

Experimentelle Methoden der Baustatik

Autor(en): **Ritter, M.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **95/96 (1930)**

Heft 18: **Zur Feier des 75jährigen Bestehens der Eidg. Technischen Hochschule**

PDF erstellt am: **26.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-44078>

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.

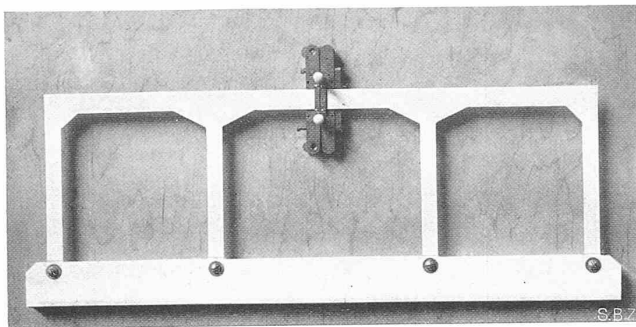


Abb. 2. Modell eines durchlaufenden Rahmens, theoretische Höhe 15 cm.

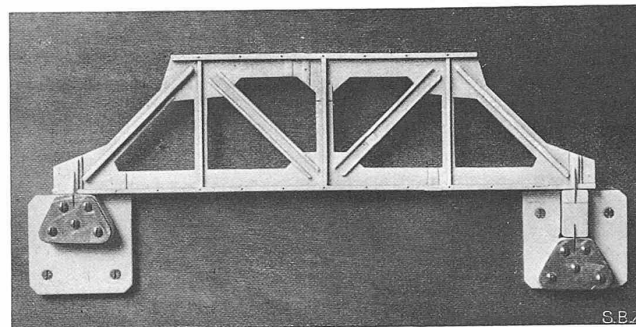


Abb. 3. Fachwerkträger, Stützweite 30 cm. — Alle Modelle sind aus Zelluloid.

Experimentelle Methoden der Baustatik.

Von Prof. Dr. M. RITTER, Zürich.

Unter den neuern Errungenschaften der Baustatik verdienen die sogenannten experimentellen Verfahren besondere Beachtung. Sie beruhen auf der direkten mechanischen oder optischen Messung statischer Grössen an Modellen und ersetzen die Theorie ganz oder zum Teil durch die Beobachtung. Die Modellmessung erscheint dazu berufen, zur Förderung der Baustatik entscheidend beizutragen, indem sie die Lösung zahlreicher statischer Probleme ermöglicht, die der theoretischen Behandlung nicht oder erst nach Einführung unsicherer Annahmen zugänglich sind. Auch für die praktische Anwendung werden die experimentellen Methoden von Nutzen sein, insbesondere zur Kontrolle analytischer Berechnungen, sowie bei der Auswertung der Schnittkräfte und Schnittmomente in hochgradig statisch unbestimmten Systemen.

An der E. T. H. sind seit einigen Jahren statische Untersuchungen mit Hilfe experimenteller Methoden im Gange, in der Absicht, neben wissenschaftlichen Ergebnissen auch Aufschluss zu erhalten über die Vor- und Nachteile der verschiedenen Verfahren und deren Eignung für die Praxis und den Unterricht. Im folgenden soll über die heute im „Institut für Baustatik“ an der E. T. H. vorhandenen Einrichtungen und über einige durchgeführte Arbeiten kurz berichtet werden, vorgängig einer ausführlicheren Darstellung einzelner wichtiger Versuche nach deren Abschluss.

1. BERECHNUNG VON STABWERKEN.

Die experimentelle Berechnung statisch unbestimmter ebener Stabwerke wurde durch Prof. G. Beggs von der Princeton University N. Y. eingeführt, der seine Methode in Zürich 1923 in einem Vortrag vor den Studierenden der E. T. H., sowie 1926 am ersten Internationalen Kongress für Brücken- und Hochbau dargelegt hat. Die „S. B. Z.“ hat schon frühzeitig und ausführlich über das Beggs'sche Verfahren berichtet¹⁾; es beruht auf dem bekannten Satze von Maxwell (1864) und den theoretischen Arbeiten von Robert Land (1890). Um eine statisch unbestimmte Grösse (Auflagerreaktion oder Schnittkraft bzw. Schnittmoment) zu finden, bildet man das Grundsystem, indem man die gesuchte Grösse ausschaltet; diese ergibt sich dann als Quotient zweier Formänderungen im Grundsystem, die Beggs am Modell direkt erzeugt. Der Satz von Maxwell gestattet, die Formänderungen auf die gleiche Ursache zurückzuführen und die Einflusslinien als Biegelinien darzustellen.

Man erkennt das Wesen des Verfahrens von Beggs am besten an einem einfachen Beispiel. Es handelt sich um den in Abb. 1 skizzierten vollwandigen Bogenträger ohne Gelenke. Um das Schnittmoment M an der Stelle 1 infolge der Einzellast P an der Stelle 2 zu erhalten, wird im Schnitt 1 ein Gelenk eingeschaltet und das Moment M , das vorher dort gewirkt hat, als angreifendes Kräftepaar angebracht. Als Grundsystem dient also der Eingelenkbogen,

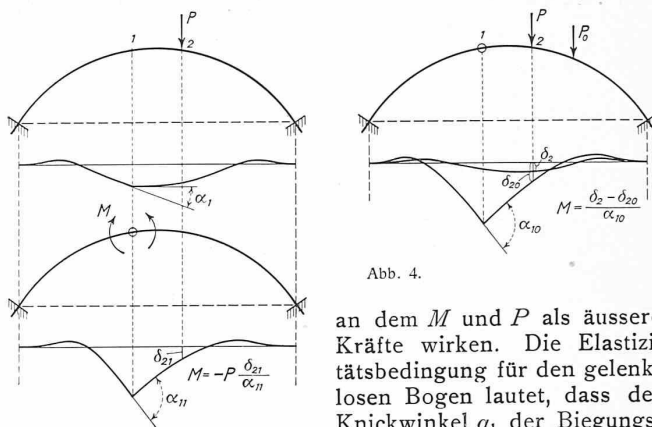


Abb. 1.

Abb. 4.

an dem M und P als äussere Kräfte wirken. Die Elastizitätsbedingung für den gelenklosen Bogen lautet, dass der Knickwinkel α_1 der Biegelinie des Grundsystems infolge M und P verschwindet.

Nach dem Gesetze der Superposition ist dieser Winkel eine lineare Funktion von M und P ; in der üblichen Bezeichnungsweise ergibt sich

$$\alpha_1 = M \alpha_{11} + P \alpha_{12} = 0,$$

wobei α_{11} den Winkel infolge $M=1$ und α_{12} den Winkel infolge $P=1$ am Grundsystem bezeichnen. Da nach Maxwell $1 \cdot \alpha_{12}$ identisch ist mit der Einsenkung δ_{21} des Punktes 2 infolge $M=1$, so folgt aus obiger Gleichung

$$M = -P \frac{\alpha_{12}}{\alpha_{11}} = -P \frac{\delta_{21}}{\alpha_{11}}$$

Man findet somit das Schnittmoment M , indem man das Grundsystem durch $M=1$ deformiert. Indessen kann man an Stelle von $M=1$ auch ein beliebiges, unbekanntes Moment zur Deformation benutzen, da hierfür der Quotient der Formänderungen der gleiche bleibt, weil sich Zähler und Nenner proportional ändern. Die Anwendung des Verfahrens zur Ermittlung von Normalkräften, Querkraften und Auflagerreaktionen gestaltet sich sinngemäss.

Zur experimentellen Ausübung der Methode von Beggs dient die von ihm selbst in den Handel gebrachte Apparatur, in der Hauptsache bestehend aus einer Serie von Messmikroskopen zur direkten Messung der Einsenkungen, sowie der sogenannten Formänderungserzeuger, über deren Konstruktion die erwähnte Abhandlung von K. Hofacker nähere Auskunft gibt. Für die Modelle eignet sich das von Beggs empfohlene Celluloid ausgezeichnet, da es unterhalb einer ziemlich hochliegenden Proportionalitätsgrenze ein rein elastisches Verhalten mit konstantem Elastizitätsmodul ($E = \text{rd. } 25000 \text{ kg/cm}^2$) aufweist. Im „Institut für Baustatik“ der E. T. H. steht die Apparatur von Beggs und eine Modellsammlung für Demonstrationen und den Unterricht zur Verfügung (vergl. Abb. 2 und 3).

Die bisher durchgeführten Versuche lassen erkennen, dass die Genauigkeit der Ergebnisse mit den Beggs'schen Instrumenten höheren Ansprüchen nicht immer genügt; die Fehlerquelle liegt dabei wohl ausschliesslich in der Konstruktion des Formänderungserzeugers, die noch verbessert werden kann. Am internationalen Kongress in Lüttich 1930 hat Prof. Magnel (Gand) einen von ihm konstruierten, nach

¹⁾ K. Hofacker: „Mechano-statische Untersuchungen hochgradig statisch unbestimmter Tragsysteme“, in Bd. 87, S. 153 ff. (20. März 1926).

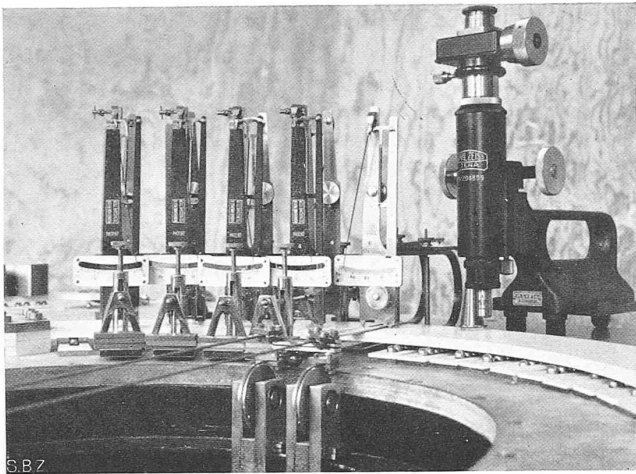


Abb. 5. Ausmessung eines Gewölbemodells mit Tensometern Huggenberger.

der Beggs'schen Methode arbeitenden „Mikroinfluenzmesser“ vorgeführt, dessen Formänderungserzeuger von der Beggs'schen Konstruktion wesentlich abweicht und einen erhöhten Genauigkeitsgrad verbürgt.

Die experimentelle Berechnung von Schnittmomenten lässt sich auch ohne Formänderungserzeuger durchführen, vermittelt der von Dipl. Ing. A. Wahed in unserm Institut für Baustatik vor kurzem ausgearbeiteten „Gelenkmethode“, die als weiterer Fortschritt zu bewerten ist.²⁾ Bei diesem Verfahren wird das Grundsystem nicht durch ein Moment deformiert, sondern durch eine Einzellast P_0 von beliebiger Grösse und Lage; das Schnittmoment berechnet sich aus dem Unterschied zwischen der Einsenkung des Grundsystems und des wirklichen Systems. Abb. 4 zeigt die Anwendung der Gelenkmethode zur Ermittlung der Einflusslinie für das Scheitelmoment eines eingespannten Bogensträgers. Die Einflussordinate für die Last $P = 1$ in Punkt 2 folgt, wie sich beweisen lässt, aus der Beziehung

$$M = \frac{\delta_2 - \delta_{20}}{\alpha_{10}},$$

wo δ_2 und δ_{20} die Einsenkung des Punktes 2 infolge der Belastung P_0 vor und nach Einschaltung des Scheitelenkes bezeichnen. Der Winkel α_{10} am Gelenk lässt sich leicht am Modell direkt messen, ohne dass ein Formänderungserzeuger benötigt wird. Das Gelenk wird als Federelenk eingebaut; das Verfahren kann übrigens noch dahin erweitert werden, dass an Stelle des Gelenkes nur eine Schwächung des Querschnittes in Form einer Kerbe tritt.

Die E. T. H. besitzt zur experimentellen Untersuchung von Tragwerken, die aus geraden Stäben mit konstantem Trägheitsmoment bestehen, noch das bekannte Gerät von Rieckhof (Darmstadt), das in Band 87 (Seiten 191 u. ff.) der „S. B. Z.“ von K. Hofacker ebenfalls ausführlich beschrieben ist. Obgleich Genauigkeit und Anwendbarkeit naturgemäss beschränkt sind, sollen doch die grossen didaktischen Vorzüge dieses Gerätes anerkannt werden, insbesondere auch die vorzüglich geschriebene Anleitung von Rieckhof, die dem Gerät beiliegt.

2. UNTERSUCHUNG EBENER SPANNUNGSZUSTÄNDE.

Die seit Jahrzehnten zur Untersuchung ausgeführter Bauwerke in Gebrauch stehenden Dehnungsmesser lassen sich ebenfalls auf Modelle anwenden und ermöglichen die zuverlässige experimentelle Ermittlung ebener Spannungszustände im Gültigkeitsbereiche des Hooke'schen Gesetzes. Auch hierfür erscheint das Celluloid als Modellstoff besonders geeignet, weil sein niedriger Elastizitätsmodul dazu beiträgt, die Genauigkeit der Messungen zu erhöhen. Bei den neuerdings von Dr. Ing. U. A. Huggenberger in Zürich in den Handel gebrachten „Tensometern Typ D“³⁾ ent-

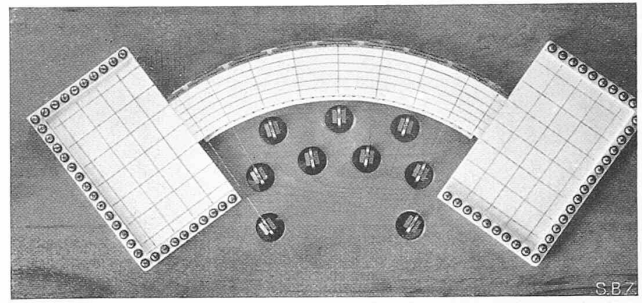


Abb. 6. Horizontalscheibe eines Talsperrengewölbes, theoret. Spannweite 52 cm.

spricht bei 2 cm Messlänge und 1200facher Uebersetzung ein Teilstrich der Ableseskala einer Spannung von etwa 1 kg/cm² im Celluloidmodell, und durch Anordnung von 40 Teilstrichen ist ein genügender Messbereich geschaffen.

Bei den Versuchen in der E. T. H. werden die Modelle wagrecht auf kleinen Stahlkugeln gelagert, und die Belastung durch an Drähten hängende Gewichte wird mittels Umlenkrollen (mit Kugellagern) in die Modellebene geführt. Die Tensometer werden durch Bügel, deren Halter neben dem Modell direkt an der Unterlage befestigt sind, an das Celluloid-Modell angedrückt. Es ist auch möglich, die Dehnung mit Messmikroskopen direkt zu messen, was zur Kontrolle der Tensometer oft geschieht; in der Anwendung hat sich indessen die optische Messung als bedeutend umständlicher erwiesen, als die Messung mit Tensometer. Abb. 5 zeigt die Einrichtung zur Untersuchung eines vollwandigen Bogenträgers mit Hilfe von acht Tensometern von Huggenberger und einem Messmikroskop von Zeiss zur Messung der Durchbiegungen. Der Versuch erfordert grösste Sorgfalt in der „ebenen“ Lagerung des Modelles und peinlich genaue Führung der Lasten, da sonst räumliche Deformationen oder gar Kipperscheinungen auftreten.

Die Methode der direkten Dehnungsmessung eignet sich zur Untersuchung statisch unbestimmter ebener Stabwerke vielleicht besser, als das Verfahren von Beggs, da sie den grossen praktischen Vorteil bietet, dass die Modelle zur Messung nicht zerschnitten werden müssen. Dafür muss bei der Dehnungsmessung der Elastizitätsmodul bestimmt werden, was ohne Schwierigkeit an einem Kontrollstreifen oder am Modell selbst erfolgt; manche Probleme erfordern auch die Ermittlung der sogenannten Poissonzahl. Bei zahlreichen Aufgaben genügt indessen die Messung der Dehnungen als Verhältniszahlen und die Kombination mit der Gleichgewichtsbedingung liefert die Elastizitätskonstanten durch einfache Rechnung. Hervorragend eignet sich die Dehnungsmessung zur Untersuchung ebener Spannungszustände, die von dem Navier'schen Zustande abweichen und oft der mathematischen Analyse nicht zugänglich sind. Ein solches Problem von erheblicher praktischer Bedeutung bietet das Talsperrengewölbe. Die übliche statische Berechnung nach der technischen Elastizitätstheorie der gelenklosen Gewölbe besitzt den Charakter einer Näherungslösung, deren Genauigkeit umso geringer ausfällt, je stärker das Gewölbe im Verhältnis zur Spannweite ist. Abb. 6 stellt das Modell eines solchen Talsperrengewölbes dar, das auf die geschilderte Weise mit Dehnungsmessern ausgemessen wurde; mit Hilfe radial gestellter Umlenkrollen und Anwendung von Wagebalken wurde die gleichmässig verteilte Belastung auf der Wasserseite, dem Wasserdruck entsprechend, erreicht. Die Messung ergab einen Spannungszustand, der von den Ergebnissen der üblichen Gewölbeletheorie wesentlich abweicht.

Zur experimentellen Untersuchung allgemeiner, ebener Spannungszustände steht noch die sogen. photo-elastische Methode zur Verfügung, die die Zerlegung eines polarisierten Lichtstrahls beim Durchgang durch eine unter Spannung stehende Glasplatte verwertet.⁴⁾ Dank der Initiative von Prof. Dr. A. Rohn besitzt die E. T. H. seit 1926

²⁾ A. Wahed: „Die Gelenkmethode“, Dissertation Zürich 1930.

³⁾ Siehe „S. B. Z.“, Bd. 95, Seite 33 (18. Januar 1930).

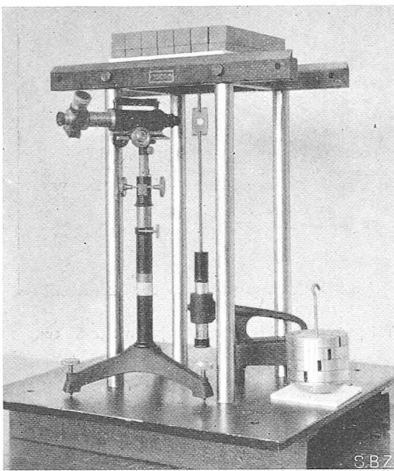


Abb. 7. Gestell für Plattenmodelle; I. Höhe 55 cm.

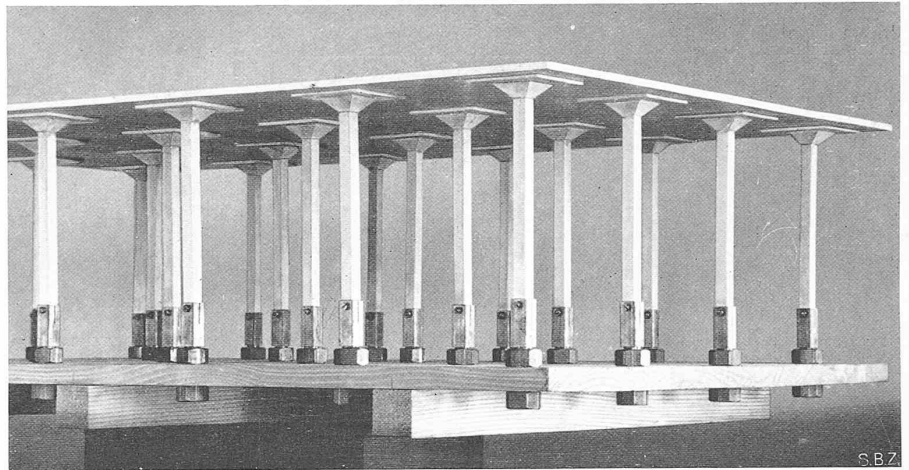


Abb. 8. Modell einer Pilzdecke, lichte Höhe zwischen Boden und Decke 24 cm.

im physikalischen Institut ein „photo-elastisches“ Laboratorium, das bereits wertvolle Arbeiten durchgeführt hat. Im Vergleich zu den mechanischen Verfahren bietet allerdings die Ausübung der rein optischen Methode erhebliche praktische Schwierigkeiten und kommt für die meisten Ingenieure kaum in Frage.

3. RÄUMLICHE BIEGUNG EBENER PLATTEN.

Infolge der grossen Bedeutung der ebenen Platte als Konstruktionselement im Eisenbetonbau reiht sich heute die klassische Theorie der elastischen Platten, die vor Zeiten vorzugsweise die Mathematiker interessierte, ins Gebiet der angewandten Baustatik. Die experimentelle Untersuchung von Platten, die auf räumliche Biegung beansprucht sind, gestaltet sich sehr einfach. Für die meisten Zwecke genügt die genaue Ausmessung der elastischen Fläche, die einer gegebenen Belastung entspricht; indessen können auch Dehnungsmessungen an der Untersicht der Platte erfolgen. Die Abb. 7 zeigt die im Institut für Baustatik der E. T. H. vorhandene Einrichtung zur Untersuchung rechteckiger Platten, die allseitig frei aufliegen oder eingespannt sind. Auf einem kräftigen, verschiebbaren Gestell ruht die Celluloidplatte und wird direkt durch Metallwürfel belastet; die Ablesung der Einsenkung erfolgt an der Marke eines federnden Stiftes mittels eines Mikroskopes mit wagrechter Axe (sogen. Pflanzenmikroskop System Winkel-Zeiss).

Die beschriebene Einrichtung wurde zunächst zur Ausmessung einer quadratischen, auf allen Seiten frei aufliegenden Platte konstanter Stärke benützt. Die Gestalt der elastischen Fläche ergab sich in Uebereinstimmung mit der theoretischen Lösung, die Navier bereits im Jahre 1821 mit Hilfe zweidimensionaler Fourier'scher Reihen angegeben hat, jedoch konnte das nach der Theorie zu erwartende Abheben der Ecken nicht beobachtet werden. Bei der Anwendung der Plattentheorie auf den Eisenbeton ist sehr zu beachten, dass sich die Eisenbetonplatten in statischer Hinsicht günstiger verhalten, als homogene Platten, weil in den Plattenteilen, die das Stadium der Rissebildung erreichen, die Biegungsteifigkeit stark abnimmt, wodurch eine Reduktion der maximalen Momente entsteht. Der Versuch mit einer Platte, deren Trägheitsmoment an den Rändern grösser war als in der Mitte, zeigte diese Reduktion konform der analytischen Berechnung, die mit Hilfe der Differenzenrechnung durchführbar ist. In Abb. 8 ist noch das kürzlich ausgeführte Modell einer Pilzdecke mit 15 Feldern dargestellt, an dem eine Reihe schwieriger statischer Fragen experimentell geklärt werden soll, wie z. B. der Einfluss der Steifigkeit der Säulenkapitäl, die Anordnung der ungünstigsten Laststellung und anderes mehr.

⁴⁾ Beschrieben von Dr. Ing. H. Favre in „S. B. Z.“, Band 90, S. 291 ff. (Dez. 1927).

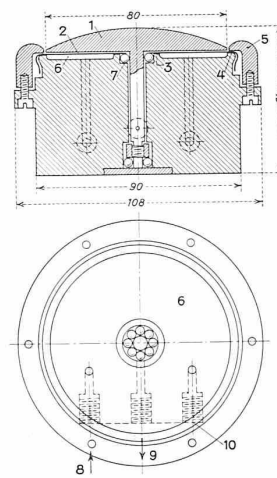
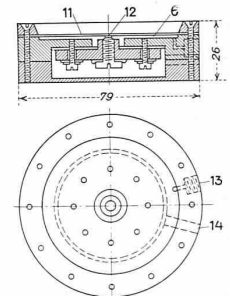


Abb. 10. „Dose 1925“.



1:3. Abb. 11. „Dose 1929“.

1 Deckel, 2 Gummimembran, 3 Dichtung bei belastetem Deckel, 4 Ständige Dichtung, 5 Dichtungsring, 6 Druckluftraum, 7 Kugellager, 8/9 Druckluft-Zufuhr und -Auslass, 10 Geschlossen, 11 Stahlmembran, 12 Elektr. Kontakt, 13 Druckluftführchen, Stromzuführung, 14 Stromrückleitungskabel.

4. ERDDRUCK-VERSUCHE.

Im Jahre 1923 wurde von den Professoren C. Andreae und Dr. A. Rohn im Hauptgebäude der E. T. H. ein „Laboratorium für Erdbaumechanik“ eingerichtet, in der Absicht, auf dem Versuchswege praktisch wichtige Probleme aus dem Gebiete des Erddruckes zu lösen. Hauptaufgabe sollte sein, die Belastung von Stollen- und Tunnelmauerwerk durch sandförmige Ueberlagerung zu bestimmen und die zur Zeit für die Praxis massgebenden, aber wenig befriedigenden Rechnerverfahren, die im Sinne der klassischen Erddrucktheorie lediglich Grenzzustände des Gleichgewichtes liefern, empirisch zu prüfen und zu verbessern. In der Folge stellten sich der Lösung dieser Aufgabe grosse Hindernisse entgegen; besondere Schwierigkeiten bot die Schaffung geeigneter Messapparate, um den Druck im Innern des Erdkörpers oder an tiefliegenden Grenzflächen zuverlässig zu bestimmen. Es erwies sich ferner als zweckmässig, vor Inangriffnahme der Hauptaufgabe zunächst eine Reihe einfacher Sonderfragen zu behandeln und verschiedene grundlegende Gesichtspunkte abzuklären. In den Promotionsarbeiten von H. Hugi und E. Gerber sind die Ergebnisse solcher vorbereitender, an sich schon heikler und zeitraubender Untersuchungen niedergelegt.⁵⁾ „Die endgültige Lösung der Hauptaufgabe“, schrieb Hugi im Vorwort seiner wertvollen Abhandlung, „benötigt überaus reiches Versuchsmaterial, das nur in jahrelanger systematischer Arbeit herbeigeschafft werden kann“. Zur Zeit ist das Laboratorium der Leitung des Verfassers unterstellt; dank der Subventionierung durch die „Eidg. Stiftung zur Förderung schwei-

⁵⁾ „Untersuchungen über die Druckverteilung im örtlich belasteten Sand“, I. Heft von Dr. Hans Hugi 1927, II. Heft von Dr. Emil Gerber 1929.

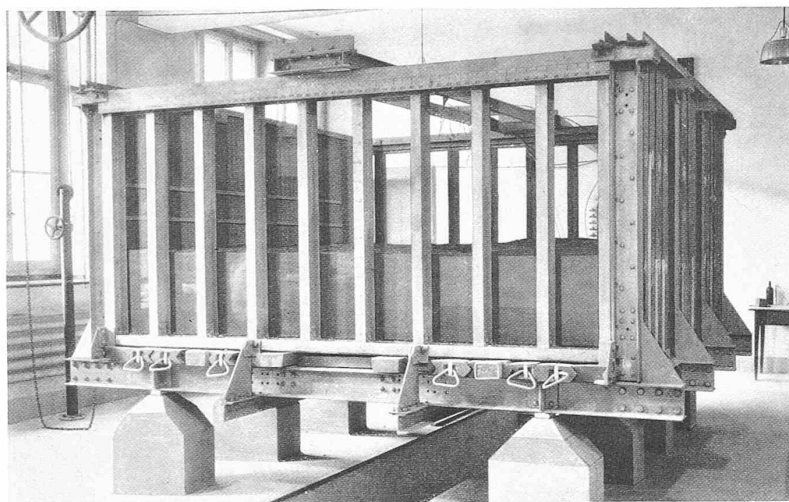


Abb. 9. Sandbehälter für Erddruckversuche, Grundfläche rund 3 x 3 m.

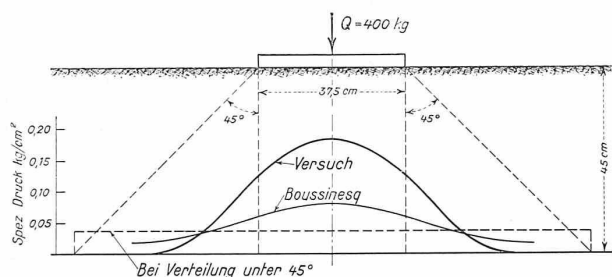


Abb. 14.

zerischer Volkswirtschaft durch wissenschaftliche Forschung“ war es möglich, die Messeinrichtungen neuerdings zu vervollkommen und ein systematisches Versuchsprogramm in Angriff zu nehmen, das als Endziel die Lösung der oben genannten Hauptaufgabe im Sinne der Initianten enthält.

Das Laboratorium für Erdbaumechanik enthält als Hauptobjekt einen kräftig konstruierten, allseitig zugänglichen Behälter (Modellkasten) von etwa 13 m³ Rauminhalt (vergl. Abb. 9). Hugi und Gerber benützten zu ihren Versuchen das in Abb. 10 als „Dose 1925“ skizzierte Messinstrument, das folgendermassen arbeitet. Aus einem Druckluftakkumulator wird durch ein Rohr Druckluft unter den Dosenendeckel gepresst. Sobald die dadurch auf den Dosenendeckel von innen wirkende Kraft grösser wird, als die Belastung des Deckels durch den Erddruck, beginnt der Deckel sich abzuheben und die Druckluft entweicht unter der Gummimembran in ein Abflussrohr, das in einem mit Wasser gefüllten Gefäss endet, wo der Abfluss durch die Blasenbildung beobachtet werden kann; durch Messung des Luftdruckes bei Beginn oder im Beharrungszustand der Blasenbildung ergibt sich also direkt die spezifische Erddrucks (Normalspannung) über dem Deckel. Schon Hugi hatte auf die Nachteile dieser Messmethode aufmerksam gemacht und besonders darauf hingewiesen, dass durch die Bewegung des Dosenendeckels eine gewisse Störung des Spannungszustandes im Erdkörper eintritt. Obgleich es später gelang, die Hebung des Deckels bei der Messung auf 0,06 bis 0,10 mm zu beschränken, erwies sich das Instrument doch nur als brauchbar, um den Einfluss äusserer Lasten zu verfolgen, nicht aber zur Registrierung des Spannungszustandes in einem Erdkörper infolge des Eigengewichtes der Erdmasse selbst. Im Jahre 1929 wurden deshalb neue Messdosen angeschafft, die bedeutend genauer arbeiten (vergl. Abb. 11 „Dose 1929“). Der Dosenendeckel ist ersetzt durch eine Stahlmembran, die in der Dosenaxe mit einer Schraube in Kontakt steht. Durch Membran und Schraube wird ein elektrischer Strom sehr geringer Spannung geführt, der unterbrochen wird, sobald die eingeführte

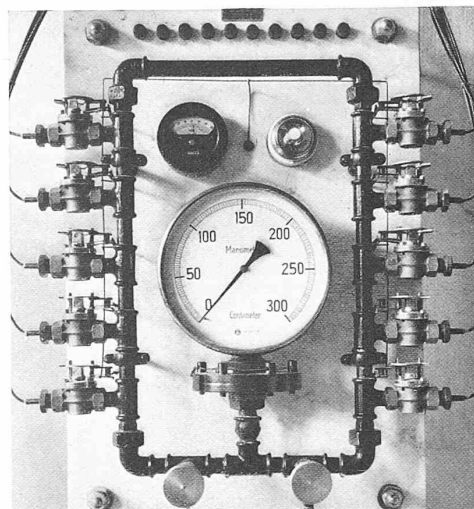


Abb. 12. Schalttafel für Erddruckversuche.

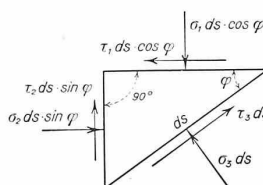


Abb. 13.

Druckluft die Belastung der Membran erreicht und die Membran sich nach aussen zu deformieren beginnt. Zur Zeit verfügt das Laboratorium über zehn solcher Messdosen; die Installation ist an einer Schalttafel konzentriert, an der der Stromunterbruch beobachtet und kurz darauf der

Luftstrom geschlossen werden kann (vergl. Abb. 12).

Die beschriebene Messvorrichtung gestattet, zwei-dimensionale sowie axensymmetrische Spannungszustände im Innern eines Erdkörpers eindeutig zu finden. Direkt gemessen werden allerdings nur die Normalpressungen; die Schubspannungen erhält man rechnerisch aus den Gleichgewichtsbedingungen, sobald die Normalspannungen für drei Richtungen bekannt sind. An dem in Abb. 13 dargestellten unendlich kleinen Erdprisma lassen sich leicht die Gleichgewichtsbedingungen ableiten:

$$\tau_1 = \tau_2 = \frac{\sigma_1 \cos^2 \varphi + \sigma_2 \sin^2 \varphi - \sigma_3}{\sin 2 \varphi},$$

$$\tau_3 = \frac{\sigma_1 \cos^2 \varphi - \sigma_2 \sin^2 \varphi - \sigma_3 \cos 2 \varphi}{\sin 2 \varphi}$$

Praktisch bietet es keine Schwierigkeit, an einem kleinen Holzteil drei Messinstrumente anzubringen; man wählt zweckmässigerweise $\varphi = 45^\circ$ und findet nach Messung von $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ die Schubspannungen aus den Formeln

$$\tau_1 = \tau_2 = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} - \sigma_3, \quad \tau_3 = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}.$$

Zur Zeit sind im Laboratorium die Versuche im Gange, die darüber Aufschluss geben sollen, unter welchen Bedingungen und in welcher Frist sich in einem Erdkörper der untere Grenzzustand des Gleichgewichtes, der sogen. Rankine'sche Spannungszustand, einzustellen vermag.

Unter den von Hugi und Gerber durchgeführten Versuchen interessieren besonders die Messungen der Druckverteilung in horizontalen Ebenen, sowie die Beziehungen zwischen der Belastung und der Einsenkung einer belasteten starren Platte, die auf einem Erdkörper aufruhet. In Abb. 14 ist nach Versuchen von Hugi das Druckverteilungsdiagramm in einer Tiefe von 45 cm (Normalpressungen in der wagrechten Ebene) infolge einer mit 400 kg belasteten kreisförmigen Platte (Durchmesser 37,5 cm) dargestellt und verglichen mit der Theorie von Boussinesq (Elastizitätstheorie) und der in der Praxis üblichen Annahme (Verteilung unter 45°), die sich als zu günstig erwies. Es ist beabsichtigt, diese und andere Versuche mit den neuen Messinstrumenten zu wiederholen und darüber ausführlich zu berichten.