

**Zeitschrift:** Schweizer Ingenieur und Architekt  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 112 (1994)  
**Heft:** 23

**Artikel:** Schacht- und Stollpanzerungen: einige Anmerkungen zur Projektierung  
**Autor:** Jacobson, Sidney  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-78458>

### **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:** 16.01.2026

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

# Schacht- und Stollenpanzerungen

Einige Anmerkungen zur Projektierung

**Zurzeit werden in der Schweiz einige Druckstollen und Druckschächte mit Stahlauskleidungen projektiert. Nachfolgend sind einige Anmerkungen zu verschiedenen Problemen betreffend Bemessung und das Einbeulen der Panzerung.**

## Der Mechanismus des Einbeulens

Die klassischen Knick- und Beulformeln (Euler, Levy, v. Mises) beschreiben Verzweigungsprobleme wie folgt:

VON SIDNEY JACOBSEN,  
WETTINGEN

Beim Erreichen der Eulerlast wird ein Stab instabil und er knickt plötzlich seitlich aus. Ähnlich reagieren freiliegende, kreisrunde Ringe oder Rohre. Nach Erreichen der kritischen Last versagen sie plötzlich.

Bei stählernen Stollenauskleidungen handelt es sich nicht um Verzweigungsprobleme, sondern um echte Spannungsprobleme zweiter Ordnung: *Ein einbetoniertes Panzerrohr verformt sich schon bei geringer Aussendruckbelastung, ohne zu versagen.*

Beispiel: Ein Aussendruck von 50 m Wassersäule wird bei einem Panzerrohr mit 3600 mm Durchmesser und 16 mm Wanddicke eine Beule erzeugen, die sich 6 mm von der Betonumhüllung abhebt. Weiter passiert nichts, denn die Streckgrenze wird nicht erreicht: Die grösste Spannung beträgt 86 N/mm<sup>2</sup>.

Wenn der Aussendruck auf 109 m Wassersäule gesteigert wird, ist die Streckgrenze, die auf 355 N/mm<sup>2</sup> angenommen wird, erreicht, und die Beule hebt sich 22 mm vom Beton ab. Dann spricht man vom «kritischen Aussendruck». Das Rohr wird bei weiterer Laststeigerung einbeulen und schliesslich versagen, wenn nicht irgendwelche andere Mechanismen dies verhindern (Plastizität, Vorspannungseffekt, Haftung zur Betonwand).

## Die Beultheorien

Die frühen Beultheorien von Vaughan oder Borot kann man «zentrische» oder «rotationssymmetrische» Beultheorien nennen.

Die von Amstutz 1953 veröffentlichte Beultheorie war die erste «exzentrische» oder «asymmetrische» Beultheorie. Amstutz nimmt an, dass zwischen Rohr und Wandung Reibung und Haftung verschwinden. Das Einbeulen tritt nur an einer Stelle auf. Das von der Betonwand abgehobene Blech besteht aus zwei konvexen Wellen mit einer dazwischenliegenden konkaven Welle.

Das wichtige und typische an dieser Beulphilosophie ist, dass während des Beulvorganges der Mittelpunkt des Rohres nicht mehr zentrisch bleibt, sondern um den Initialspalt plus Radiusverminderung infolge Umfangsspannung abrückt. Es versteht sich von selbst, dass der Energieaufwand beim asymmetrischen Beulen kleiner ist als beim rotationssymmetrischen, und dass die kritischen Aussendrucke tiefer liegen. Asymmetrisches Beulen ist also sicherer!

Heute dimensioniert man praktisch nur noch mit den Amstutz-Formeln [5] oder mit den vom Schreibenden veröffentlichten Formeln [8, 11, 12].

Das Lastenheft sollte deutlich festlegen, welche Beultheorie benutzt werden soll. Es bringt nur Verwirrung und unnötige Diskussionen, wenn man dem Stahllieferanten die Wahl überlässt. Zudem wird der Vergleich der Angebote erschwert, und der Autor der Ausschreibungsdokumente lässt den Verdacht aufkommen, dass er selbst unsicher ist. Wenn der Lieferant eine bessere Dimensionierungsmethode kennt, kann er immer eine Variante anbieten.

## Vergleichsrechnungen Amstutz – Jacobsen

Die nachfolgenden Berechnungen zeigten den Vergleich zwischen den beiden Formeln, wobei die genauen Amstutz-Formeln (18) und (42) aus [5] benutzt wurden:

## Glatte Rohre

Rohr  $r/t = 25$ , Streckgrenze 240 N/mm<sup>2</sup>  
nach Amstutz, 1969  $p_{cr} = 8.22 \text{ N/mm}^2$   
nach Jacobsen, 1983  $p_{cr} = 8.10 \text{ N/mm}^2$

Beispiele vom Aufsatz Amstutz 1969  
Rohr  $r/t = 50$ , Streckgrenze 380 N/mm<sup>2</sup>  
nach Amstutz, 1969  $p_{cr} = 4.13 \text{ N/mm}^2$   
nach Jacobsen, 1983  $p_{cr} = 4.24$

Rohr  $r/t = 250$ , Streckgrenze 880 N/mm<sup>2</sup>  
nach Amstutz, 1969  $p_{cr} = 0.268 \text{ N/mm}^2$   
nach Jacobsen, 1983  $p_{cr} = 0.267 \text{ N/mm}^2$

Die Übereinstimmung ist also bei unversteiften Rohren gut. Das ist nicht weiter verwunderlich, denn die Beulphilosophie ist die gleiche.

## Ringversteifte Panzerung

Nun zur Untersuchung einer ringversteiften Panzerung nach beiden Methoden. Dabei wird eine Stelle im unteren Abschnitt des Druckschachtes einer Pumpspeicheranlage betrachtet (Berechnung mit dem Programm «Buckling» [12]):

Aussendruck	180 m
(Wassersäule = 1.80 N/mm <sup>2</sup> )	
Innendruck	245 m
(Wassersäule einschl. Druckstoss)	
Felsanteil Innendruck	25%
Rohrdurchmesser	3600 mm
Rohrwanddicke	16 mm
Streckgrenze des Rohrwerkstoffes	355 N/mm <sup>2</sup>
Streckgrenze	
Versteifungsringe	600 N/mm <sup>2</sup>
Abstand Versteifungsringe	1200 mm
Querschnitt	
Versteifungsringe	130 x 16 mm

Sicherheitszahl für Innendruckbelastung 1.5

Sicherheitszahl für Aussendruckbelastung Ring 1.5

Sicherheitszahl für Aussendruckbelastung Rohrschale 1.3

Einfachheitshalber wird 100 m Wassersäule mit 1.00 N/mm<sup>2</sup> gleichgesetzt. Mit den Jacobsen-Formeln [10, 11] Programm «buckling») ergibt sich somit ein kritischer Aussendruck des Ringes einschl. Rohrwand von 2.81 N/mm<sup>2</sup>; mit den Formeln von v. Mises ein kritischer Aussendruck für Rohr zwischen Ringen von 2.39 N/mm<sup>2</sup>. Die rechnerische Sicherheit gegen Einbeulen des ringversteiften Rohrteiles beträgt  $2.81/1.80 = 1.56 > 1.5$ . Die rechnerische Sicherheit gegen Einbeulen des unversteiften Rohrteiles nach Mises beträgt  $2.39/1.80 = 1.32 > 1.3$ .

Der Fels ist von schlechter Qualität. Er übernimmt nur 25% vom Innendruck [9]. Die rechnerische Umfangsspannung bei Innendruckbelastung beträgt

$$0.75 \cdot p \cdot r/t = 0.75 \cdot 2.45 \cdot 1800/16 = 234 \text{ N/mm}^2 < 355/1.5 = 237 \text{ N/mm}^2.$$

#### Gleiches Beispiel mit Amstutzformeln

Es ist zu beachten, dass Amstutz nicht vorgesehen hat, verschiedene Stähle für Rohr und Versteifungsring einzusetzen. Es ergibt sich somit:

Streckgrenze (Rohrwerkstoff und Versteifungsring):  $600 \text{ N/mm}^2$  sonst wie oben.

mit mittragender Breite  
 $30 t = 480 \text{ mm}$ , kritischer  
 Aussendruck des Ringes  
 einschl. mittragender Breite  
 des Rohrwandes:  $4.24 \text{ N/mm}^2$

mit mittragender Breite  
 $15 t = 240 \text{ mm}$ , kritischer  
 Aussendruck des Ringes  
 einschl. mittragender  
 Breite des Rohrwandes:  $4.89 \text{ N/mm}^2$

Es wurde nicht mit den Näherungsformeln (41) oder (46) aus [5] gerechnet, sondern mit den genauen Formeln (18) und (42), jedoch ohne die Vereinfachungen in Gleichung (20). Amstutz belastet den Versteifungsring *nur im Bereich des Ringes*. Daraus erklärt sich der widersinnige Effekt, dass ein kleinerer Querschnitt mehr aushalten soll als ein grösserer.

Es liegt daher auf der Hand, dass man mit diesen Formeln nicht dimensionieren sollte.

#### Das Rohr zwischen den Versteifungsringen

Das Rohr zwischen den Ringen soll als freies Rohr mit einer endlichen Länge  $k$ , wobei die Enden des Rohres kreisrund gehalten werden (Theorie von v. Mises, [12]) gerechnet werden. Für grosse Werte von  $k/r$  verringert sich die Wellenzahl auf 2 und, unter Beachtung des Poisson-Effektes, vereinfacht sich die Beulformel zur einfachen Formel von Levy (Knicken eines Kreisringes).

Wenn man bei der Dimensionierung mit [12] den Abstand der Ringe zu gross wählt, so stellt man bald fest, dass ein unversteiftes Rohr mehr aushält als das Rohr zwischen den Streifen nach v. Mises. Dies ist kein Widerspruch, denn mangels besserer Theorien wird hier die Theorie von v. Mises ohne die Stützwirkung des umhüllenden Betons benützt.

#### Plastizitätstheorie

Es sei in Erinnerung gerufen, dass es sich hier um ein statisch unbestimmtes Spannungsproblem zweiter Ordnung handelt, das auf ein ebenes Problem reduziert wird.

Der kritische Aussendruck ist erreicht, wenn in den äussersten Fasern innen oder aussen die Fließgrenze erreicht wird. Selbstverständlich ist das Tragsystem dann noch nicht erschöpft, denn die Spannungsverteilung verhält sich nach Navier. Man könnte jetzt die Belastung so lange steigern, bis über den ganzen Querschnitt die Fließgrenze erreicht wird, aussen die Stauchgrenze, innen die Streckgrenze des Materials (in der Symmetrieachse des Systems,  $x = 0$ ). Theoretisch würde man bei einem unversteiften Rohr auf einen etwa 50% höheren Druck kommen.

Die beiden Beispiele, die Amstutz in seinem Aufsatz vorrechnet [5,6] und die oben nachgerechnet wurden, nutzten diese Reserven des Materials aus. *Die Frage ist, ob es statisch zulässig ist!*

Offensichtlich nicht, denn es handelt sich um Theorie 2. Ordnung. Die Verschiebungen gehen in die Rechnung hinein. Wenn wir ein oder mehrere Fließgelenke einführen, wird die Biegelinie verfälscht und damit auch die Spannungsermittlung. Jedes Fließgelenk verursacht einen Knick in der Biegelinie. Man darf hier nicht das Traglastverfahren heranziehen und die Streckgrenzen der Materialien mit den Amstutzformeln (49), (50) aus [5] vergrössern!

#### Die Sicherheitszahlen

Es ist vernünftig, die Beulsicherheit für die Versteifungsringe höher anzusetzen als für das Rohr dazwischen. Beim letzteren ist bekannt, dass man sich mit der Berechnung nach v. Mises auf der sicheren Seite befindet, denn die Stützwirkung des Betons und die Einspannung an den Ringstreifen erhöhen die Sicherheit. Zudem ist eine Beule zwischen den Ringen weit weniger schlimm, als wenn die Versteifungsringe versagen.

Die ersten Druckschächte in den fünfziger Jahren wurden gebaut, ohne dem Bergwasser viel Beachtung zu schenken. Üblicherweise wurde bei den offenen Druckleitungen mit Innendruck und Kesselformel dimensioniert. Es gab sogar bekannte Stollenbauer, die vom Aussendruck nichts wissen wollten. So kommt es, dass heute noch in den meisten Lastenheften die Sicherheitszahl für Innendruck höher angesetzt ist als diejenige für Aussendruck. Nach Kenntnissen des Schreibenden, ist *noch nie eine Stahlpanzerung aufgrund des Innendruckes havariert*.

Dagegen ist eine grosse Zahl von Beulfällen bekannt. Bei der Festlegung der Sicherheitszahlen sollte man sich dies in Erinnerung rufen.

#### Literatur

- [1] Amstutz E. «Das Einbeulen von Schacht- und Stollenpanzerungen», Schweizerische Bauzeitung: Heft 9, 1950.
- [2] Juillard, H. «Knickprobleme an geraden Stäben, Kreisbogensegmenten und Zylindern», Schweizerische Bauzeitung: Heft 70, 1952.
- [3] Amstutz E. «Das Einbeulen von vorgespannten Schacht- und Stollenpanzerungen», Schweizerische Bauzeitung: Heft 16, 1953.
- [4] Vaughan, E.W. «Steel linings for pressure shafts in solid rock», Proceedings, ASCE, Paper 949, 1956.
- [5] Amstutz E. «Das Einbeulen von Schacht- und Stollenpanzerungen», Schweizerische Bauzeitung: Heft 28, 1969.
- [6] Amstutz E. «Buckling of Pressure Shafts and Steel Linings», Water Power: November 1970.
- [7] Jacobsen, S. «Einbeulen von kreisrunden Ringen und zylindrischen Rohren, die gegen radiales Ausweichen behindert sind», Rohre, Rohrleitungsbau, Rohrleitungstransport, No. 5 und 6, 1972.
- [8] Jacobsen, S. «Buckling of circular rings and cylindrical tubes restrained against radial displacement under external pressure», Water Power: Dezember 1974.
- [9] Jacobsen, S. «Pressure distribution in steel lined pressure tunnels and shafts», Water Power: Dezember 1977.
- [10] Jacobsen, S. «Buckling of pressure tunnel steel linings with shear connectors», Water Power and Dam Construction: June 1978.
- [11] Jacobsen, S. «The proper design of steel linings for hydro power tunnels», Water Power and Dam Construction: June 1983.
- [12] Jacobsen, S. «Recommendations on the design of steel linings for penstocks», Water Power and Dam Construction: April 1991 (with computer program «buckling»).

#### Schadenfälle durch Einbeulen

In den Jahren 1958–1978 traten Einbeul-Schadenfälle in den schweizerischen Stollen und Schächten auf: *Acker-sand, Rothenbrunnen, Robiei, Ferrera, Göschenen und Bitsch*. Die Auflistung ist wahrscheinlich nicht vollständig und könnte mit ausländischen Schadenfällen ergänzt werden.

Vier der Schadenfälle waren auf falsche oder zu knappe Dimensionierung der Stahlpanzerung zurückzuführen. Bei einem der Fälle hat man sich auf die günstige Wirkung einer gezielten Vorspannung der Panzerung verlassen [2]. Ein



nicht gut funktionierendes Drainagesystem war offensichtlich schuld am sechsten Schadenfall.

Die Beulen waren oft über hundert Meter lang und manchmal so tief, dass man zwischen Betonmantel und eingebeultem Rohr gehen konnte. Die Reparaturen der schadhaften Panzerungen sind viel schwieriger und aufwendiger als die Erstmontage. Allein der Transport der Ersatzrohre durch die nichthavarierte Panzerung wirft grosse Probleme auf (Durchmesser zu klein für Transport ganzer Rohre).

Die anfallenden Sanierungskosten sowie die Verluste infolge Produktionsausfall überstiegen daher in den meisten Fällen bei weitem die vermeintlich gesparten Mehrkosten für eine vernünftige Dimensionierung der eingebeulten Stahlpanzerungen.

### Schweisser- und Schweissverfahrensprüfung

Es war früher üblich, dass ausgesuchte Schweisser unter idealen Bedingungen (im Schweissprobenlabor) die Schweissproben für die Verfahrensprüfungen herstellten. Die Schweisser, die später am Objekt tätig sein sollten, absolvierten ihre Schweisserprüfung gemäss ir-

gendeiner Norm (VDI-Norm, ASME), die oft mit dem späteren Schweissen am Objekt nicht mehr viel gemeinsam hatte.

Man kann die beiden Prüfungen objektorientiert und wesentlich effektiver machen, indem sie teilweise kombiniert werden.

- Die Prüfungen sollten so ablaufen, dass jeder Schweisser, der später am Objekt arbeiten wird, sei es in der Fabrikation oder auf Montage, bei der Prüfung möglichst unter ähnlichen, «echten» Bedingungen arbeitet. Er sollte mit den gleichen Zusatzwerkstoffen (Elektroden, Schweissdraht, Pulver) und mit dem gleichen Grundwerkstoff in der gleichen Lage ebenso dicke Platten schweissen wie später am Objekt. Damit wird auch ein Teil der Verfahrensprüfung erledigt, und eben nicht von den «Star-Schweisern» des Lieferanten.

Meistens werden trotzdem die Rohrbauer vor Fabrikationsbeginn die vorgesehenen Schweissverfahren mit den von ihnen für solche Zwecke besonders trainierten Schweisser ausprobieren.

- Die Schweisser sollten nicht nur vorgängig geprüft, sondern während der Fabrikation und Montage als Erzie-

hungsmassnahme immer wieder kontrolliert werden, damit die Qualität der Arbeit nicht nachlässt (Montagsarbeit). Hierfür eignen sich sogenannte Auslaufplatten, die neben den üblichen zerstörungsfreien Prüfungen für Kerbschlagproben gut geeignet sind.

Im Wirkungsfeld des Schreibenden wurden in den Ausschreibungsdokumenten die Prüfungen schon in den 60er Jahren im obigen Sinne verschärft.

Selbst die KKW-Ingenieure, deren «Qualitäts-Sicherung» als sehr umfassend und vorbildlich eingestuft wird, liessen ihre Schweisser nur vorgängig gemäss Norm prüfen (Beznau, Mühleberg, Gösgen). Man muss ihnen allerdings zugute halten, dass sie mehr oder weniger gezwungen waren, nach ASME-Code zu arbeiten. Aus diesem Grunde mussten manchmal sogar Stähle verarbeitet werden, die wegen des Kohlenstoffgehaltes für Schweizer Verhältnisse fast als unschweisbar galten. Im Druckleitungsbau hat man damals schon längst geeignetere Feinkornstähle verarbeitet.

Adresse des Verfassers: S. Jacobsen, dipl. Ing. TUD/SIA, Berater Ingenieur, Rebbergstrasse 55A, 5430 Wettingen, Tel. 056/26 18 45

## Bestehende Fundationen – nachträglich verstärkt

**Verschiedene Gründe und Gegebenheiten können eine nachträgliche Verstärkung bzw. Erhöhung der Tragfähigkeit einer Fundation bedingen. Die in den letzten Jahren entwickelten Baumethoden im Tiefbau bieten fachgerechte Lösungen für beinahe jede Problemstellung an. Nachstehend werden die in der Schweiz üblicherweise angewendeten Systeme beschrieben.**

Hauseigentümer und Bauherren kommen heute insbesondere in städtischen Agglomerationen immer öfter in die Si-

Änderungen von Bauordnungen Umnutzungen möglich werden.

Die in den letzten Jahren entwickelten speziellen Baumethoden im Tiefbau bieten nun eine breite Palette angepasster Systeme an, welche die fachgerechte und kostengünstige Lösung für beinahe jede Problemstellung erlauben. Es wird damit möglich, auch in anspruchsvollen geometrischen und geologischen Verhältnissen die Fundation bestehender Gebäude neuen Nutzungsanforderungen anzupassen und/oder diese nachträglich zu sanieren.

Folgende Gründe und Gegebenheiten können zu einer nachträglichen Fundamentverstärkung führen:

☐ Sanierung von Bauwerken, die bei ihrer Erstellung ungenügend fundiert wurden und deshalb meist ungleichmässige Setzungen erleiden, welche nicht oder nur äusserst langsam zum Stillstand gelangen (Erkennungsmerkmale: Strukturelle Risse in Fassade und an Tragkonstruktion, Risse und Aufwölbungen betonierter Kellerböden sowie Abscheren von Ver- und Entsorgungsleitungen)

☐ Fundamentlasterhöhung infolge Um- und Anbauten:

- Erhöhung Eigengewicht infolge Aufstockung
- Nutzlasterhöhung bestehender Gebäudeteile
- partielle Lasterhöhungen infolge Änderungen des Tragsystems

☐ Sicherung von Nachbargebäuden bei Erstellung von unmittelbar angrenzenden Neubauten mit mehreren Untergeschossen (Vermeidung von Setzungen beim bestehenden Gebäude infolge Erdlastumlagerung und Absenkung des Grundwasserspiegels im Bauzustande).

VON RUDOLF VON MAY,  
ZÜRICH

tuation, Fundationen bestehender Gebäude nachträglich verstärken bzw. deren Tragfähigkeit erhöhen zu müssen. Dies hat seine Gründe darin, dass ein grosses Bedürfnis nach Sanierungen besteht, dass nach wie vor immer öfter bei engen Platzverhältnissen und schwieriger Geologie gebaut werden muss und dass durch Umnutzungen und