

Neue Methoden der Festigkeitslehre

Autor(en): **Rappaport, S.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **39/40 (1902)**

Heft 19

PDF erstellt am: **26.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-23363>

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.

13 Gas- oder Petrolmotoren und 5 werden durch Dampfkraft betrieben.

Die privaten Uebertragungen sind mit Ausnahme zweier Fälle (einer Dampfkraft- und einer Gasmotoranlage) solche, die Wasserkräfte benutzen.

Als Werke mit Dampftrieb sind nur diejenigen aufgeführt, die regelmässig nur mit Dampf arbeiten, sowie ein Werk, das zwar gleichzeitig auch Wasserkraft benutzt der Leistung nach jedoch überwiegend mit Dampf arbeitet, das Elektrizitätswerk der Stadt Zürich.

Daneben finden sich bei 20 mit Wasserkraft betriebenen Primärwerken kalorische Reserveanlagen, zu vorübergehendem Gebrauch bei geringen Wasserständen und dgl., und zwar sind von diesen 14 Werke mit Dampfmaschinen und 6 Werke mit Gas-, Petrol- oder Benzinmotoren ausgestattet. Die grosse Unbeständigkeit der bisher für elektrische Anlagen ausgenützten Wasserkräfte kommt also darin zum Ausdruck, dass sich bereits 10% derselben mit kalorischen Reserven (und zwar z. T. sehr grossen) versehen haben, während eines der Werke, das die Dampfkraft ursprünglich als *Reserve* verwendete, bereits zu überwiegender Anwendung von Dampf gegenüber der Wasserkraft übergegangen ist. Sehen wir uns diese Fälle etwas näher an, so finden wir, dass es sich fast überall um Fälle handelt, bei denen sich das Wasserkraft-Minimum als ungünstiger erwies als anfänglich angenommen war, und bei denen sowohl die technischen als namentlich auch die rechtlichen Verhältnisse eine Abhilfe durch Wasseraccumulation teurer erscheinen liessen als eine solche durch Aufstellung von verhältnismässig grossen, aber nur während kurzer Zeit ausgenützten kalorischen Reserveanlagen. Solche finden sich fast ausnahmslos bei Werken mittelgrosser Leistung von einigen hundert bis höchstens 1500 *kw*, eine Erscheinung, die gleichzeitig beweist, dass die Werke dieser Grösse im allgemeinen zu einer ziemlich vollständigen Ausnützung ihrer Leistungsfähigkeit gelangt sind. Letzteres zeigt auch der Umstand, dass neun dieser mittelgrossen Werke neben der eigenen, primären Kraft von andern Werken in z. T. bedeutendem Umfange elektrische Energie zur Verteilung gemietet haben. Unter den mittlern Werken finden wir denn auch im allgemeinen diejenigen, die zufolge ihrer vollen Ausnützung ein finanziell günstiges Ergebnis aufweisen, während es den grössern z. T. an Absatz fehlt.

Von den 61 sekundären Werken bilden ungefähr die Hälfte Anlagen für elektrische Bahnen, die keine eigene Kraftstation besitzen sondern genötigt sind den Strom von andern Werken zu beziehen; die andere Hälfte betrifft dagegen den eigentlichen *Wiederverkauf elektrischer Energie*. Derselbe ist demnach heute bereits ziemlich häufig geworden; wir kommen darauf später zurück. (Forts. folgt.)

Neuere Methoden der Festigkeitslehre.

Von Ingenieur S. Rappaport in St. Gallen.

In meiner Abhandlung über Betoneisenkonstruktionen (Bd. XXXVIII, Nr. 18 der Schweiz. Bauzeitung) hatte ich ein Rechnungsverfahren eingeschlagen; das noch wenig bekannt ist. Von mehreren meiner Kollegen wurde ich diesbezüglich um Aufklärungen ersucht. Ich glaube daher auch einem weitem Kreise einen Dienst zu erweisen, wenn ich über jene Rechnungsmethode hier einiges mitteile.

Am einfachsten lässt sich dieselbe an Hand eines bestimmten Beispiels erläutern.

Es sei z. B. ein in Abb. 1 dargestellter Kran zu berechnen. Der Hauptbalken *AB* trage in der Mitte eine Last *P*. Bei *A* und *B* besitze der Kran starre Eckverbindungen und ferner seien die Pfosten *AC* und *BD* bei *C* bzw. *D* vollständig eingespannt.

Zu diesem Zwecke machen wir vorerst den Kran statisch bestimmt (Abb. 2), indem wir z. B. bei *A*, *B* und *D* Gelenke einschalten; oder um noch einen anderen Weg einzuschlagen schalten wir bei *C* ein Gelenk ein und bei *D* dagegen ein Gelenk und ein Rollenaufleger (Abb. 3). In

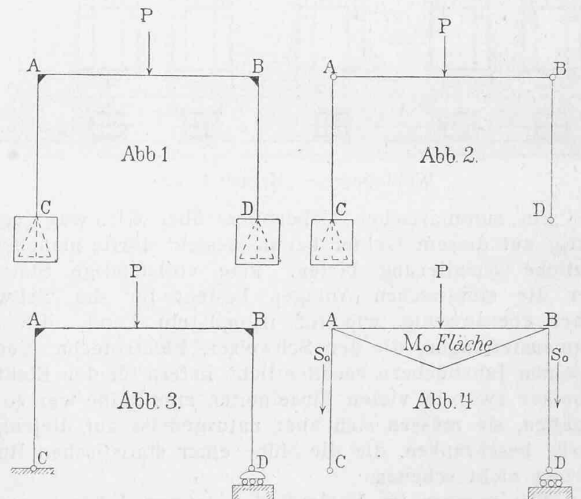
beiden Fällen wird damit der Kran statisch bestimmt. Die Spannungen würden sich alsdann nach den Regeln der Gleichgewichtsbedingungen finden lassen.

Für diesen Zustand (Abb. 3) ermitteln wir die Momentenflächen und Normalkräfte der einzelnen Stäbe. Die Momentenfläche über *AB* ist ein Dreieck von der Höhe $\frac{P \cdot l}{4}$ (Abb. 4). Diese Fläche nennen wir die *M₀-Fläche*, die Stäbe *AC* und *BD* haben nur Druckkräfte aufzunehmen und zwar je $\frac{P}{2}$; wir nennen diese Normalkräfte *S₀*.

Bei dieser Belastungsart hat der Balken *AB* das Bestreben sich durchzubiegen, wobei die Pfosten *AC* und *BD* sich schief stellen (\perp zur Richtung der Tangente der elastischen Linie in *A* und *B*). Der Punkt *C* bleibt am Platze, während der Punkt *D* sich aus seiner ursprünglichen Lage in horizontaler Richtung fortbewegt hat. (Vgl. Abb. 5.) An der Einnahme dieser Stellung wird der Kran bei *C* durch ein Spannungsmoment gehindert, das wir uns als eine Kraft *X₁*, die an einem Hebel von der Länge 1 wirkt und die entgegengesetzt der Uhrzeigerrichtung dreht, vorstellen können (Abb. 6).

Wäre diese Kraft *X₁* = 1, so ist das Drehmoment bezogen auf den Gelenkpunkt *C* = $1 \times 1 = 1$. Es wirkt infolgedessen im Stab *BD* eine abwärts gerichtete Kraft, die wir *S₁* nennen = $\frac{1}{b}$ (wobei *b* die Breite des Krans bedeutet), die jenem Drehmoment das Gleichgewicht hält.

Die Momentenfläche über *AC* ist ein Rechteck von konstanter Höhe = 1. Die Momentenfläche über *AB* ist ein Dreieck, bei *A* von der Höhe = 1 und bei *B* = 0. Diese Momentenflächen über *AC* und *AB* bezeichnen wir mit *M₁*.



Es hindert ferner den statisch bestimmten gedachten Kran Abb. 3 an der Einnahme der Stellung Abb. 5 bei *D* ein Spannungsmoment, das wir uns in analoger Weise als eine Kraft *X₂* vorstellen können, die an einem bei *D* starr verbundenen Hebel von der Länge 1 wirkt. Die Drehung dieser Kraft *X₂* folgt der Richtung des Uhrzeigers (Abb. 7).

Wäre diese Kraft *X₂* = 1, so ergibt sich in analoger Weise das Drehmoment bezogen auf den Punkt *D* = $1 \times 1 = 1$. Es muss daher im Stabe *AC* eine abwärts gerichtete Kraft *S₂* = $\frac{1}{b}$ angebracht werden, die dem Drehmoment das Gleichgewicht hält. Die Momentenfläche über *BD* wird ein Rechteck von der Höhe = 1, die Momentenfläche über *AB* ein Dreieck bei *B* von der Höhe = 1 und bei *A* = 0. Diese Momentenflächen bezeichnen wir mit *M₂*.

Ferner hindert den Kran an der Einnahme der Stellung Abb. 5 bei *D* noch eine Horizontalkraft *X₃*, die bewirkt, dass der Punkt *D* sich nicht verschieben kann.

Wäre diese Kraft *X₃* = 1, so erzeugte sie im statisch bestimmt gedachten Kran (Abb. 3) bei *C* eine Gegenkraft

= 1 (Abb. 8). Die Momentenflächen dieses Belastungsfalls sind dann über den Stäben AC und BD Dreiecke, bei A und B von der Höhe $(1 \times b) = b$, wobei b die Höhe des Krans bedeutet, und über AB ein Rechteck von der Höhe $(1 \times b) = b$. Diese Momentenflächen bezeichnen wir mit M_3 .

Im Stabe AB wirkt überdies dann eine Horizontalkraft $S_3 = 1$.

Die Aufgabe wäre nun gelöst, wenn wir die wirklichen Grössen der Kräfte $X_1 X_2 X_3$ ermitteln könnten, denn es setzen sich dann die spezifischen Spannungen σ an irgend einer Stelle aus den Einzelwirkungen der unbekanntenen Kräfte X zusammen:

$$\sigma = \sigma_0 + X_1 \sigma_1 + X_2 \sigma_2 + X_3 \sigma_3.$$

Hierbei bedeutet σ_0 diejenige Spannung an irgend einer Stelle des Stabes, die entsteht, wenn das System statisch bestimmt geworden ist (Abb. 3), somit sämtliche Kräfte $X = 0$ sind.

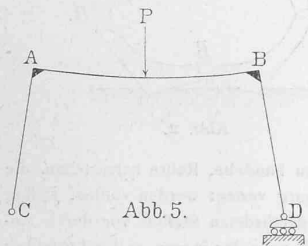


Abb. 5.

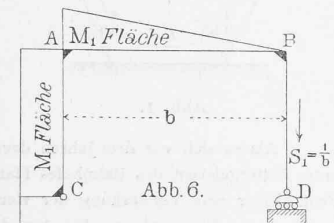


Abb. 6.

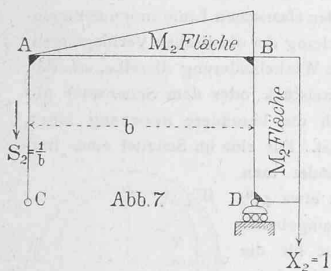


Abb. 7.

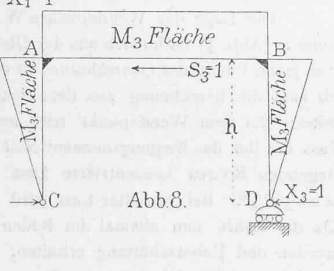


Abb. 8.

Analog bedeutet σ_1 diejenige Spannung, die entsteht, wenn nur die Kraft $X_1 = 1$ auf das statisch bestimmt gewordene System Abb. 3 wirkt. Desgleichen σ_2 , wenn nur die Kraft $X_2 = 1$ wirkt und schliesslich σ_3 , wenn nur die Kraft $X_3 = 1$ wirkt und alle anderen Kräfte P und $X_1, X_2 = 0$ sind.

Behufs Auffindung der unbekanntenen Kräfte $X_1 X_2 X_3$ verwenden wir die Arbeitsgleichung, sie lautet:

Die virtuelle Arbeit der äusseren Kräfte ist gleich der Formänderungsarbeit der inneren Kräfte.

Unter virtueller Arbeit der äusseren Kräfte verstehen wir die Produkte aus Kraft \times Weg, somit die äusseren Kräfte P, X_1, X_2, X_3 multipliziert mit den von ihnen zurückgelegten Strecken $d, d_{x1}, d_{x2}, d_{x3}$. — Hierbei wäre d die vertikale Durchbiegung unter der Kraft P ; d_{x1} bedeutet den Weg der Kraft X_1 . Dies wäre nur der Fall, wenn das Einspannungsmauerwerk bei C eine kleine, beobachtete Drehung vollbringen würde; dann ist der Wert d_{x1} auf die Längeneinheit des Drehradius (1) bezogen in die Rechnung einzuführen. Ist dagegen das Einspannungsmauerwerk unbeweglich geblieben, so ist $d_{x1} = 0$.

Analog verhält es sich mit d_{x2} ; ferner wäre d_{x3} die beobachtete Bewegung des Punktes D im horizontalen Sinne in der Richtung der Kraft X_3 . In der Regel ist aber bei unverschieblichen Fundamentskörpern $d_{x3} = 0$ zu setzen.

Unter der Formänderungsarbeit der inneren Kräfte verstehen wir die Arbeit jedes Volumenelementes des Stabes.

In jedem Volumenelemente des Stabes von der Länge s und vom Querschnitt AF herrscht eine Spannung σ und dieses Element verlängert oder verkürzt sich hierbei um die Länge Δs . Die Arbeit dieses Volumenelementes ist $= \sigma \Delta s$.

Die Arbeitsgleichung lautet dann:

$$Pd + X_1 d_{x1} + X_2 d_{x2} + X_3 d_{x3} = \sum \sigma \Delta s \quad (1)$$

Da obige Gleichung (1) allgemeine Form besitzt, so

gilt sie auch für den Fall, wo $X_1 X_2$ und $X_3 = 0$ sind; sie geht dann über in

$$Pd = \sum \sigma_0 \Delta s \quad (2)$$

[Es geht hierbei nur σ in σ_0 über. Unter σ_0 hatten wir, wie früher erläutert, diejenigen Spannungen zu verstehen, die entstehen, wenn der Kran statisch bestimmt geworden ist (Abb. 3) und die Unbekannten $X_1 X_2 X_3$ sämtlich $= 0$ sind.]

Hierbei sind aber die Grössen d und Δs in Gleichung (2) genau die nämlichen der Gleichung (1), die wir erhielten, als noch $X_1 X_2 X_3$ nicht 0 waren, sondern bestimmte, irgendwie ermittelte Grössen.

Mit der Aenderung der Kräfte P und X ändert die Gleichung (1) nur die σ , während die d und Δs , die aus irgend einem früheren Belastungsfall bekannt sind, in der Gleichung verbleiben. Hierin liegt ein Hauptvorteil der Methode.

Machen wir ferner in der Gleichung (1) nur die Kraft $X_1 = 1$, während P, X_2 und $X_3 = 0$ sind, so erhalten wir (Belastungsfall Abb. 6)

$$d_{x1} = \sum \sigma_1 \Delta s \quad (3)$$

σ_1 wären jetzt die inneren Spannungen, die entstehen, wenn auf den statisch bestimmt gedachten Kran (Abb. 3) nur die äussere Kraft $X_1 = 1$ wirkt.

Analog erhalten wir mit $X_2 = 1$ und P, X_1 und $X_3 = 0$ aus Gleichung (1)

$$d_{x2} = \sum \sigma_2 \Delta s \quad (4)$$

und schliesslich mit $X_3 = 1$ und P, X_1 und $X_2 = 0$

$$d_{x3} = \sum \sigma_3 \Delta s \quad (5)$$

Betrachten wir jetzt ein Volumenelement von der Länge s und vom Querschnitt AF , dessen innere Spannung σ ist, so verhält sich

$$\Delta s : s = \sigma : E$$

$$\Delta s = \frac{\sigma s}{E}$$

$$\text{und mit } \frac{s}{E} = \rho$$

$$\Delta s = \sigma \rho$$

Ersetzt man hierbei σ durch

$$\sigma = \sigma_0 + X_1 \sigma_1 + X_2 \sigma_2 + X_3 \sigma_3,$$

so wird

$$\Delta s = \rho (\sigma_0 + X_1 \sigma_1 + X_2 \sigma_2 + X_3 \sigma_3).$$

Führt man den Wert für Δs in die Gleichungen 3, 4 und 5 ein, so erhält man:

$$d_{x1} = \rho \sum \sigma_0 \sigma_1 + \rho X_1 \sum \sigma_1^2 + \rho X_2 \sum \sigma_2 \sigma_1 + \rho X_3 \sum \sigma_3 \sigma_1 \quad (6)$$

$$d_{x2} = \rho \sum \sigma_0 \sigma_2 + \rho X_1 \sum \sigma_1 \sigma_2 + \rho X_2 \sum \sigma_2^2 + \rho X_3 \sum \sigma_3 \sigma_2 \quad (7)$$

$$d_{x3} = \rho \sum \sigma_0 \sigma_3 + \rho X_1 \sum \sigma_1 \sigma_3 + \rho X_2 \sum \sigma_2 \sigma_3 + \rho X_3 \sum \sigma_3^2 \quad (8)$$

[Da wir ρ vor das \sum -Zeichen vorgenommen haben, so setzt das voraus, dass wir den Kran in lauter Volumenelemente von der gleichen Länge s und vom gleichen Querschnitt AF zerteilt, für jedes dieser Elemente $\sigma_0, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ bestimmt und die Produkte nach den Gleichungen 6, 7, 8 gebildet und summiert haben.]

Die Gleichungen 6, 7, 8 würden uns die fraglichen drei Unbekannten $X_1 X_2 X_3$ liefern, wenn wir auf einem einfachen Wege zu diesen Summenausdrücken gelangen könnten.

Um nun diese Summenausdrücke zu finden, betrachten wir ein Balkenstück, sei es des Hauptbalkens AB oder der Pfosten AC und BD von der Länge s und vom Querschnitt F , innerhalb dessen die Biegemomente und die Normalspannungen als konstant angesehen werden dürfen.

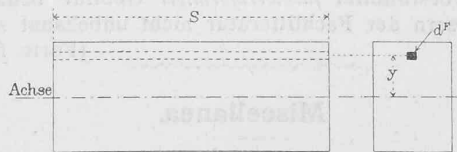


Abb. 9

Besitzt z. B. das herausgeschnittene Balkenstück s (Abb. 9) ein mittleres Moment M_0 , das entsteht wenn der Kran statisch bestimmt gemacht worden ist (Abb. 3) und die äussere Kraft P in der Mitte des Balkens wirkt, so er-

giebt sich für ein Prisma von der Länge s und vom Querschnitt $\Delta F (= 1 \text{ cm}^2)$ im Abstände y von der neutralen Achse die Spannung

$$\sigma_0 = \frac{M_0 y}{J}$$

wobei J das Trägheitsmoment des Querschnittes bedeutet.

Würde ferner auf den Kran Abb. 3 nur die äussere Kraft $X_1 = 1$ wirken und erzeugt diese im gleichen Balkenstück das mittlere Moment M_1 , so wird die Spannung σ_1 des gleichen Prismas

$$\sigma_1 = \frac{M_1 y}{J}$$

Somit ist

$$\sigma_0 \sigma_1 = \frac{M_0 M_1 y^2}{J^2}$$

Werden jetzt diese Produkte über den ganzen Querschnitt des Balkenstücks summiert, so ergibt sich

$$\Sigma \sigma_0 \sigma_1 = \frac{M_0 M_1}{J^2} \Sigma y^2 \Delta F,$$

da $M_0 M_1$ und J auf der Länge s konstant bleiben.

Nun ist aber $\Sigma y^2 \Delta F =$ dem Trägheitsmomente J , somit ist $\Sigma \sigma_0 \sigma_1 = \frac{M_0 M_1}{J}$ (ausgedehnt über das Balkenstück von der Länge s).

Hat das Balkenstück nebst Biegemomenten noch Normalkräfte aufzunehmen, so z. B. die Stäbe AC und BD je $\frac{P}{2} = S_0$ u. s. w., so berechnet sich für das gleiche Prisma von der Länge s

$$\begin{aligned} \sigma_0 &= \frac{S_0}{F} \\ \sigma_1 &= \frac{S_1}{F} \\ \sigma_0 \sigma_1 &= \frac{S_0 S_1}{F^2} \end{aligned}$$

Summiert man dies über den Querschnitt des Balkenstücks von der Fläche F , so erhält man

$$\Sigma \sigma_0 \sigma_1 = \frac{S_0 S_1}{F}$$

Besitzt der Stab die Länge l , so wird

$$\Sigma^l \sigma_0 \sigma_1 = \frac{l S_0 S_1}{s F}$$

und man kann dies Summenglied der Normalspannungen zu den aus den Biegungsspannungen resultierenden Summen hinzuzählen.

Haben dagegen die einzelnen Stäbe einer Konstruktion ausschliesslich nur Normalspannungen aufzunehmen (Fachwerk), so gehen die Gleichungen 6, 7, 8 über in:

$$d_{x_1} = \Sigma \frac{l}{FE} S_0 S_1 + X_1 \Sigma \frac{l}{FE} S_1^2 + X_2 \Sigma \frac{l}{FE} S_2 S_1 + X_3 \Sigma \frac{l}{FE} S_3 S_1 \dots \dots \dots (9)$$

$$d_{x_2} = \Sigma \frac{l}{FE} S_0 S_2 + X_1 \Sigma \frac{l}{FE} S_2 S_1 + X_2 \Sigma \frac{l}{FE} S_2^2 + X_3 \Sigma \frac{l}{FE} S_2 S_3 \dots \dots \dots (10)$$

$$d_{x_3} = \Sigma \frac{l}{FE} S_0 S_3 + X_1 \Sigma \frac{l}{FE} S_3 S_1 + X_2 \Sigma \frac{l}{FE} S_3 S_2 + X_3 \Sigma \frac{l}{FE} S_3^2 \dots \dots \dots (11)$$

In dieser Form werden die Gleichungen zur Berechnung statisch unbestimmter *fachwerkförmiger* Gebilde benutzt und dürften Lesern der Fachliteratur nicht unbekannt sein.

(Forts. folgt.)

Miscellanea.

Cementrohre mit verstärkter Wandung. *Bei Untersuchungen, die er im Verlauf der letzten zehn Jahre wiederholt anzustellen Gelegenheit hatte, hat Prof. Max Möller in Braunschweig Erfahrungen über die Bruchfestigkeit gewöhnlicher Cementröhren gesammelt. Er teilt in der Deutschen Bauzeitung einiges darüber mit, um daran anknüpfend über Versuche mit durch Eiseneinlagen verstärkte Rohre zu berichten.

Bei Belastung eines gewöhnlichen Cementrohres durch eine im Scheitel aufgebraute senkrechte Last Q entstehen an den Stellen W (Abb. 1) Momenten-Nullpunkte; es sind das Wendepunkte der elastischen Linie. Die in den Punkten W auftretende Vertikalkraft entspricht der Hälfte der Gesamlast Q . Das Scheitelstück $W_1 W_2$ wirkt als Balken; die Seitenstücke $W_1 W_3$ und $W_2 W_4$ bilden excentrisch beanspruchte Stützen. Die gezogene Faser liegt bei A und B an der innern, bei C und D an der äussern Laibung des Rohres. Dementsprechend erfolgen auch an diesen Stellen schliesslich die Rissebildungen und der Bruch (Abb. 2), wie sich das bei allen Versuchen gezeigt hat.

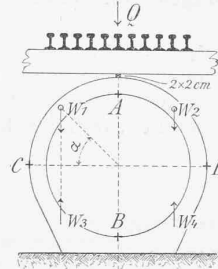


Abb. 1.

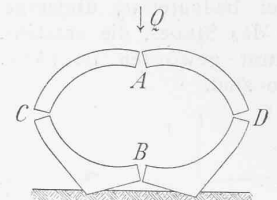


Abb. 2.

Als es sich vor drei Jahren darum handelte, Rohre herzustellen, die unter Gütergleisen des Bahnhofes Harburg verlegt werden sollten, schlug Prof. Möller eine Verstärkung der vier gefährdeten Stellen vor durch Anwendung von Eiseneinlagen, bei A und B nahe der innern und bei C und D nahe der äussern Laibung, wie die gestrichelte Linie in Abb. 3 andeutet.

Die Lage der Wendepunkte W der elastischen Linie in einer Bogenhöhe α (Abb. 3) findet sich aus der Gleichung der elastischen Verbiegungen. Für jeden Punkt des Querschnittes ist die Winkeländerung dieselbe, einerlei, ob man die Berechnung aus dem Scheitelstück oder dem Seitenstück ableitet. Bei dem Wendepunkt tritt noch die besondere Beziehung hinzu, dass für ihn das Biegemoment Null ist. Für eine im Scheitel eines freiliegenden Rohres konzentrierte Last findet man $\alpha = 50^{1/2}^\circ$. Bei verteilter Last wird α etwa 45° . Da die Rohre nun allemal im Boden eingebettet werden und Ueberschüttung erhalten, ist für die Ausführung der Wert $\alpha = 45^\circ$ massgebend gewesen. Für den günstigen Ausfall von Probelastungen mit konzentrierter Scheitellast wäre es zweckmässiger gewesen, die Scheitelstrecke kürzer zu halten, also α etwas grösser als 45° zu wählen. Das hätte aber dem Gebrauchsfall nicht entsprochen.

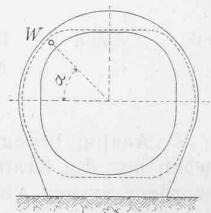


Abb. 3.

Das erste Rohr dieser seither der Firma Drenckhahn & Sudhop patentierten Konstruktion wurde auf dem Bahnhof in Harburg im März 1900 geprüft. Es hatte einen innern Durchmesser von 70 cm , 100 cm Baulänge, 103 mm Wandstärke an den verstärkten Stellen und 6 cm^2 Eiseneinlage. Das Rohr trug freiliegend eine in der Scheitellinie konzentriert aufgebraute Last von $Q = 12000 \text{ kg}$. Starke Risse waren eingetreten. Das Rohr befand sich nahe vor dem Zusammenbruche; jedoch fehlte weiteres Belastungsmaterial, um diesen ganz herbeizuführen.

In Erde eingebettet, 50 cm hoch überschüttet und über dem Scheitel unter Vermittelung eines in der Längsrichtung des Rohres auf den Boden gelegten Schwellenstückes von 1 m Länge belastet, trug das Rohr 15000 kg . Die innere Untersuchung nach dieser Belastung ergab einen ganz feinen inneren Scheitelriss. Ein Zusammenbruch wäre voraussichtlich erst bei mehr als 30000 kg Belastung erfolgt.

Um das Verhalten der Rohre weiter festzustellen, sind solche verschiedener Herkunft von 150 cm innerem Durchmesser in Braunschweig, ferner Rohre von 70 cm innerem Durchmesser mit und ohne Wandverstärkung und mit und ohne Eiseneinlagen einer Prüfung unterzogen worden. Die grösste Bruchlast wurde bei Rohren der Firma Holm und Molzen in Flensburg im April 1901 erreicht. Die dort hergestellten Rohre mussten besonders stark sein, da sie mit geringfügiger Ueberschüttung in schlechtem, häufig überschwemmtem Boden unter Eisenbahngeleisen Verwendung finden sollten. Bei 100 cm innerem Durchmesser, 75 cm Baulänge, 138 mm Wandstärke an den verstärkten Stellen und 7 cm^2 Eiseneinlage erreichten die Rohre eine Bruchlast von $Q = 14800 \text{ kg}$ bzw. 19700 kg Scheitellast auf 1 lfd. m .

Es ist noch hervorzuheben, dass bei der Einbettung eines Rohres im Boden ausser der Widerstandsfähigkeit gegen Biegung und Bruch auch eine Widerstandsfähigkeit durch Gewölbewirkung hinzukommt. Eingebettet und fest mit Boden umstampft trugen Rohre zwei- bis dreimal soviel als freiliegend, bei sehr guter Umstampfung ferner doppelt soviel, als bei mangelhafter.