

Die Berechnungen der Pfeiler aufgelöster Staumauern

Autor(en): **Frey-Baer, Otto**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **123/124 (1944)**

Heft 9

PDF erstellt am: **12.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-53893>

Nutzungsbedingungen

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

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

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

Haftungsausschluss

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

INHALT: Die Berechnung der Pfeiler aufgelöster Stauauern. — Von der Organisation der wissenschaftlichen Forschung in der Schweiz. — Bericht über die bisherigen Arbeiten der Internat. Beleuchtungskommission auf dem Gebiete der Tageslichtbeleuchtung. — Die Ausnutzungsziffer in Bauordnungen. — Die Wirkung des Brisanzbombenabwurfes in Samaden. — Das deutsche Kriegs-Einheitswohnhaus. — Die Brennholzversorgung der industriellen Kohlenverbraucher. — Mitteilungen: Eine

Flugzeughalle aus Eisenbeton. Die Höhengrundlagen unserer Karten und die Entwicklung des Präzisions-Nivellements seit 1865. Torfausbeutung in der Schweiz. Spezialwagen für Grossbehältertransporte der SBB. Die Bedeutung der trockenen Kokskühlung für den Kokereibetrieb. — Wettbewerbe: Erweiterung des städt. Rathauses Aarau. Primarschulhaus auf dem Felsberg, Luzern. — Nekrologe: Herm. Zollinger. Konrad v. Steiger. — Literatur. — Mitteilungen der Vereine. — Vortrags-Kalender.

Band 123

Der S. I. A. ist für den Inhalt des redaktionellen Teils seiner Verbandsorgane nicht verantwortlich. Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet.

Nr. 9

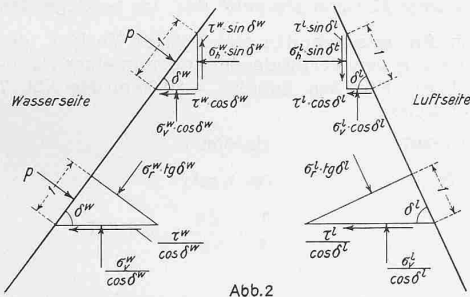


Abb. 2

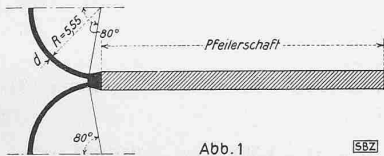


Abb. 1

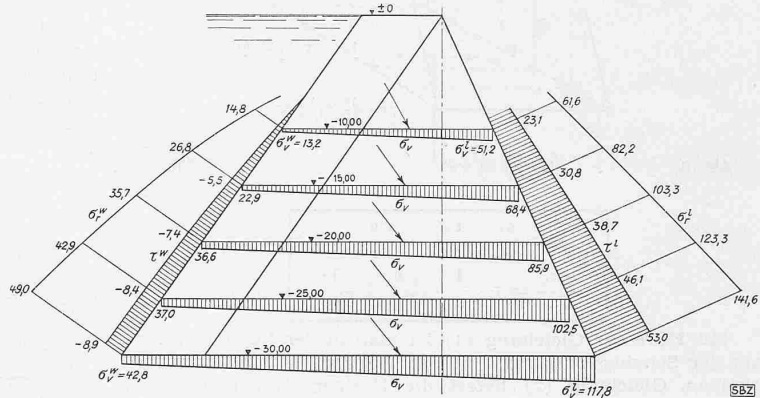


Abb. 3. Vertikal- und Randspannungen in t/m²

Die Berechnung der Pfeiler aufgelöster Stauauern

Von Dipl. Ing. OTTO FREY-BAER, Baden

Der Richtung und Grösse der Hauptspannungen im Innern von verhältnismässig dünnen Pfeilerscheiben aufgelöster Stauauern muss insofern grosse Bedeutung zufallen, als es durchaus möglich ist, dass trotz den in allen Punkten vorhandenen vertikalen Druckspannungen schiefe Zughauptspannungen auftreten können. Diese Zugspannungen führen besonders da, wo der Spannungsfluss durch Türöffnungen oder andere Durchbrüche im Pfeiler gestört ist, zu unliebsamen Betonrissen. Zudem ist es erwünscht, die Spannungstrajektorien in der Pfeilerscheibe (Richtungen der Hauptspannungen) zu kennen, um die Betonierung der Pfeiler in solchen Blöcken auszuführen, deren Form jede oder wenigstens eine statisch ungünstige Rissbildung verhindert. Da die Druckspannungen meistens nur einen Bruchteil der zulässigen Beanspruchungen erreichen, wenden wir unsere besondere Beachtung den allfällig auftretenden Zugspannungen zu¹⁾. Auf die Bedeutung der Schubspannungen soll nur kurz am Schlusse hingewiesen werden.

Prof. F. Tölke erläutert in seinem Buche «Wasserkraft-Anlagen» eine Dimensionierungs-Methode, womit die Form der Pfeiler bestimmt werden kann. Sie gilt jedoch nur für Pfeiler, die mit dem Staulement, Gewölben oder Platte, nicht verbunden sind, wenn somit zwischen Pfeilerschaft und Staulement eine Gleitfluge angeordnet ist wie beispielsweise beim heute praktisch nicht mehr zur Ausführung gelangenden Ambursen-Typ. Sobald jedoch aus konstruktiven Gründen (Steifigkeit usw.) das Staulement mit dem Pfeiler verbunden wird, muss die einheitliche Wirkung berücksichtigt werden und man ist dann gezwungen, die Form anzunehmen, um anschliessend die Spannungen zu berechnen.

Für die nachfolgende Berechnung diene wieder²⁾ als Beispiel die von der Motor-Columbus A.-G. projektierte Gewölberöhrensperre (Abb. 6 loc. cit.). Das Pfeilerelement besteht darnach aus dem rechteckigen Pfeilerschaft und den beidseitig anschliessenden Gewölbehälften (Abb. 1). Die Berechnung der Vertikalspannungen in verschiedenen Horizontalschnitten benötigt keine besondere Erläuterung. Es sind einfach am Pfeilerelement die äusseren Kräfte oberhalb des betreffenden Schnittes anzubringen und die sich daraus ergebenden Vertikalspannungen mittels der Navier'schen Annahme (Ebenbleiben der Querschnitte) zu bestimmen. In den luft- und wasserseitigen Randpunkten der Horizontalschnitte bezeichnen wir diese Vertikalspannungen mit σ_v^l und σ_v^w . In diesen Randpunkten ist es mittels der Randbedingungen möglich, die Hauptspannungen aus den Vertikalspannungen sofort zu bestimmen (Abb. 2).

¹⁾ Ing. Dr. A. Stucky: Der Talsperrenbruch im Val Gleno, in Schweiz. Bauzeitung Bd. 83, S. 63* und 74* (Febr. 1924).

²⁾ Wie im Aufsatz des Verfassers «Berechnung schiefliegender kreisförmiger Gewölbe gegen Wasserdruck» in Schweiz. Bauzeitung Bd. 122, Nr. 9 (28. Aug. 1943), S. 95 bis 98.

Wasserseite

Luftseite

$$\tau^w = (p - \sigma_v^w) \cotg \delta^w$$

$$\tau^l = \sigma_v^l \cdot \cotg \delta^l$$

$$\sigma_h^w = p - \tau^w \cdot \cotg \delta^w$$

$$\sigma_h^l = \sigma_v^l \cdot \cotg^2 \delta^l$$

$$\sigma_r^w = \sigma_v^w - \tau^w \cdot \cotg \delta^w$$

$$\sigma_r^l = \frac{\sigma_v^l}{\sin^2 \delta^l}$$

Dabei bedeuten:

$$\sigma_v^w = \text{Wasserseite}$$

$$\sigma_v^l = \text{Luftseite}$$

$$\sigma_h^w = \text{Wasserseite}$$

$$\sigma_h^l = \text{Luftseite}$$

$$\tau^w = \text{Wasserseite}$$

$$\tau^l = \text{Luftseite}$$

$$\sigma_r^w = \text{Wasserseite}$$

$$\sigma_r^l = \text{Luftseite}$$

Vertikalspannungen

Horizontalspannungen

Schubspannungen

Rand-Hauptspannungen

Der Verlauf dieser Spannungen am gewählten Beispiel ist aus Abb. 3 ersichtlich. Die wasserseitigen Spannungen sind klein, da die Mauer so bemessen ist, dass die wasserseitige Hauptspannung etwa dem hydrostatischen Wasserdruck entspricht, sodass allfälliger Porenwasserdruck keine Zugspannung im Beton erzeugt. Besonders zu erwähnen ist nur, dass die Schubspannungen an der Wasserseite entgegengerichtet sind wie diejenigen an der Luftseite. Auf diese Tatsache wird bei der Berechnung der Schubspannungen nochmals hingewiesen. Damit kann zur eigentlichen Untersuchung des Spannungsverlaufes im Innern der Pfeilerscheibe geschritten werden. Um in irgend einem Punkte die Hauptspannungen berechnen zu können, müssen die Spannungen in drei Richtungen bekannt sein. In allen Punkten der gewählten Horizontalschnitte kennen wir nun bereits die Vertikalspannungen und benötigen somit in diesen Punkten nur noch die Schub- und Horizontalspannungen. Für diese zwei unbekannt Spannungen stehen uns die Scheibengleichgewichtsbedingungen in horizontaler und vertikaler Richtung zur Verfügung. Abb. 4 stellt ein aus dem Pfeilerschaft herausgeschnittenes Element dar, an dem alle angreifenden Kräfte angebracht sind. In der x- und y-Richtung sei das Element sehr klein gedacht, in der z-Richtung dagegen besitze es die volle Pfeilerstärke, die über der ganzen Horizontalschicht konstant ist. Die an diesem Element auftretenden Spannungen sind Funktionen des Ortes. Die Grössen ihrer Aenderungen in horizontaler und vertikaler Richtung sind durch die partiellen Differentialquotienten nach x und y bestimmt. Setzt man nun die Summen der Kräfte in beiden Axrichtungen gleich Null, wobei die unendlich kleinen Grössen höheren Grades vernachlässigt werden und für

$$z_1 = z + \frac{\partial z}{\partial y} \cdot dy$$

eingesetzt wird, ergeben sich folgende zwei Gleichungen:

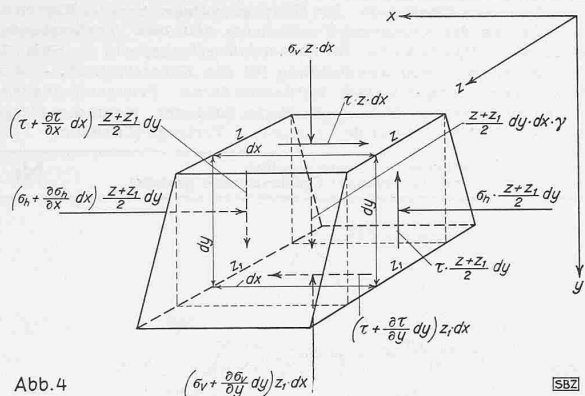


Abb. 4

$$\frac{\partial \tau}{\partial x} = \frac{\sigma_v}{z} \cdot \frac{\partial z}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_v}{\partial y} - \gamma \quad \dots \quad (1)$$

$$\frac{\partial \sigma_h}{\partial x} = \tau \cdot \frac{1}{z} \cdot \frac{\partial z}{\partial y} + \frac{\partial \tau}{\partial y} \quad \dots \quad (2)$$

Mit Hilfe der Gleichung (1) ist man in der Lage, den Verlauf der Schubspannungen τ in den Horizontalschnitten zu bestimmen, Gleichung (2) liefert die Horizontalspannungen σ_h .

Schubspannungen τ . In Abb. 5 ist die Schubspannungskurve eines Horizontalschnittes dargestellt. Es ist daraus ohne weiteres ersichtlich, dass die Aenderung von τ über eine Strecke dx die Grösse $\frac{\partial \tau}{\partial x} dx$ erreicht. Geht man dabei von der bekannten Schubspannung τl am luftseitigen Rande des Horizontalschnittes aus, stellt sich die Kurve für τ in folgender Funktion dar:

$$\tau = \tau l + \int \frac{\partial \tau}{\partial x} \cdot dx \quad \dots \quad (3)$$

Der partielle Differentialquotient muss vorerst aus der Gleichung (1) gewonnen werden, die lautet:

$$\frac{\partial \tau}{\partial x} = \sigma_v \left(\frac{1}{z} \cdot \frac{\partial z}{\partial y} \right) + \frac{\partial \sigma_v}{\partial y} - (\gamma)$$

Bei näherer Betrachtung dieser Gleichung kann festgestellt werden, dass die Ausdrücke in den Klammern Konstante darstellen, da über den Horizontalschnitt die Neigungen $\frac{\partial z}{\partial y}$ der beiden Pfeiler-Seitenflächen nicht ändern. Die Vertikalspannung σ_v lässt sich sehr einfach in die folgende Funktion von x kleiden (Abb. 6):

$$\sigma_v = \sigma_v^l - x \cdot \left(\frac{\sigma_v^l - \sigma_v^w}{l} \right)$$

Das zweite Glied $\frac{\partial \sigma_v}{\partial y}$ der Gleichung (1) stellt nichts anderes dar, als das Vertikalspannungsgefälle in vertikalen Schnitten. Dieses Gefälle kann auf die übersichtlichste Art graphisch be-

Abb. 7 (rechts). Linien gleicher Vertikalspannungen

und Vertikalspannungsgefälle $\frac{\partial \sigma_v}{\partial y}$

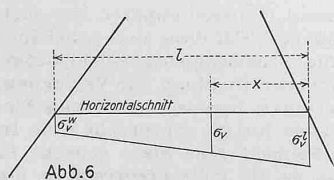


Abb. 6

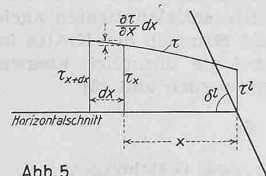


Abb. 5

stimmt werden. Vorerst sind die Linien gleicher Vertikalspannungen in der Pfeilerscheibe aufzutragen. Durch eine Anzahl Punkte der gewählten Horizontalschnitte legen wir Vertikalebene (A bis G in Abb. 7), in die im umgeklappten Zustande die σ_v -Kurve gezeichnet wird. Mittels der Kurventangente im betrachteten Punkte kann das Gefälle direkt gemessen werden. Trägt man nun das Vertikalspannungsgefälle über eine Anzahl von Punkten eines Horizontalschnittes auf, so stellt sich die Kurve $\frac{\partial \sigma_v}{\partial y}$ über diesem Horizontalschnitt dar. Im vorliegenden Beispiel ergibt sich für alle Schnitte ein linearer Verlauf, der sich sehr einfach analog den Vertikalspannungen in einer Funktion von x fassen lässt. Für den Schnitt - 30,00 m der Abb. 7 ergibt sich beispielsweise:

$$\sigma_v = 117,768 - 1,79307 \cdot x \quad (\text{in t/m}^2)$$

$$\frac{\partial \sigma_v}{\partial y} = 2,00 + 0,00928 \cdot x \quad (\text{in t/m}^2)$$

$$z = 1,80 \text{ m} \quad \frac{1}{z} \cdot \frac{\partial z}{\partial y} = 0,01667$$

$$\gamma = 2,400 \text{ t/m}^3$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial x} = 0,01667 (117,768 - 1,79307 \cdot x) + 2,00 + 0,00928 \cdot x - 2,400$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial x} = 1,56319 - 0,02061 \cdot x$$

Damit lautet die Funktion von τ nach Gleichung (3) für den Schnitt - 30,00 m:

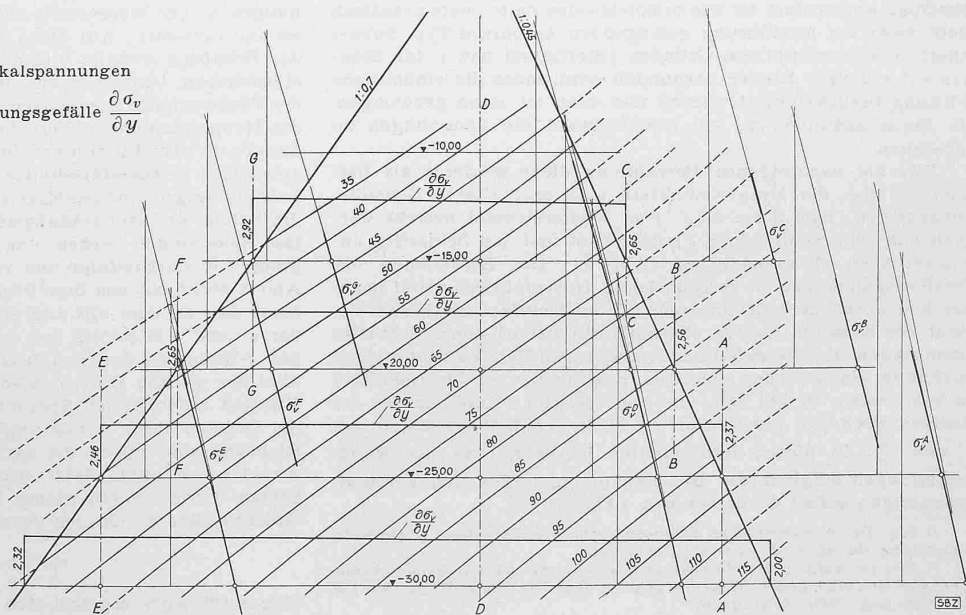
$$\tau = \tau l + \int \frac{\partial \tau}{\partial x} \cdot dx = \tau l + 1,56319 \cdot x - 0,01030 \cdot x^2$$

Die Schubspannung τ ist somit für jeden Punkt dieses Schnittes im Abstand x vom luftseitigen Rande bestimmt. Natürlich gilt diese Kurve nur für den eigentlichen Pfeilerschaft, nicht aber für den Gewölbeteil. Im Gewölbe interessieren uns weder die Schub- noch die Horizontalspannungen, da diese sehr klein sind und daher im armierten Gewölbe ohne weiteres aufgenommen werden.

Hier angelangt, bietet sich eine günstige Gelegenheit, das bisherige Ergebnis der Berechnung zu prüfen. Die aus den Schubspannungen resultierende Schubkraft muss gleich der Querkraft, also gleich der Horizontalkomponenten WH des Wasserdruckes sein. Für den Schnitt - 30,00 m ist $WH = 4\,698 \text{ t}$, die Summe der Schubspannungen im Pfeilerschaft von der Länge $l = 34,50 \text{ m}$ und $z = 1,80 \text{ m}$ ist:

$$z \cdot \int_0^l \tau dx = 1,8 \int_0^l (\tau l + 1,56319 \cdot x - 0,01030 \cdot x^2) dx = 4\,712 \text{ t}$$

Auf den ersten Blick scheint dieses Resultat falsch, da ja die im Schaft aufgenommene Schubkraft grösser ist als die Querkraft. Aus der Berechnung der Randspannungen haben sich jedoch an der Wasserseite negative Schubspannungen ergeben, das heisst τ ist an der Wasserseite entgegengesetzt gerichtet wie im Pfeilerschaft. Die an sich kleine Differenz erklärt sich



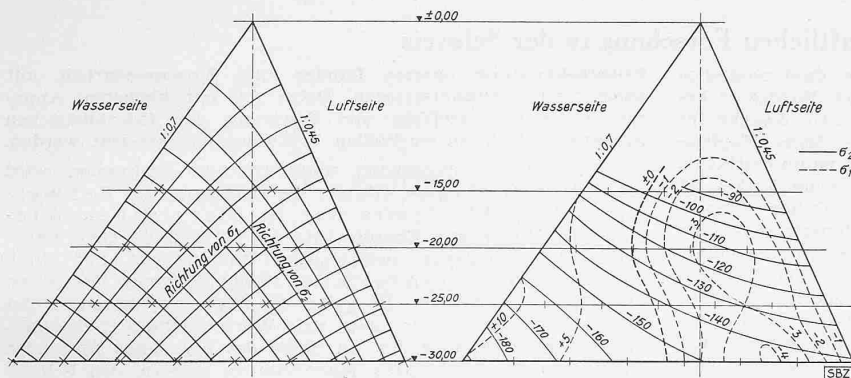


Abb. 9. Spannungstrajektorien

Abb. 10. Linien gleicher Hauptspannungen

somit aus dem negativen Verlauf der τ -Kurve im Gewölbe (siehe Abb. 8). Nötzli³⁾ hat bei seiner Berechnung der Coolidge-Staumauer die gleiche Tatsache festgestellt.

Horizontalspannungen. Die Berechnung der Horizontalspannungen σ_h erfolgt analog derjenigen für die Schubspannungen.

$$\sigma_h = \sigma_h^l + \int \frac{\partial \sigma_h}{\partial x} \cdot dx \quad \dots \quad (4)$$

$\frac{\partial \sigma_h}{\partial x}$ ergibt sich aus der Gleichung (2)

$$\frac{\partial \sigma_v}{\partial x} = \tau \left(\frac{1}{z} \cdot \frac{\partial z}{\partial y} \right) + \frac{\partial \tau}{\partial y} \quad (\text{Klammerausdruck konstant})$$

Die Funktion von τ ist bereits bestimmt. $\frac{\partial \tau}{\partial y}$ stellt das Schubspannungsgefälle in Vertikalebene dar und wird am einfachsten wieder graphisch gefunden. In Abb. 8 sind für die Schnittpunkte der Horizontalschnitte mit den Vertikalebene A bis G die Schubspannungsgefälle $\frac{\partial \tau}{\partial y}$ in gleicher Weise wie früher für $\frac{\partial \sigma_v}{\partial y}$ konstruiert und die erhaltenen Werte über den Horizontalschnitten aufgetragen. Die Kurven für $\frac{\partial \tau}{\partial y}$ sind wohl noch linear, weisen aber in der unteren Pfeilerhälfte Knickpunkte auf. Dies hat jedoch nur zur Folge, dass der Ausdruck für $\frac{\partial \tau}{\partial y}$ in Funktion von x nicht ganz so einfach wird. Im

weitem geht man genau gleich vor wie bei der Berechnung der Schubspannungen. Das Aufzeichnen der σ_h -Kurven erübrigt sich, da diese Spannung nur theoretischen Wert besitzt. Es genügt, für eine gewisse Anzahl Punkte deren Grösse zu kennen.

Hauptspannungen. Sind nun für eine grössere Anzahl von Punkten in der Pfeilerscheibe die Spannungen σ_v , τ und σ_h be-

³⁾ Ing. Dr. F. A. Nötzli (Los Angeles): Konstruktion und Ausführung der Coolidge-Staumauer in «Bauingenieur» 1929, Seite 385.

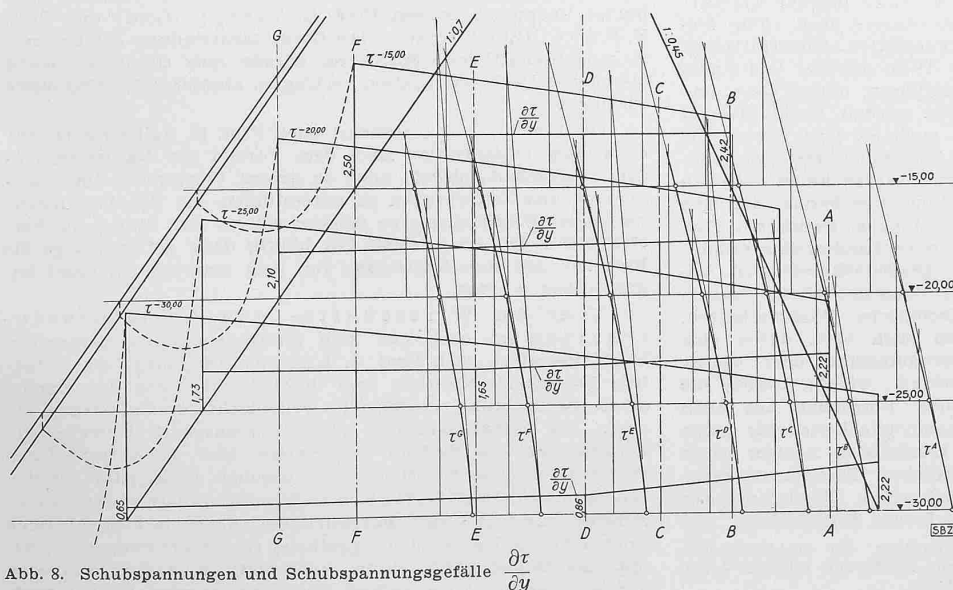


Abb. 8. Schubspannungen und Schubspannungsgefälle $\frac{\partial \tau}{\partial y}$

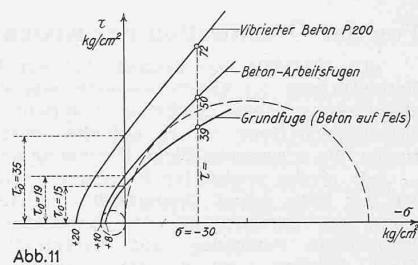


Abb. 11

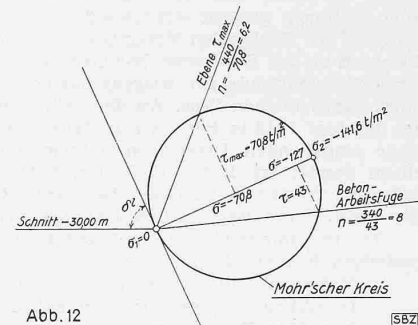


Abb. 12

kannt, lassen sich die Hauptspannungen und deren Richtungen mittels der bekannten Formeln berechnen oder mittels des Mohr'schen Kreises konstruieren.

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_h + \sigma_v}{2} \mp \sqrt{\frac{1}{4} (\sigma_h - \sigma_v)^2 + \tau^2}$$

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \quad \text{tg } 2\varphi = \frac{2\tau}{\sigma_v - \sigma_h}$$

φ stellt den Neigungswinkel der Hauptspannungsrichtung σ_1 gegen die Waagrechte dar. In das damit erhaltene Richtungsfeld können die Spannungstrajektorien eingetragen werden. Wie Abb. 9 zeigt, haben sie im untersuchten Beispiel die von den Vollmauern her gewohnte Form. Besonders aufschlussreich über die Spannungsverhältnisse im Innern der Pfeilerscheibe ist Abb. 10, die die *Linien gleicher Hauptspannungen* zeigt. Ein grösserer Teil des Pfeilers weist gegen die Wasserseite hin in der σ_1 -Richtung Zugspannungen auf, trotzdem hier überall die Vertikalspannungen Druck ergaben. Diese Zugspannungen haben das Bestreben, den Pfeiler längs der σ_2 -Trajektorien aufzureissen. Sie bilden jedoch mit ihrem Maximalwert von rund 11 t/m² keine Gefahr, da ein guter Beton 200 bis 300 t/m² übernehmen kann. Zudem würde die Standsicherheit der Sperre keine Einbusse erleiden, sobald der Riss oder auch die angeordnete Fuge wie beispielsweise bei der erwähnten Coolidge-Mauer in der Trajektorienrichtung verläuft, da darin keine Schubspannungen auftreten können. Immerhin erhielt im vorliegenden Fall der Gewölbekämpfer eine ausreichende Längsarmierung.

Die *Schubspannungen* können in gewissen Fällen ganz bedeutende Werte annehmen. Der gewissenhafte Konstrukteur wird sich daher überzeugen, dass diese Beanspruchungen zu keinen Schäden führen. Auf Grund der Mohr'schen Hauptschubspannungshypothese kann die in Abb. 11 dargestellte Abhängigkeit der Scherfestigkeit von der Hauptdruckfestigkeit angenommen werden. Es handelt sich nun darum, in einem Punkte den Sicherheitsgrad

$n = \frac{\tau_{\text{Bruch}}}{\tau_{\text{vorhanden}}}$ festzustellen, wobei zu beachten ist, dass n in den verschiedenen Ebenen durch diesen Punkt ändert. Durch das Aufzeichnen des Mohr'schen Kreises in diesem Punkte können die Normal- und Schubspannungen in den zu untersuchenden Ebenen direkt abgemessen und der Sicherheitsgrad durch Vergleich mit der Mohr'schen Kurve berechnet werden (Abbildung 12). Dabei darf man jedoch nicht vergessen, dass die zu Grunde gelegten Materialwerte von vielen Voraussetzungen abhängen und daher keine Konstanten darstellen.