekten» an der ETH Zürich promoviert. Die in Verbindung mit dem Betriebswissenschaftlichen Institut der ETHZ (Direktor: Prof. Dr. W. F. Daenzer) erstmalig entstandene Studienarbeit eines Architekten ist 1970 von der Zentralstelle der Studentenschaft Zürich herausgegeben worden<sup>1)</sup>. Der Verfasser bietet darin einen Gesamtüberblick der organisatorischen Aspekte des Architekten mit Einbezug der Berufsausübung als solcher, des Verhältnisses zu Auftraggebern und Beratern sowie der Geschäftsleitung durch den Büroinhaber.

Nach Abschluss seiner Ausbildung an der Abteilung I der ETH (1961), befasste sich Jürg Bühler als Assistent am ORL-Institut der ETHZ, in Architekturbüros in den USA und in der Schweiz, ferner auf Studienreisen, in Weiterbildungskursen und durch selbständige Arbeiten auch eingehend mit betriebswissenschaftlichen Studien. Es interessierte ihn aus der Sicht des Architekten, dass sich in anderen Berufen mit ähnlich gelagerten Problemen eine Technik der Geschäftsführung, ja eine wissenschaftliche Betrachtungsweise organisatorischer Fragen entwickelt hat. Seine Arbeit eignet sich als gutes Hilfsmittel für die Tätigkeit der schweizerischen Kollegen, nicht zuletzt auch dank der knappen und leicht fasslichen Sprache.

Dr. Jürg Bühler befasst sich neben seiner Tätigkeit als Architekt mit der Bearbeitung von Organisationsproblemen für Architekturbüros, wofür heute auch Zusammenschlüsse mehrerer Firmen zur Vorbereitung und Durchführung von Bauaufgaben neue Voraussetzungen bedeuten. G. R.

<sup>1)</sup> Die Schrift enthält auf rund 190 Seiten als Hauptabschnitte: Einleitung; das Tätigkeitsgebiet des Architekten; Architekturbüro und Informationen; organisatorische Massnahmen; Organisationsformen für Architekturbüros; Anhang (Beispiele) und Literaturverzeichnis. Preis 25 Fr., Bezug über den Buchhandel.

Jede behördliche Massnahme zur Verminderung der Bautätigkeit trifft zuerst und unmittelbar die an der Bauvorbereitung Beteiligten: unter anderen auch zahlreiche Architekturbüros. Mancher Büroinhaber wird sich jedoch an ähnliche Situationen erinnern und versuchen, die kurze aufgezwungene Atempause möglichst sinnvoll zu nutzen. Er wird sich anstrengen, die unter dem Druck des Dringlichen ins Wanken geratene interne Organisation seines Büros wieder unter Kontrolle zu bekommen.

Bei der Lösung dieser Aufgabe ist er weitgehend auf sich selber angewiesen. Es besteht weder Literatur über die zweckmässige Organisation eines Schweizer Architekturbüros noch eine Institution für einen Erfahrungsaustausch auf breiter Grundlage. Meine Ausführungen sollen dazu beitragen, dass diese Lücken kleiner werden. Ich will darstellen, welche Zusammenhänge zwischen den einzelnen Führungsaufgaben im modernen Architekturbüro bestehen. Stellt ein Büroinhaber oder Bauherr ähnliche Betrachtungen an, so können ihnen Massnahmen zur Verbesserung einer bestimmten Situation folgen.

### Quantität und Qualität der Arbeit

Ob ein Architekturbüro «gut» ist, bessere Bauten erstellt oder mehr Aufträge bewältigt als ein anderes, hängt vor allem von den leitenden Personen des Büros ab. Besonders schwierig ist es für jede Geschäftsleitung, ihre eigenen Stärken und Schwächen zu erkennen. Auch wenn die einzelnen Projekte hinsichtlich Funktion und Ästhetik streng überprüft werden, ist dieselbe Einstellung gegenüber der Organisationsstruktur, Personalpolitik und Überwachung der Bürokosten selten gleich consequent. Die Geschäftsleitung muss jedoch gewisse Voraussetzungen erfüllen, wenn organisatorische Massnahmen sinnvoll sein sollen:

- Voraussetzung für die Anwendung neuzeitlicher Methoden und Hilfsmittel ist der Wille der Geschäftsleitung, sich selbst an eine einmal getroffene Wahl von Grundsätzen der Geschäftsführung zu halten.
- Voraussetzung für das Gelingen organisatorischer Massnahmen ist das richtige Verhalten der Geschäftsleitung gegenüber ihren Angestellten.