Band 124 Der S. I. A. ist für den Inhalt des redaktionellen Teils seiner Vereinsorgane nicht verantwortlich Nr. 14

Die Berechnung der Betonauskleidung von Druckstollen

Von Dipl. Ing. OTTO FREY-BAER, Baden

Das Problem der Dimensionierung von Stollenauskleidungen ist nicht neu. Eingehende Untersuchungen wurden bereits für Druckschächte ausgeführt, deren hoher Innendruck eine Blechpanzerung erforderte. Aber auch bei Druckstollen mit kleinerem Innendruck bis zu 150 m Wassersäule kann aus verschiedenen Gründen eine Betonauskleidung erforderlich sein, wobei jedoch an den Beton einer solchen Auskleidung wesentlich grössere Anforderungen gestellt werden müssen als an den Beton eines gepanzerten Querschnittes, bei dem die Dichtungsaufgabe von der Panzerung übernommen wird. Wie die nachfolgenden Ausführungen zeigen sollen, sind die in einer einfachen Beton-Auskleidung auftretenden Spannungen je nach dem durchfahrenen Gebirge ganz beträchtlich, sodass es grosse Schwierigkeiten verursacht, absolut rissfrei zu konstruieren. Die Rolle, die eine allfällige Rundeisenarmierung im Kräftespiel eines solchen Stollenquerschnittes übernimmt, ist besonderer Beachtung wert.

Wie bei allen unseren Berechnungen sind wir auch beim vorliegenden Problem auf gewisse Annahmen angewiesen, die von den tatsächlichen Verhältnissen mehr oder weniger abweichen. Beispielsweise müssen wir voraussetzen, dass das Gebirge ein homogener, elastischer Körper sei. Wie schon mehrfach in Stollen ausgeführte Elastizitätsmessungen gezeigt haben, ist diese Annahme nicht so roh, wie es auf den ersten Blick scheint, sie hält jedenfalls einem Vergleich mit den im Betonbau üblichen Annahmen durchaus stand. Hier wie dort sind in unseren Resultaten die Stellen nach dem Komma weniger wichtig; wir müssen vielmehr bestrebt sein, die zu erwartenden ungünstigsten Verhältnisse in richtigem Masse zu berücksichtigen.

1. Theoretische Grundlagen

Das Hooke'sche Gesetz gilt für Beton nur angenähert, für Granit jedoch ist die Abweichung von diesem Gesetz noch beträchtlicher. C. Bach [1]) hat für Granit gefunden:

Druck: $-50{,}0 < \sigma < 0$ kg/cm² $\quad \varepsilon = \dfrac{1}{250\,000}\,\sigma^{1{,}132}$

Zug: $0 < \sigma < 21$ kg/cm² $\quad \varepsilon = \dfrac{1}{235\,000}\,\sigma^{1{,}374}$

Da diese Beziehungen zwischen Spannung und spezifischer Dehnung je nach Felsqualität wiederum gewissen Schwankungen unterworfen sind, muss zur Vereinfachung sowohl für den Beton als auch für den Fels das Hooke'sche Gesetz angewendet werden.

Als Berechnungsgrundlage dient die Theorie für dickwandige Rohre, wie sie z. B. in Föppl, Technische Mechanik, III. Band, Festigkeitslehre, § 58 der 12. Auflage, dargestellt ist.

Wir bezeichnen mit:

u = elastische Vergrösserung des Radius x;
ε_t = spez. Dehnung in tangentialer Richtung;
ε_r = spez. Dehnung in radialer Richtung.

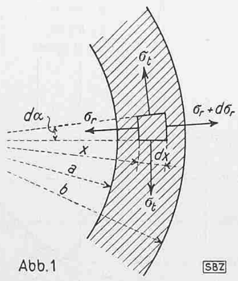

Abb. 1

Da die Länge eines Kreisumfangs proportional mit dem Radius wächst, ist $\varepsilon_t = \dfrac{u}{x}$. Die Grösse eines Elementes in radialer Richtung nach erfolgter Formänderung ist $dx + \dfrac{du}{dx}\,dx$ und die entsprechende spez. Dehnung beträgt somit $\varepsilon_r = \dfrac{du}{dx}$.

Gemäss dem erweiterten Hooke'schen Gesetze ist:

$$\varepsilon_t = \frac{1}{E}\left(\sigma_t - \frac{1}{m}\,\sigma_r\right) \qquad \varepsilon_r = \frac{1}{E}\left(\sigma_r - \frac{1}{m}\,\sigma_t\right)$$

m = Poisson'sche Zahl

Durch Auflösen dieser beiden Gleichungen und Einsetzen der oben gefundenen Werte für ε_t und ε_r erhalten wir:

$$\sigma_t = \frac{mE}{m^2-1}\left(m\,\frac{u}{x} + \frac{du}{dx}\right)$$

$$\sigma_r = \frac{mE}{m^2-1}\left(m\,\frac{du}{dx} + \frac{u}{x}\right)$$

Werden nun an einem Element mit den Grössen in radialer Richtung von dx und in tangentialer Richtung von $x\,d\alpha$ und $(x + dx)\,d\alpha$ die Seitenkräfte angebracht und in radialer Richtung die Gleichgewichtsbedingung angeschrieben, ergibt sich die Gleichung

$$x^2\,\frac{d^2u}{dx^2} + x\,\frac{du}{dx} - u = 0$$

Die Lösung dieser Differentialgleichung lautet:

$$u = Bx + \frac{C}{x}$$

Die beiden Integrationskonstanten B und C müssen jeweils mittels der Randbedingungen berechnet werden.

2. Berechnung des Elastizitätsmoduls des Gebirges

Der E-Modul des Gebirges ist in der Regel kleiner als derjenige eines Handstückes vom gleichen Material. Um den E-Modul der Stollenwandung in einem bestimmten Querschnitt einwandfrei feststellen zu können, ist es unerlässlich, in diesem Querschnitt Dehnungsmessungen vorzunehmen. Es wird daher vorausgesetzt, dass die Radiusvergrösserung u bei einem erzeugten Innendruck p_i bekannt ist. Der Radius des Ausbruch-Profiles sei b, der Aussenradius des «dickwandigen Rohres» unendlich. Die Randbedingungen zur Berechnung der Integrationskonstanten lauten somit:

$$x = \infty : (\sigma_r)^{x=\infty} = 0 \quad \ldots\ldots \quad (1)$$

$$x = b \;: (\sigma_r)^{x=b} = -p_i \quad \ldots\ldots \quad (2)$$

Aus der Bedingung (1) ergibt sich $m\,\dfrac{du}{dx} + \dfrac{u}{x} = 0$. Darin bedeuten $u = Bx + \dfrac{C}{x}$ und $\dfrac{du}{dx} = B - \dfrac{C}{x^2}$. Setzt man diese Werte für u und $\dfrac{du}{dx}$ ein, so erhalten wir

$$mB + B = 0; \quad \underline{B = 0}$$

Die zweite Bedingung lautet:

$$-p_i = \frac{mE}{m^2-1}\left(-m\,\frac{C}{b^2} + \frac{C}{b^2}\right) = \frac{mE}{m^2-1}\,\frac{1-m}{b^2}\,C$$

$$\underline{C = p_i\,b^2\,\frac{m+1}{mE}}$$

$$(u)^{x=b} = \frac{C}{b} = \frac{p_i\,b\,(m+1)}{mE}$$

$$\boxed{E = \frac{p_i\,b\,(m+1)}{u\,m}}$$

Darin bedeuten:

p_i = Innerer Wasserdruck
b = Radius des Stollenprofils
u = Längenänderung des Radius (Vergrösserung positiv, Verkleinerung negativ)
m = Poisson'sche Konstante $\cong 6$

Eine kürzlich ausgeführte Dehnungsmessung in einem Stollen von 2,40 m ⌀ hat bei einem Innendruck von 10 kg/cm² ein u = 0,01875 cm ergeben. Damit konnte der E-Modul des Felsens sehr einfach ermittelt werden:

$$E = \frac{10 \cdot 120}{0{,}01875} \cdot \frac{7}{6} = \underline{75\,000 \text{ kg/cm}^2}$$

3. Spannungen im unverkleideten Felsmantel bei Innendruck

Bei der Berechnung des E-Moduls des Felsmantels hat sich ergeben:

$$B = 0 \qquad C = p_i\,b^2\,\frac{(m+1)}{mE}$$

Damit lassen sich die Spannungen leicht berechnen:

---

[1]) *C. Bach*: «Elastizität und Festigkeit»; 8. Auflage, Seite 90.