

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung

Band: 79 (1961)

Heft: 20

Artikel: Modelle als Hilfsmittel für die Bemessung von Bauwerken

Autor: Gunten, Hans von

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-65522>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 13.10.2024

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

Modelle als Hilfsmittel für die Bemessung von Bauwerken

Von Dr. sc. techn. Hans von Gunten, Bern¹⁾

DK 624.04.001.57

Meine Ausführungen über die Bedeutung der Modelle als Hilfsmittel der Bemessung wenden sich, entsprechend dem Wunsche der Fachgruppe, in erster Linie an die konstruierenden Ingenieure der Praxis. Ihnen möchte ich zeigen, welche Ergebnisse wir mit den in der Schweiz üblichen Messmethoden erwarten können, und ich werde versuchen, möglichst klar die Grenzen der Anwendungsmöglichkeiten eines Modellversuches herauszuarbeiten, Grenzen sowohl in rein technischer, wie auch in finanzieller Hinsicht.

Nur ganz am Rande sollen einige Messvorgänge näher erläutert werden mit dem Zweck, auf die Genauigkeit der Versuche hinzuweisen. Wenn hier viele, sehr leistungsfähige Methoden, wie zum Beispiel die spannungsoptische, nicht erwähnt werden, so nur deshalb, weil diese Fragen nicht in unsere heutige Problemstellung gehören. Auf theoretische Ableitungen muss ich ebenfalls verzichten, obschon sie für die Praxis der Modellversuche von grösster Bedeutung sind, denn diese theoretischen Ueberlegungen und Ableitungen würden den Rahmen sprengen und deshalb belastend wirken.

Zuerst sollen die experimentellen Methoden an den ihnen zukommenden Platz eingereiht, gewissermassen legitimiert werden. Dies ist durch eine Gegenüberstellung der verschiedenen Berechnungsmethoden am ehesten möglich.

Der Bauingenieur verfügt heute zur Bestimmung des Kräftespiels in einem Tragwerk über zwei grosse Klassen von Untersuchungsmethoden: Einerseits die analytischen und numerischen Berechnungsverfahren, andererseits die Modellmessungen.

Die analytische Lösung eines Problems hat den Vorzug, eine allgemeine Tragweite aufzuweisen, und sie bildet zudem ein ausgezeichnetes Kriterium zur Beurteilung der verschiedensten Näherungslösungen. Dort, wo die strenge, rein mathematisch-analytische Methode zu keinem expliziten Ergebnis führt, oder dieses nur mit sehr zeitraubenden Operationen zu erzielen ist, sind die numerischen Methoden oft mit Vorteil anzuwenden.

Im Gegensatz dazu sind die experimentellen Verfahren an den untersuchten Sonderfall gebunden, und nur selten gelingt es, die so gefundenen Ergebnisse zu verallgemeinern. Sie sind jedoch in der Lage, dort eine Lösung zu liefern, wo alle andern Verfahren wegen der Komplexität der Problemstellung versagen. Andererseits bilden die experimentellen Methoden eine höchst willkommene Vervollständigung der Berechnungsverfahren, indem sie eine gegenseitige wertvolle Kontrolle ermöglichen, wie dies zum Beispiel bei Bogenstaumauern der Fall ist.

Es wäre durchaus verfehlt, zwischen den Berechnungsverfahren und der Modellmessung einen Gegensatz zu sehen oder gar zu schaffen, denn beide haben das gleiche Endziel: Eine möglichst genaue Erfassung des Kräftespiels als Grundlage einer einwandfreien Bemessung. Beide Methoden haben ihre ausgezeichneten Vorzüge und zusammen gestatten sie einen sehr vollständigen Ueberblick über das untersuchte Tragwerk. Es ist — und damit spreche ich mit den Worten von Professor Lardy, der die Modellmessung an seinem Institut an der ETH sehr gefördert hat — es ist die Pflicht des Ingenieurs, die Möglichkeiten und Grenzen der zur Verfügung stehenden Untersuchungsmethoden zu kennen und in jedem Fall die geeignetste, beziehungsweise die beste Kombination zu wählen.

*

¹⁾ Vortrag, gehalten an der Fachtagung der FGBH über neuere Methoden der Baustatik am 11. Nov. 1960.

Die Entwicklung der experimentellen Methoden in den letzten Jahren weist eine bemerkenswerte Intensität und Vielfalt auf. Die Modellmessung ist, im besonderen für die Anwendung im Massivbau, nicht mehr wegzudenken, weshalb wir diesen Zweig des Bauingenieurwesens im Auge behalten wollen, ohne dass sich dabei aber das Grundsätzliche für andere Bauweisen ändern würde.

Wenn wir die Frage nach den Gründen dieser Entwicklung stellen, so können wir sie — falls sich heute schon ein solcher Ueberblick geben lässt — etwa wie folgt beantworten:

Auf der einen Seite bringen es die vielfältigen und reichen Möglichkeiten der Formgestaltung im Massivbau immer mehr mit sich, dass der Ingenieur das Kräftespiel in Tragwerken zu bestimmen hat, die ganz besondere und besonders schwierige Berechnungsprobleme darstellen. Die Eignung des Stahlbetons zur Verwirklichung solcher verschiedenartigster Bauformen und die Frage nach dem Kräftespiel, das mit den wirklichen Verhältnissen möglichst gut übereinstimmen muss, führte notgedrungen zu einer breiten Entwicklung der Modellmessung auf dem Gebiete des Massivbaus.

Ein weiterer Grund ist darin zu suchen, dass das zentrale Bemessungsproblem im heutigen Massivbau das *Zusammenhangsproblem* ist, bei dem das Zusammenwirken verschiedener Elemente möglichst gut erfasst werden muss. Als Beispiele möchte ich dazu erwähnen: Den Zusammenhang zwischen Staumauer und Baugrund, den Zusammenhang zwischen Platte und Stützen oder Platte und Randgliedern bei Pilzdecken, von Platte und Balkenrost bei Fahrbahnplatten von Brücken usw. Die Erfassung dieses Zusammenhangs mittels mathematisch-analytischer Verfahren ist heute, mit wenigen Ausnahmen, noch nicht oder noch nicht befriedigend gelöst. Weil aber diese Zusammenhangsprobleme eine spezifische Sorge des Massivbaues sind, so ist, da die Modellversuche auf diese Fragen doch weitgehend eine genügende Antwort geben, darin ein weiterer Grund für die bedeutsame Entwicklung der Modellmesstechnik für die Belange des Massivbaus zu suchen, und gerade diese Tatsache bildet gewissermassen die Grundlage für die zukünftige Bedeutung der Modellmessungen. Am Fall der Zusammenhangsprobleme wird aber auch sehr deutlich klar — und dies soll keineswegs verschwiegen werden — dass die gewonnenen Ergebnisse sehr stark an den Einzelfall gebunden sind und nur in den seltensten Fällen eine Verallgemeinerung zulassen.

Die experimentellen Methoden haben sich auch deshalb stark entwickelt, weil die klassischen Berechnungsmethoden der Elastizitätstheorie an strenge und einschränkende Voraussetzungen gebunden sind, die allerdings für den Gebrauchszustand meistens vollauf genügen. Sobald jedoch die Frage nach dem Verhalten eines Bauwerks bei anderen Zuständen auftaucht, zum Beispiel im plastischen Zustand, oder im Zustand grosser Formänderungen, oder im Unbrauchbarkeitszustand oder Bruchzustand, dann versagt die klassische Theorie, weil die auftretenden Differentialgleichungen nicht mehr linear bleiben. Beim Modell bietet es jedoch, besonders dann, wenn man solche Zustände bewusst beobachten will, unter Umständen keine besonderen Schwierigkeiten, solche nichtlinearen und nichtelastischen Zustände zu verwirklichen. Auch darin liegt ein besonderer Vorteil der Modellmessung, der gerade im Hinblick auf die Anwendungen im Massivbau wertvoll ist.

*

Was die überaus grosse Anzahl von Modellmessmethoden anbetrifft, kann ich an dieser Stelle nur auf die beiden grundsätzlichen Arten verweisen.

Als *Modellversuche im engeren Sinn* bezeichnen wir solche, bei denen das wirkliche Tragwerk in einem kleineren Masstab und in einem geeigneten Material nachgebildet wird. An diesem Modell werden auf irgend eine Weise der Verformungszustand und die Schnittkräfte bestimmt (wie, werde ich später zeigen) und mittels der Umrechnungsgesetze wird dann auf die Beanspruchungen des wirklichen Tragwerks geschlossen.

Die zweite Art der Modellversuche will ich als *Analogieversuche* bezeichnen. Sie nützen die Uebereinstimmung der Differentialgleichungen zweier physikalischer Probleme aus. So kann eine Aufgabe der Elastizitätstheorie mit ganz anderen Mitteln gelöst werden. Man spricht dabei von Gleichnissen, wobei das Seifenhautgleichnis von Prantl zur Bestimmung der Schubspannungen infolge Torsion das bekannteste sein dürfte.

Obschon die Analogieversuche zu sehr schönen und eleganten Lösungen geführt haben, wollen wir sie hier verlassen, da ihre Anwendung auf Sonderfälle beschränkt bleibt, während wir uns den Hauptanwendungen zuwenden wollen.

*

Bei der Untersuchung von Modellen sind es hauptsächlich drei Grössen, deren Messung uns interessiert, nämlich die Dehnungen, die Durchbiegungen und die Krümmungen, da mit Hilfe dieser drei Grössen auf die Verformungen und das Kräftespiel des Modells und von diesen dann auf die entsprechenden Werte des wirklichen Tragwerks geschlossen werden kann. So möchte ich denn der Reihe nach auf die erwähnten Grössen eintreten und zeigen, was man, falls sie bekannt sind, aus ihnen folgern kann.

Ich beginne mit den *Dehnungen*, da ihre Messung heute, wenigstens in der Schweiz, zweifellos die grösste Rolle spielt, weil wir mit ihnen bei allen Flächentragwerken auf die Schnittkräfte schliessen können. Wie wir im einzelnen Fall die Dehnungen messen, braucht uns hier nicht weiter zu kümmern, denn diese Ausführungen sind ja nicht der Modellmesstechnik, sondern ihrer Bedeutung für den konstruierenden Ingenieur gewidmet. Immerhin scheint mir die Frage nach der Genauigkeit der Messungen doch ziemlich wichtig zu sein, so dass ich kurz darauf eintreten möchte. Von all den Möglichkeiten der Dehnungsmessung, sei es mit mechanischen, mit optischen und induktiven Gebern oder mit Dehnungsmesstreifen, scheint mir die letztgenannte für die Belange der Modellmessung die wichtigste und zweifellos genaueste zu sein. Diese Methode der Dehnungsmesstreifen oder Strain-Gages verwendet zur Dehnungsmessung die Widerstandsänderung von Metalldrähten bei der Dehnung. Sehr dünne Widerstandsdrähte werden auf Papierfolien geklebt, die Enden dieser Drähte werden mit dickeren Anschlussdrähten versehen und das so gewonnene Messelement, der Dehnungsmesstreifen, kann auf jede Stelle angebracht werden, an der man Dehnungen messen will.

Unsere Messapparate sind im allgemeinen so eingerichtet, dass wir Dehnungen von der Grössenordnung von 1×10^{-6} ablesen können. Da ein normaler Dehnungsmesstreifen rd. 1 cm lang ist, können wir Längenänderungen von der Grösse eines Millionstelzentimeters feststellen (75 mal kleiner als die Wellenlänge des roten Lichtes). Skeptiker werden mir entgegen, dass der Apparat wohl eine solche kleine Dehnung abzulesen gestatte, dass ihr aber keine reale Bedeutung zukomme. Was dies anbetrifft, kann ich Ihnen erklären, dass bei einem sorgfältig durchgeführten Modellversuch die mittleren Fehler am arithmetischen Mittel — denn man wird jede Stelle mindestens zweimal ausmessen — unter 4×10^{-6} liegen, wenn wir diese in Dehnungsmass ausdrücken. Dies wurde unzählige Male bestätigt, wenn Dehnungen an der gleichen Stelle unter der gleichen Belastung an verschiedenen Tagen gemessen wurden und wenn Kontrollmessungen, zum Beispiel an Symmetriepunkten, durchgeführt wurden. Da bei den normalen Modellversuchen die Dehnungswerte zwischen 200 und 800×10^{-6} liegen, macht

ein solcher mittlerer Fehler, prozentual ausgedrückt, nur 2 bis 0,5 % aus, was ohne weiteres in Kauf genommen werden kann.

Welche Dehnungen können eigentlich mit den Dehnungsmesstreifen gemessen werden? Im Handel sind Strain-Gages erhältlich, die an einem Punkt das Messen von Dehnungen in einer, in zwei oder drei genau definierten Richtungen erlauben. Strain-Gages mit einer Messrichtung, auch normale Gages genannt, werden dann verwendet, wenn wir zum vorneherein wissen, dass der Spannungszustand an dieser Stelle linear ist, zum Beispiel an freien Plattenrändern. Solche mit zwei Richtungen benutzen wir dann, wenn wir die Hauptspannungsrichtungen kennen, zum Beispiel auf Symmetrieebenen von Flächentragwerken, oder wenn uns die Spannungen nur in zwei bestimmten, senkrecht aufeinanderstehenden Richtungen interessieren. Falls wir die Grösse und Richtung der Hauptspannungen kennen möchten, verwenden wir Dehnungsmesstreifen mit drei Richtungen, vornehmlich solche, bei denen die Widerstandsdrähte einen Winkel von 60° einschliessen.

Zusammenfassend können wir also feststellen, dass wir an unseren Modellen an einer beliebigen Stelle der Oberfläche den (nehmen wir den allgemeinsten Fall für Flächentragwerke) ebenen Dehnungszustand bestimmen können, insbesondere Grösse und Richtung der Hauptdehnungen. Hier beginnt nun die eigentliche Umrechnung, aber auch die Schwierigkeit, und zwar diese einzig wegen des Umstandes, dass Modell und Tragwerk ungleiche Querdehnungszahlen aufweisen. Die Umrechnung wird in diesem Fall nämlich nicht eindeutig, sondern je nach dem Aehnlichkeitsgesetz, das wir der Umrechnung zu grunde legen, ergeben sich zwei Werte, die im allgemeinen aber sehr nahe beieinander liegen. Diese Umrechnungswege möchte ich rasch skizzieren, natürlich mit jedem Verzicht auf Formeln. Ausgangspunkt sind die Hauptdehnungen am Modell und ihre Richtungen. Wir können mit ihnen mit Hilfe des Gesetzes von Hooke sofort auf die Grösse und Richtung der Hauptspannungen am Modell schliessen. Der nächste Schritt ist der, dass wir ein Aehnlichkeitsgesetz zwischen den Spannungen am Modell und Tragwerk voraussetzen und damit auf den Spannungszustand am Tragwerk schliessen. Der zweite Weg schliesst mit Hilfe eines Aehnlichkeitsgesetzes von den Hauptdehnungen am Modell zunächst auf die Grösse der Hauptdehnungen am Tragwerk und von diesem dann mit Hilfe des Gesetzes von Hooke auf die Hauptspannungen am Tragwerk. Die Hauptspannungen am Tragwerk, berechnet nach den beiden skizzierten Wegen, ergeben nicht gleichviel, weshalb ich vorhin die Zweideutigkeit erwähnt habe. Für viele Punkte eines Flächentragwerks, insbesondere für Randpunkte und solche, die weit weg vom Rande liegen, kann man zeigen, dass der eine der beiden Umrechnungswege genaue Resultate liefert, so dass die Zweideutigkeit auf relativ wenige Zonen beschränkt ist, also nicht so schlimm ist, wie vielleicht im ersten Moment erwartet werden könnte.

Zusammenfassend wollen wir festhalten, dass wir mit Dehnungsmessungen in der Lage sind, bei einem beliebigen Flächentragwerk den Spannungszustand am wirklichen Bauwerk zu bestimmen. Von hier ist nur noch ein kleiner Schritt bis zu den Grössen, die den konstruierenden Ingenieur interessieren. Nehmen wir den allgemeinen Fall, so können wir, wenn die Spannungen auf der Ober- und Unterseite des Tragwerks bekannt sind, diese aufteilen in einen Anteil, der aus einer Normalkraft stammt und in einen, der durch ein Moment hervorgerufen wird. Aus diesen Grössen lassen sich dann auf ganz elementare Weise diese Normalkräfte und Momente bestimmen. Falls eine reine Momentenbeanspruchung vorhanden ist, wie bei Platten, verschwindet der Anteil der Normalkraft, wir können aus den Spannungen am Tragwerk direkt auf die Momente schliessen, wobei zu bemerken ist, dass in einem solchen Fall lediglich eine Seite des Modells mit Gages versehen werden muss.

Natürlich ist es auf ähnliche Weise auch ohne weiteres möglich, Drillungsmomente zu bestimmen. Auch Einflussflächen für die Schnittkräfte können so ermittelt werden, was aber einen erheblichen Zeitaufwand erfordert.

Halten wir hier fest, dass wir mit der Methode der Dehnungsmessung praktisch alle für die Bemessung eines Flächentragwerks erforderlichen Grössen bestimmen können, und dies mit einem hohen Genauigkeitsgrad. Ich möchte deshalb die Methode der Dehnungsmessung als die umfassendste bezeichnen.

Eine andere Methodengruppe beruht auf der *Messung von Krümmungen* an verschiedenen Modellpunkten. Diese Verfahren nützen die sehr einfachen Beziehungen zwischen den Krümmungen und Momenten aus, sind aber nur dann anwendbar, wenn ausser den Momenten keine anderen Schnittkräfte vorhanden sind. Es sind also lediglich die Platten, die für solche Untersuchungsmethoden geeignet sind, da es kaum in Frage kommen dürfte, Stabtragwerke mit Hilfe von Modellversuchen auszumessen. Die Methode der Krümmungsmessung wurde lange Zeit sehr stark angezweifelt, und zwar wegen der Genauigkeit, doch sind heute sehr einfache und billige Geräte erhältlich, die solche Zweifel nicht mehr rechtfertigen. Auch Einflussflächen können mit diesen Geräten sehr einfach ermittelt werden, und zudem sind die Kosten solcher Untersuchungen kleiner als diejenigen mit Dehnungsmesstreifen. Der Nachteil der Methode besteht, wie bereits erwähnt, darin, dass sie versagt, wenn Normalkräfte auftreten können.

Gewissermassen als Ergänzung der oben erwähnten Methoden kann es vorkommen, dass wir für unsere Untersuchungen *Durchbiegungsmessungen* anstellen müssen. Auch hierfür stehen uns sehr genau arbeitende Apparate zur Verfügung; die genauesten beruhen auf der Grundlage der induktiven Geber. Es sind hauptsächlich zwei Gründe, die uns zur Durchbiegungsmessung zwingen. Erstens kann die Durchbiegung eines Tragwerks als solche interessieren, zum Beispiel dann, wenn dem Bauingenieur aus betrieblichen Gründen bei einem Industriebau maximale Durchbiegungen vorgeschrieben sind. Ferner wären die Stauauerversuche zu erwähnen, bei denen stets auch eine Kenntnis der Durchbiegungen verlangt wird. Wir können die Durchbiegungsmessung aber auch aus einem ganz anderen Grund anstellen. Interessiert uns nämlich die Eigenfrequenz eines Bauwerks, so können wir versuchen, diese am Modell zu messen. Zu diesem Zweck verbinden wir unser Durchbiegungsmessgerät mit einem Schreiber, der uns die Durchbiegung in einem beliebigen Masstab aufzeichnet und es uns erlaubt, wenn das Papier, auf dem der Schreiber seine Aufzeichnungen macht, mit einer bestimmten, genau bekannten Geschwindigkeit läuft, auch die Schwingungszahl des Modells pro Sekunde zu bestimmen. Wir haben heute Apparate zur Verfügung, mit denen wir Frequenzen bis zu 150 Hertz messen können. Dann ist es ein leichtes, von der Modellfrequenz auf die Frequenz am Tragwerk zu schliessen, und da die Umrechnungsfaktoren meistens sehr klein sind, vielleicht zwischen 1/20 und 1/40 liegen, spielt es keine allzugrosse Rolle, wenn die Frequenz, die am Modell bestimmt wurde, mit kleinen Fehlern behaftet ist. Am Institut für Baustatik und Massivbau an der ETH wurden solche Versuche durchgeführt. An Idealmodellen, eingespannten Stäben und Rechteckplatten, bei denen die Eigenfrequenz rechnerisch ermittelt werden konnte, wurde diese gemessen und mit den gerechneten Werten verglichen, und es konnte festgestellt werden, dass die Resultate ausserordentlich gut miteinander übereinstimmen.

Querkräfte können anhand von Modellen nicht, oder nur mit grössten Schwierigkeiten bestimmt werden. Sie spielen glücklicherweise bei den Flächentragwerken eine untergeordnete Rolle, da die aus ihnen folgenden Schubspannungen meistens in tragbaren Grenzen liegen.

An dieser Stelle scheint es mir wichtig, darauf hinzuweisen, dass uns von der Seite der reinen Messtechnik zur Bestimmung der Schnittkräfte keine Grenzen gesetzt sind. Diesen werden wir erst an anderer Stelle begegnen.

*

Wir wollen uns jetzt den *Modellbaustoffen* zuwenden und zunächst nach den Qualitäten fragen, die sie unbedingt aufweisen müssen. Eine der Hauptanforderungen ist die, dass sie gut bearbeitbar sein sollen. Es versteht sich fast von selbst, dass sie homogen und isotrop sein müssen. Ferner sollte der

Elastizitätsmodul nicht zu gross sein, denn sonst müssen, um vernünftige Deformationen zu erreichen, vernünftig was ihre Grösse anbetrifft, die Modellbelastungen zu gross gewählt werden. Als oberste Grenze für den E-Modul möchte ich rd. 100 000 kg/cm² angeben. Der Elastizitätsmodul muss im Rahmen der Modellbeanspruchungen konstant sein, das heisst, in diesem Bereich muss das Hooksche Gesetz erfüllt sein. Was die Querdehnungszahl anbetrifft, sollte diese möglichst mit derjenigen des Betons, wenn wir wiederum den Massivbau betonen, also mit 1/6 übereinstimmen, was aber im allgemeinen nicht zu erfüllen ist, da fast alle Modellbaustoffe viel höhere Querdehnungszahlen besitzen. Schliesslich muss die Festigkeit des Modellmaterials in genügend weitem Abstand von den tatsächlichen Spannungen infolge der Belastungen liegen, ansonst eine Messung der Spannungen infolge der vorher eintretenden Rissebildungen unmöglich würde.

Ein Modellbaustoff, der die aufgezählten Anforderungen in optimaler Weise befriedigt, ist Plexiglas. Dieses ist im Handel in Form planparalleler Platten erhältlich, so dass uns hier bereits eine erste Grenze gesetzt ist, indem wir nur Tragwerke nachbilden können, die aus Elementen konstanter Stärke zusammengesetzt sind, was in der Praxis allerdings sehr häufig der Fall ist. Wenn wir gekrümmte, abwickelbare Elemente mit konstanter Dicke herstellen müssen, so können wir Plexiglas in einem speziellen Ofen krümmen, vorausgesetzt, dass die Radien nicht allzuklein sind. Dieses Verfahren setzt jedoch eine Holzlehre voraus, was in vielen Fällen den Versuch dermassen verteuert, dass uns hier eine weitere, diesmal finanzielle Grenze gesetzt ist. Nicht-abwickelbare Flächen können wir in Plexiglas nicht nachbilden. Obschon uns diese beiden erwähnten Schranken gesetzt sind, nimmt Plexiglas unter allen Modellbaustoffen dennoch den ersten Platz ein, da sehr oft Platten mit konstanter Dicke zu untersuchen sind, bei denen meiner Ansicht nach Plexiglas der angenehmste Baustoff ist. Ich möchte Ihnen noch die beiden für die Modellversuche wichtigsten Daten angeben: Der Elastizitätsmodul beträgt rd. 33 000 kg/cm² und die Querdehnungszahl 0,37; sie ist also leider relativ hoch.

Falls wir beliebig geformte Flächentragwerke mit variabler Dicke im Modell nachzubilden haben, müssen wir zu anderen Materialien greifen. Wir wünschen in diesem Fall einen Baustoff, der in beliebige Formen gegossen werden kann und im übrigen die gleichen Eigenschaften wie oben geschildert aufweisen soll. Es sind eine ganze Reihe von Kunststoffen bekannt, die sich zu diesem Zwecke eignen. Es würde zu weit führen, sie alle aufzuzählen, so dass ich mich mit einem einzigen Hinweis begnügen möchte. Mit einem Gemisch von Araldit und Quarzmehl, das beigemischt wurde, um die Querdehnungszahl herabzusetzen und die Kosten in einem vernünftigen Rahmen zu halten, habe ich bei einem Stauauerversuch ausgezeichnete Erfahrungen gemacht. Sein Elastizitätsmodul betrug 95 000 kg/cm² und seine Querdehnungszahl 0,32. Seine Bearbeitung wurde allerdings durch die Beigabe des Quarzmehls etwas problematisch, dafür aber konnte eine ausgezeichnete Homogenität erreicht werden und es trat überhaupt kein Schwinden auf, so dass die vorgeschriebene Form äusserst genau erreicht werden konnte.

Sie ersehen aus diesen Hinweisen, dass uns in rein technischer Hinsicht beim Herstellen solcher Kunststoffmodelle praktisch keine Grenzen gesetzt sind. Hingegen sind die Kosten für die Herstellung der Schalung und das Giessen des Modells entsprechend sehr hoch, so dass sich solche Versuche nur dann verantworten lassen, wenn ein sehr bedeutendes Objekt untersucht werden muss, dessen gesamte Kosten derart hoch sind, dass selbst ein teurer Modellversuch noch nicht ins Gewicht fällt. Solche Bauwerke sind in erster Linie die Bogenstauauern.

Wenn wir hier nun Rückschau halten, so sehen wir, dass sich ernste, unter Umständen unüberwindbare Grenzen zeigen und zwar hauptsächlich solche finanzieller Natur. Wenn wir vor die Frage gestellt sind, ob ein Modellversuch durchgeführt werden soll oder nicht, tun wir demzufolge gut daran uns vorerst zu überlegen, ob mit einfachen Mitteln, das heisst ohne Giessvorgang, ein Modell hergestellt werden

kann und wenn nicht, wie teuer das Giessen des Modells wird, denn dies ist meines Erachtens die hauptsächlichste Klippe.

*

Wir wollen uns nun den *Belastungen* zuwenden.

Als erste Gruppe möchte ich bezeichnen: Eigengewicht, Schneelasten, Verkehrslasten in Form von gleichmässig verteilten Belastungen und Einzelkräften, Windkräfte — falls ihre Grösse überhaupt bekannt ist — und bei Staumauern der Wasserdruck. Wir werden diese Belastungen auch dann, wenn sie gleichmässig verteilt sind, im allgemeinen durch Einzelkräfte ersetzen, wobei wir bei verteilten Lasten entsprechende Verteilvorrichtungen anordnen müssen. Handelt es sich um vertikale Kräfte, so ist die einfachste Möglichkeit das Anhängen von Gewichten, eine Methode, die wir mittels Umlenkrollen auch für anders gerichtete Kräfte verwenden können. Bei sehr grossen Einzelkräften und insbesondere bei der Nachbildung des Wasserdruckes bei Staumauern kommen auch hydraulische Pressen zur Anwendung.

Als zweite Gruppe will ich die Vorspannkräfte bezeichnen und gleich vorweg nehmen, dass dieser Belastungsfall nachgebildet werden kann, allerdings meistens mit sehr zeitraubenden Installationen und entsprechender Kostenerhöhung. Wir arbeiten in diesem Fall mit den Umlenkkräften und den notwendigen Randkräften. Der einfachste Fall ist derjenige mit geraden Kabeln. Dort handelt es sich lediglich darum, bei den Ankerköpfen in Richtung der Kabelaxe eine Druckkraft anzubringen oder, was modelltechnisch besser zu realisieren ist, eine Zugkraft in entgegengesetzter Richtung wirken zu lassen und dann allen gemessenen Dehnungen das Vorzeichen umzukehren. Sind nun die Kabel gekrümmt, so müssen wir neben diesen Randkräften noch Umlenkkräfte einführen, was mittels einer Reihe von Einzellasten geschehen kann.

Es muss allerdings hier erwähnt werden, dass diese Methode eine sehr genaue Arbeit erfordert und auch sehr zeitraubend ist.

Als dritte Gruppe möchte ich die restlichen Eigenspannungszustände erwähnen, wie zum Beispiel Temperatureinflüsse und Schwinden, und gleich hinzufügen, dass wir mit den üblichen Messmethoden nicht in der Lage sind, diese Eigenspannungszustände zu untersuchen. Hier liegt also wiederum eine Grenze, die wir nicht überschreiten können.

*

Um die bisherigen Ausführungen zu dokumentieren, sollen an dieser Stelle die Bilder 1 bis 8 folgen, die vom *Modellversuch der Staumauer Sufers* stammen (aus Platzgründen kann hier nur eine kleine Auswahl der gezeigten Lichtbilder wiedergegeben werden).

Für diese Untersuchungen musste das Modell gegossen werden, und zwar wurde Araldit verwendet. Bild 1 zeigt die sehr genau gearbeitete Schalung. Die beiden Hälften, die hier

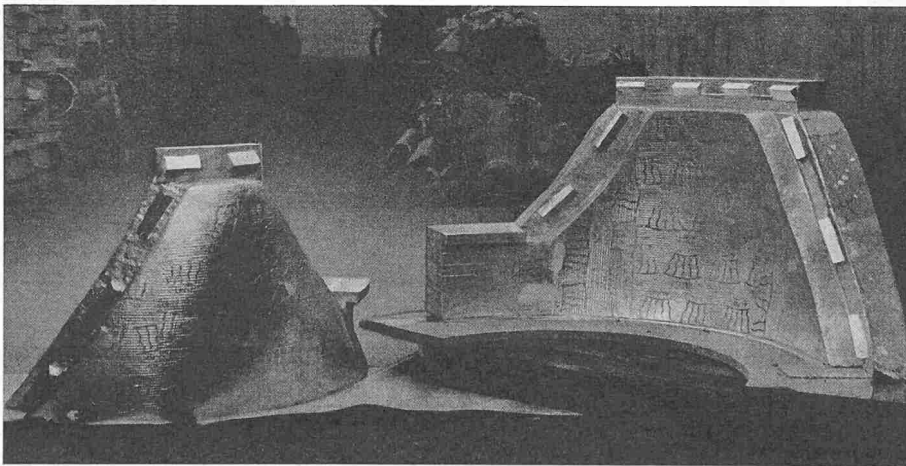


Bild 1. Schalung für das Modell der Staumauer Sufers, das bei Oederlin & Cie. in Baden gegossen wurde

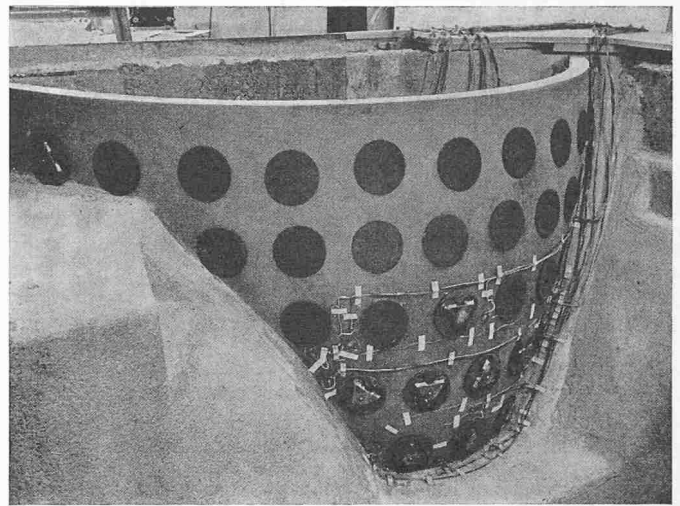


Bild 2. Das einbetonierte Modell

auf dem Kopf stehen, sind mit einer dünnen Aluminiumfolie überzogen, da sonst das Araldit an der Form kleben würde. Die Formhälften bestehen aus aufeinandergeleimten Novopanplatten, die, um die Abtreppungen auszugleichen, mit einer Aralditmasse ausgestrichen wurden. Die Verzahnungen, die längs den Widerlagern zu sehen sind, wurden angeordnet, um einen einwandfreien Verbund zwischen Modell und umgebendem Beton zu gewährleisten. Da angenommen werden konnte, dass Staumauer und umgebender Fels gleiche Elastizitätsmoduli aufweisen würden, wurde der Fels in der Umgebung der Einspannstellen ebenfalls in Araldit ausgebildet.

Bild 2 zeigt das bereits einbetonierte Modell. Da im vorliegenden Falle eine Belastungsflüssigkeit mit einem spezifischen Gewicht von 35 kg/dm^3 notwendig gewesen wäre, um genügend grosse Dehnungen zu erhalten, war man gezwungen, diese durch das Aufbringen einer grossen Zahl von Einzellasten (hydraulischen Pressen) zu ersetzen. Diese Pressen wurden in fünf Horizontalreihen angeordnet und zwar so, dass jede ihren Angriffspunkt im Schwerpunkt des zugehörigen Belastungsprismas besass. Um die Wirkung der Belastungskonzentration zu mildern, wurde zwischen jeder Presse und der Modellwand eine Verteilungsplatte, die sich auf eine Gummimembran stützt, eingebaut. Diese Membranen waren in der Wandberührungsfläche profiliert, was in den Berührungsflächen das Auftreten von Tangentialspannungen verhindert, da der auf diese Weise profilierte Gummi keine Querdehnung in tangentialer Richtung erhält. Ebenfalls sind auf diesem Bild bereits einige Rosetten sichtbar.

Bild 3 zeigt das fertig verdrahtete Modell mit den angeschlossenen Pressen. Das Modell war im Normalfall mit $12,6 \text{ t}$ belastet, aber auch die $1\frac{1}{2}$ -fachen Lasten wurden angebracht. Der Oeldruck betrug im Normalfall 110 atü .

Die Bilder 4 und 5 zeigen die Hauptspannungen und ihre Richtungen, die Bilder 6 und 7 die Ringspannungen. Es wäre zu diesem Versuch noch beizufügen, dass die Ergebnisse des Versuches im allgemeinen gut mit der Rechnung übereinstimmten. Einzig in der Scheitelpartie des Kronenbogens trat in Ringrichtung eine ernstzunehmende Diskrepanz auf, und zwar zeigte der Modellversuch eine grössere Zugresultierende als die Rechnung. Allein dieser Unterschied machte den Versuch zur sehr wertvollen Ergänzung der Rechnung. Bild 8 zeigt in axonometrischer Darstellung die horizontale, senkrecht auf die Bogen gemessene Verschiebung, bei Annahme eines Elastizitätsmoduls der wirklichen Mauer von $200\,000 \text{ kg/cm}^2$.

Bevor ich auf die Frage eintreten will, wann ein Modellversuch rentiert und wann nicht, scheint es mir wichtig, einige wenn auch sehr allgemein und unverbindlich gehaltene Angaben über die *Kosten einiger typischer Modellversuche* zu machen, die natürlich sehr stark abhängig sind von den vom Auftraggeber gewünschten Daten und von den angewandten Messmethoden.

Nehmen wir als erstes eine Pilzdecke. Falls der Auftraggeber lediglich eine Untersuchung über das Kräftespiel infolge Eigengewicht und Nutzlast wünscht und zudem keine spezielle Neubestimmung der Einflussflächen und Einflusszonen will, dürfte ein solcher Versuch rd. $4 \div 5000$ Franken kosten, wobei sich diese Kosten etwa wie folgt aufteilen: 1000 Fr. für das Modell (Plexiglas ist ziemlich teuer), 1000 Fr. für die Gages, 500 Fr. für die restliche Installation, 2000 Fr. für Arbeitslöhne und 500 Fr. für Büromiete und Berichte. Kommen noch Bestimmungen von C-Werten und unter Umständen von Einflussflächen hinzu, so dürfte sich der Preis um rd. 3000 Fr. erhöhen, weil solche Ermittlungen sehr arbeitsintensiv sind.

Ein grossangelegter Staumauerversuch dürfte rund $30 \div 40\,000$ Fr. kosten, wobei das Erstellen des Modells allein ungefähr mit 16 000 Fr. zu Buche steht.

Wir müssen diese Zahlen, obschon sie relativ hoch sind, als Realität hinnehmen. Sie bilden die hauptsächlichste Grundlage zur Beantwortung der Frage, ob ein Modellversuch tragbar sei oder nicht. Ich glaube, dass sie sich sehr einfach in der folgenden Weise beantworten lässt: Ein Modellversuch kann dann verantwortet werden, wenn die Einsparung, die wir durch die genaue Kenntnis der Kräftespiele erreichen, grösser ist als der Modellkostenaufwand. Die Einsparungen infolge der genauen Kenntnis des Kräftespiels könnte man auch mit dem volkstümlichen Ausdruck «Einsparung an Angstarmierung» bezeichnen, und ich glaube, dass

sich wenige Ingenieure der Praxis rühmen können, niemals solche zu verwenden, besonders dann, wenn es sich um sehr komplizierte Probleme aus dem Gebiete der Flächentragwerke handelt. Wenn Sie aber zum Beispiel bei einer Pilzdecke, die sich vielleicht in vier Stockwerken wiederholt und eine Fläche von 2000 m² aufweist, wegen eines Modellversuches auch nur 1 kg Angsteisen pro m² einsparen können, was vielleicht auf den gesamten Eisenverbrauch 4 % der Decke ausmacht, dann können Sie mindestens 8000 Franken sparen, also bedeutend mehr, als ein Modellversuch kostet, und dabei ist die Sicherheit nicht etwa kleiner, ganz im Gegenteil.

Wenn wir nun weiterfahren und die vielleicht allerwichtigste Frage stellen, wer denn einen Modellversuch bezahlen soll, so scheint mir dies die einfachste Antwort: Derjenige, der daraus Nutzen zieht, also eindeutig der Bauherr, wenn der Versuch auf Grund der oben aufgestellten Grundsätze durchgeführt wird. Diese Praxis wurde übrigens in allen Fällen, mit denen ich zu tun hatte, auch befolgt.

*

Wie Sie aus den Lichtbildern ersehen konnten, liegt einem Modellversuch eine minutiöse Klein- und Präzisionsarbeit zugrunde. Jede experimentelle Untersuchungsmethode erfordert neben der Geduld und Beharrlichkeit auch ein grosses Verantwortungsgefühl und nicht zuletzt eine grosse Erfahrung, die niemals aus Lehrbüchern — sie sind übrigens gar nicht dicht gesät — bezogen werden kann, sondern die man sich an den Tücken des Objekts selber, oft sehr mühsam, sammeln muss. Diese Schwierigkeiten aber sind es, zusammen mit der Vielfalt der gestellten Probleme, die die Modellmessung zu einem interessanten Gebiet des Ingenieurwesens machen. Demjenigen, der sich mit Modellmessung abgibt, vermittelt diese aber nicht nur trockene Zahlen und Resultate, sondern sie fördert auch sein statisches Gefühl,

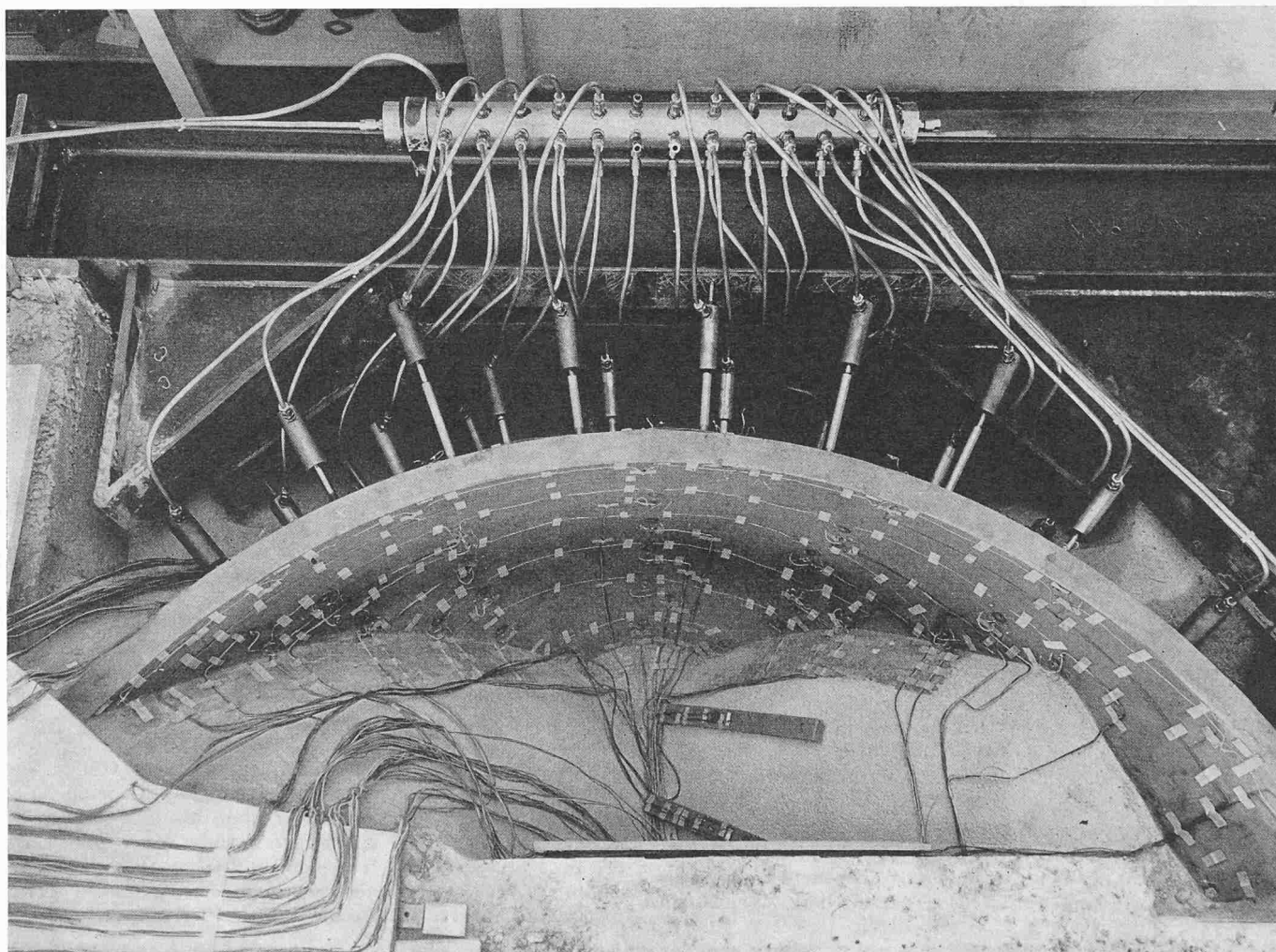


Bild 3. Fertig verdrahtetes Modell der Staumauer Sufers

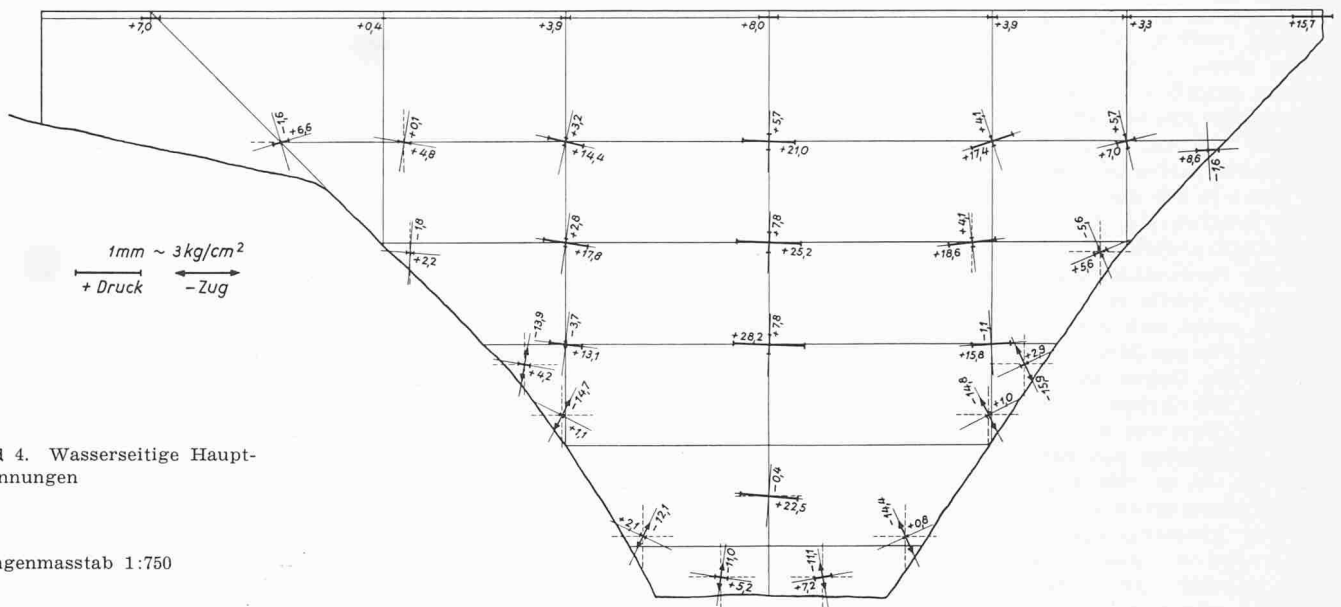


Bild 4. Wasserseitige Hauptspannungen

Längenmasstab 1:750

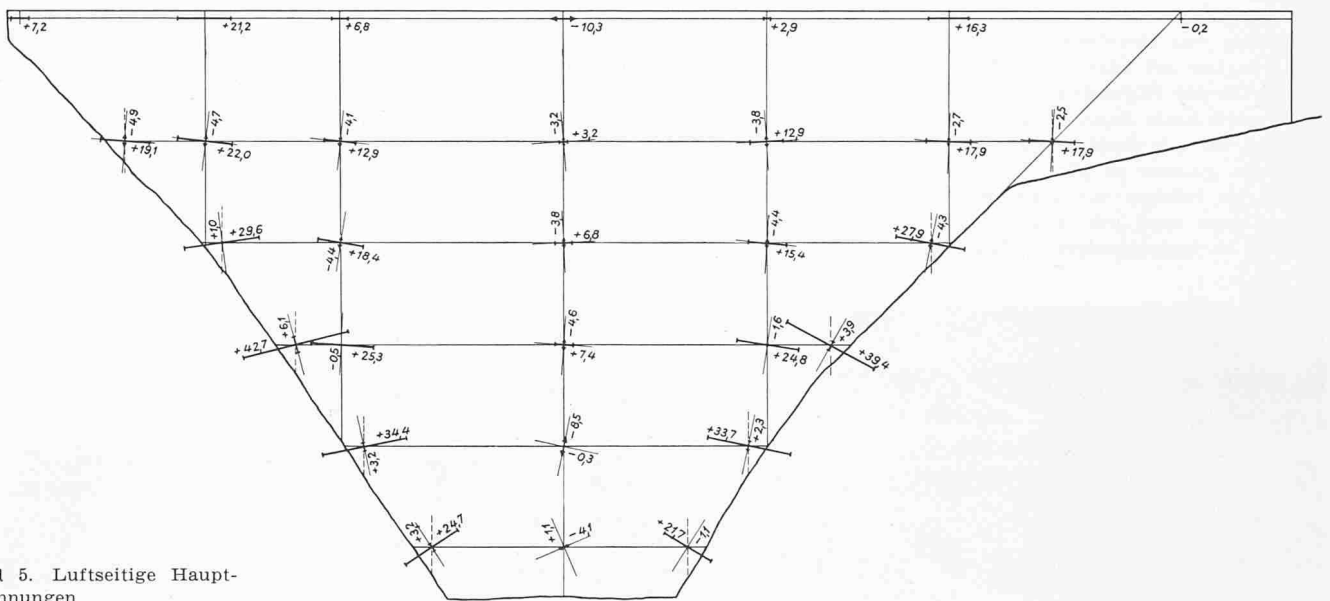


Bild 5. Luftseitige Hauptspannungen

das ihn oft zum voraus über Möglichkeit oder Unmöglichkeit einer komplizierten Lösung entscheiden lässt — ein statisches Gefühl, dem wir heute im allgemeinen wenig Vertrauen schenken und uns lieber irgend einer Näherungsmethode anvertrauen, deren Voraussetzungen für das gegebene Problem unter Umständen gar nicht zutreffen.

Da Sie morgen einen Vortrag über die Bedeutung elektronischer Rechenmaschinen für die Konstruktionspraxis hören werden, gestatte ich mir — ohne indessen diesen imposanten Entwicklungen und den dahinter stehenden geistigen Leistungen auch nur im geringsten Abbruch tun zu wollen — Ihnen die Modelle, wie wir sie für unsere statischen und auch zum Teil dynamischen Versuche verwenden, ebenfalls als kleine Rechenmaschinen vorzustellen, die ohne Mühe die kompliziertesten Differentialgleichungen mit den schwierigsten Randbedingungen lösen und dies mit einer weitgehenden Sicherung gegen Irrtümer und falsche Vorzeichen, wie sie dem Ingenieur, der die Daten für die weitere Verarbeitung in der Maschine liefern muss, unterlaufen können.

Ich hoffe schliesslich, dass Sie aus meinen Ausführungen ersehen konnten, dass ich keineswegs darauf ausgehe, Ihnen die experimentellen Methoden als Allerweltsmittel anzupreisen, dass es mir vielmehr daran lag, Ihnen neben den Möglichkeiten auch die Grenzen klar darzustellen. Wenn sich heute aber ein Ingenieur zum vornherein jeglichen Modellversuchen verschliesst, vielleicht aus Angst, man könnte an seinen statischen Fähigkeiten zweifeln oder aus ähnlichen

Tabelle 1. Horizontale Verschiebungen der Staumauer Sufers¹⁾

Punkt	δ_T	Punkt	δ_T	Punkt	δ_T
1	+ 3,71 mm	11	+ 5,52 mm	21	+ 2,47 mm
2	— 1,15 mm	12	+ 10,04 mm	22	+ 7,98 mm
3	— 0,58 mm	13	+ 6,18 mm	23	+ 4,12 mm
4	+ 3,87 mm	14	+ 1,15 mm	24	+ 1,56 mm
5	+ 9,88 mm	15	+ 0,07 mm	25	+ 1,81 mm
6	+ 4,12 mm	16	+ 0,82 mm	26	+ 5,77 mm
7	— 1,56 mm	17	+ 5,60 mm	27	+ 1,81 mm
8	— 0,08 mm	18	+ 9,71 mm	28	+ 0,53 mm
9	+ 0,21 mm	19	+ 6,22 mm	29	+ 0,62 mm
10	+ 0,29 mm	20	+ 1,21 mm	30	+ 2,06 mm

1) Die Werte der Tabelle beziehen sich auf das Bauwerk in Naturgrösse; sie sind 82,41 mal grösser als die durch den Modellversuch ermittelten.

konservativen Gründen, so scheint mir dies eine völlige Verkenkung des Wesens einer experimentellen Untersuchung, eine Haltung, die ich mit den Worten, die diesen Betrachtungen zugrunde lagen, widerlegen möchte: *Es ist die Pflicht des Ingenieurs, die Möglichkeiten und Grenzen der zur Verfügung stehenden Untersuchungsmethoden zu kennen und in jedem Fall die geeignetste zu wählen.*

Adresse des Verfassers: Dr. H. von Gunten, Baustatisches Institut, Gartenstrasse 3, Bern.

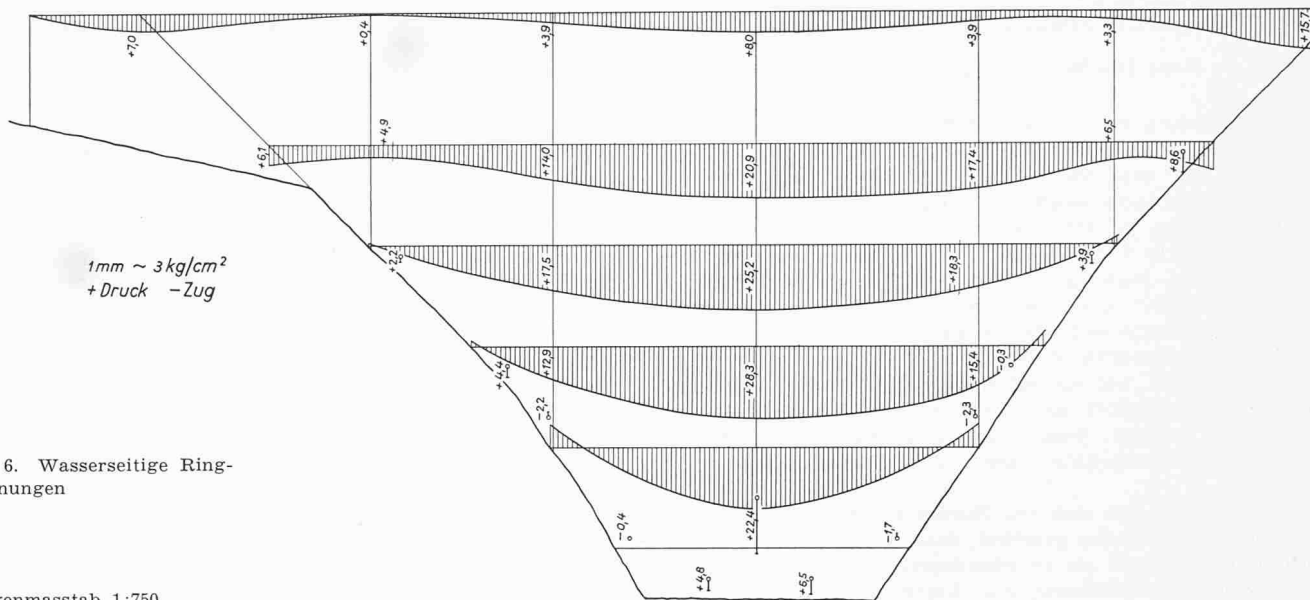


Bild 6. Wasserseitige Ringspannungen

Längenmasstab 1:750

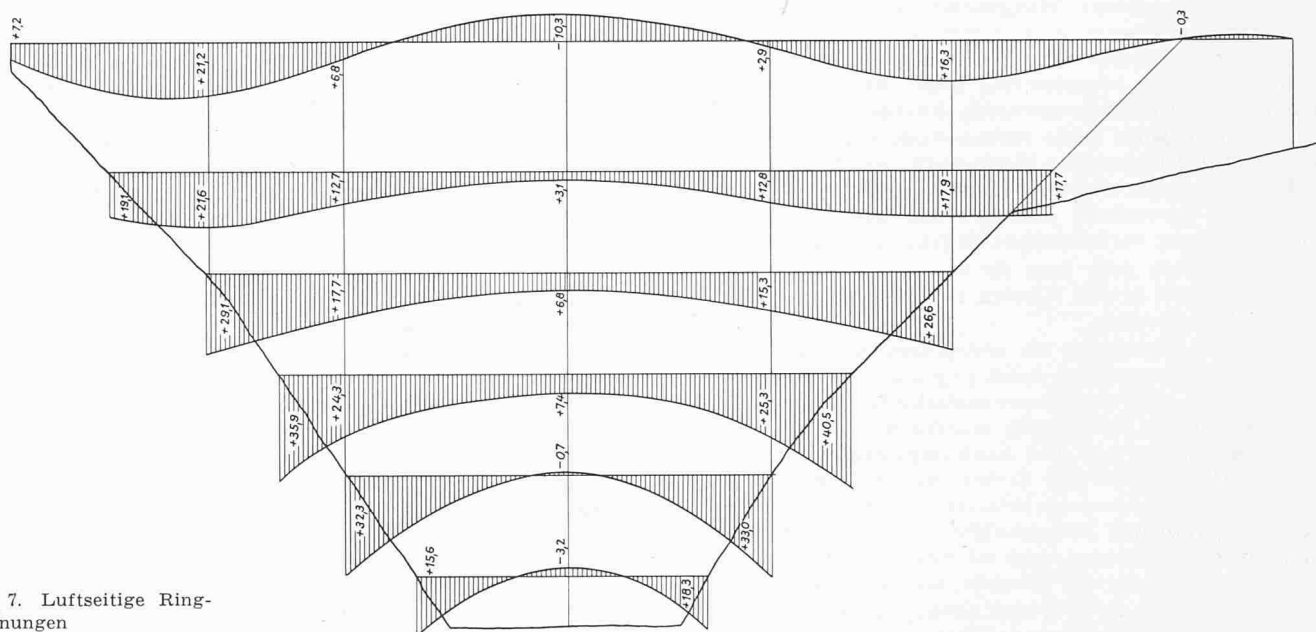


Bild 7. Luftseitige Ringspannungen

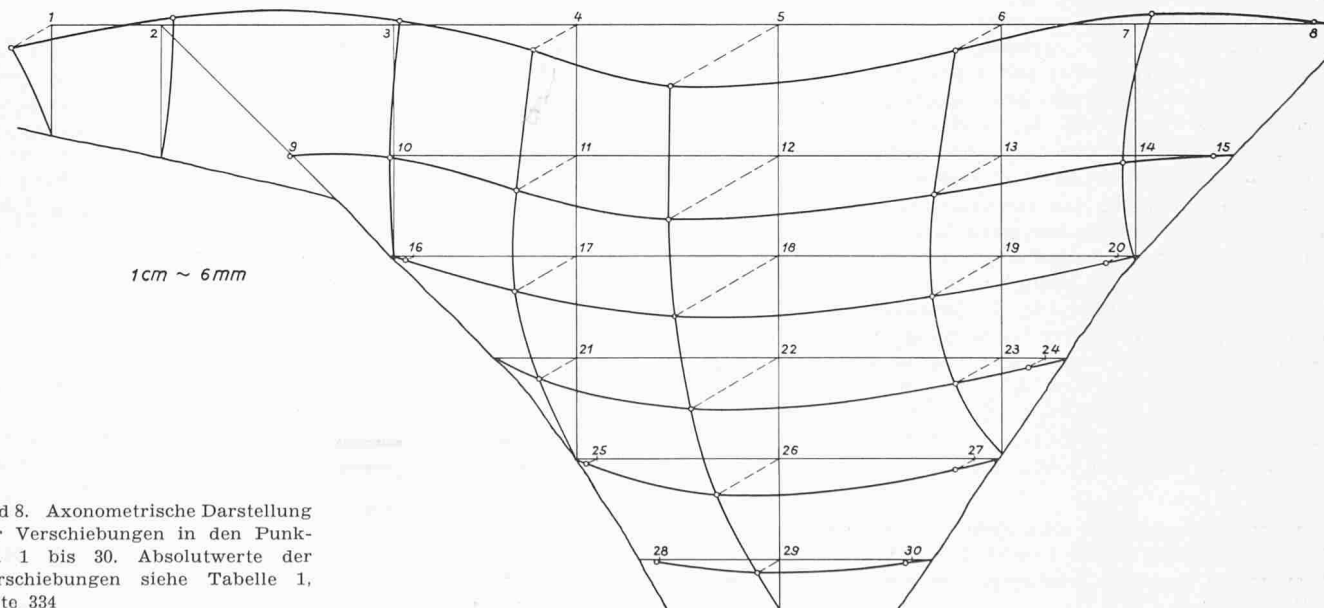


Bild 8. Axonometrische Darstellung der Verschiebungen in den Punkten 1 bis 30. Absolutwerte der Verschiebungen siehe Tabelle 1, Seite 334