

A₄

Ziel, Ergebnisse und Wert der Messungen an Bauwerken

Von Dipl.-Ing. A. Bühler, Sektionschef für Brückenbau bei der
Generaldirektion der Schweizerischen Bundesbahnen

I. Das Ziel der Messungen an Bauwerken

1. Einführung

Wer heute im Bauwesen tätig ist, wird zugeben müssen, daß die theoretischen Grundlagen eine große Verbreiterung erfahren haben. Es hat sogar den Anschein, als ob die frühere Feindschaft zwischen „Praxis“ und „Theorie“ ihr Ende gefunden habe und daß beide einträchtig nebeneinander zu leben verstünden. Gelegentlich ist sogar feststellbar, daß die „Praxis“ sich nunmehr der „Theorie“ als Bundesgenossin bedient, um das ihr Passende zu beweisen, auch wenn keine Notwendigkeit dazu vorliegt. Auch dies zeigt, welch' großen Einfluß die rein theoretischen Erwägungen gewonnen haben.

Theorie-Praxis: Und doch, wie verhält sich eigentlich heute die Theorie zur Praxis, oder umgekehrt? Wer in die theoretischen und experimentellen Grundlagen der Ingenieurwissenschaften eingeführt wird, wird selten gewahr, in welch' bedeutendem Umfange von sogenannten Annahmen ausgegangen werden muß, um zu einem theoretischen Ziele zu gelangen. Ut tensio, sic vis, definierte einst R. Hook die Proportionalität zwischen Formänderung und Kraft (1679); es ging aber noch lange, bis NAVIER auf diesem Prinzip aufbauend (1821) die Annahme der Proportionalität zwischen Spannung und Dehnung zur Grundlage der heutigen Biegungs- und Elastizitätstheorie erhob. Obschon die gerade Spannungs-Dehnungslinie in engeren Grenzen nur ziemlich genau im Eisenbau gilt, wird sie heute auch im Holz-, Stein- und Eisenbetonbau unbedenklich angewendet, nachdem theoretisch, durch Modellversuche und in geringerem Umfang auch durch Messungen an Bauwerken mit mehr oder weniger Glück gezeigt wurde, daß die übliche Formänderungslehre ziemlich zutreffende Ergebnisse liefert. Wer aber ist in der Lage, bei verwickelteren, in ausgedehnter Weise zusammenhängenden Bauwerksteilen die Folgen dieser nur angenähert erfüllten Annahmen anzugeben? Wer kann den Einfluß der Zeit auf die Spannungs-Dehnungslinie, also auch auf den Verlauf der Stützlinie bei Gewölben, in Verbindung mit unregelmäßig wiederholten kleinen und großen Belastungen, und auf die Verformung der Mauern durch lang andauernde exzentrische Drücke (Stützmauern, Staumauern, auch Pfeiler) bestimmen? Ist die öfters beobachtete, gegenüber der Rechnung raschere Abnahme der Kontinuitätswirkung bei Eisenbetonbauten auf ähnliche Ursachen zurückzuführen?

Tragsysteme, Gründungen: Auch die faszinierende Wirkung anderer Annahmen verfehlt nicht, das kritische Urteil stark einzuschläfern. So die Berechnung der Fachwerke als gelenkige Liniensysteme anstatt als Rahmenträger, also die Vernach-

lässigung der Nebenspannungen, sodann die Weglassung der Berechnung der Zusatzspannungen, die die Verbände und Fahrbahnen oder Deckenkonstruktionen auf die Hauptträger oder Haupttragteile ausüben. Zusammenfassend ist zu bemerken, daß der in Wirklichkeit stets vorhandene Zusammenhang, sowie das Zusammenwirken aller räumlich angeordneten Bauwerksteile zu wenig beachtet wird. Diese Umstände könnten auch durch kostspielige Maßnahmen, wie z. B. Gelenkanordnungen, nicht, oder nur ungenügend aus der Welt geschaffen werden. Bei näherer Betrachtung macht uns auch die Mutter Erde bereits Schwierigkeiten, wenn wir wissen möchten, wie wir unsere Bauwerke abstellen sollten. Abgesehen davon, daß sie diese gelegentlich unwirsch schüttelt, wofür uns — was in solchen Fällen stets verständlich ist — ein Maß fehlt, so werden wir unsicher, sobald wir den Erddruckwirkungen und den dabei auftretenden verwickelten Erscheinungen gründlich zu Leibe rücken möchten. Erst die Gründung und der Anschluß bei „Fels“ hebt unsere Kühnheit im Bauen ganz beträchtlich.

Lasten: Wenden wir uns den „Lasten“ zu, die unsere Bauwerke tragen sollen, so bemerken wir bei näherem Zusehen, daß wir tief in der Erfahrung und den Annahmen unserer Vorgänger stecken. Wir werden dieses Umstandes besonders gewahr, wenn wir die in den verschiedenen Ländern angenommenen Belastungsgrundlagen vergleichen. Der berechnende Ingenieur konnte früher bei kleinen Geschwindigkeiten und wenig zahlreichen Verkehrsmitteln und Menschenanhäufungen sich seine Lasten ruhend vorstellen und nach einfachen Grundsätzen der Gleichgewichtslehre arbeiten, was ihm den Namen Statiker eintrug. Ist heute dieses Verfahren bei den mechanisierten Verkehrsmitteln und den gewaltig angewachsenen Geschwindigkeiten noch zulässig? Wenn heute eine mit 100 km Geschwindigkeit in der Stunde verkehrende schwere Lokomotive eine 10 m lange Brücke in weniger als einer Sekunde passiert und in deren Fahrbahnträgern in Bruchteilen einer Sekunde vielfache große Spannungswechsel auslöst, ist das nicht eine dynamische Wirkung und Inanspruchnahme? Wir sind heute in die dynamische Zeit eingerückt, nicht nur bei den Eisenbahn-, sondern auch bei den Straßenbrücken. Die Dynamik wird und muß in Zukunft mehr als bisher unsere Tätigkeit beherrschen, wenn es auch wahrscheinlich ist, daß die Statik, ergänzt durch dynamische Prinzipien, ihre große Bedeutung nicht verlieren wird. Es wird aber noch der angestrengtesten Arbeit aller an den Fortschritt glaubenden Ingenieure bedürfen, um neue gute Berechnungsgrundlagen und Grundsätze zu schaffen, die ein Verstecken hinter den Sicherheitskoeffizienten nicht mehr nötig machen und gestatten, die Tatsachen und die Wirklichkeit scharf ins Auge zu fassen. Hiebei soll übrigens auch die Unsicherheit der Belastungsansätze überhaupt erwähnt werden. Diese besteht bei Eisenbahnbrücken darin, daß der Entwicklung der Lasten einer wenigstens näheren Zukunft Rücksicht zu tragen ist. Im Laufe eines Jahrhunderts sind diese Lasten von 3 t/m auf 14 t/m Geleise angewachsen. Bei Straßenbrücken liegt die Unsicherheit weniger in dem Maße der Lasten, als in deren Kombinationen und deren Abhängigkeit von der Spannweite. Wurde z. B. die im Jahre 1832 von CHALEY erbaute Hängebrücke in Freiburg von 256 m Spannweite für nur 100 kg/qm Belastung bemessen, so gehen heute die Annahmen bei den großen bis 1060 m weit gespannten Hängebrücken in Amerika¹ auf etwa 250 bis 300 kg/qm Belastung für die Hauptträger, während wir im übrigen gewöhnt sind, in städtischen Verhältnissen für kleinere und mittel-

1	Mittel- öffnung	Eisen- gewicht	Kosten	Eigen- gewicht	Zufällige Belastung
Kabelbrücke Philadelphia- Camden (1927)	530 m	61700 t	190 Mill. Fr.	38 t/m	17,8 t/m
Kabelbrücke über den Hudson (1929)	1060 m	120000 t	380 Mill. Fr.	58 t/m	12,0 t/m

weit gespannte Brücken etwa 500 bis 600 kg/qm Belastung, also sechs bis acht Personen auf den Quadratmeter vorzusehen. Auch im Ingenieurhochbau sind nicht nur die absoluten, auf Einzelteile wirkenden Größtlasten zu berücksichtigen, sondern es findet oftmals eine Abstufung derselben, z. B. bei der Säulenbemessung statt. Welch' weitere Überlegungen oder erhebliche Unsicherheiten, die sich nur auf die Wahrscheinlichkeit des Eintretens oder Nichteintretens gründen, in Kauf genommen werden müssen, kommt auch zum Bewußtsein, wenn wir an die Temperatur-, Schnee- und Windwirkungen denken, deren Festsetzung, sowie Übertragung in die Berechnungen mit erheblicher Willkür verbunden ist. Dies gilt insbesondere von Temperaturwirkungen, z. B. im Innern großer Massivkörper.

Bemessen der Bauwerke, Materialfragen: Zu dem Bemessungsverfahren übergehend, ist zu bemerken, daß auch in diesem Teil des Bauwissens eine große Unsicherheit besteht. Was wissen wir Genaueres vom Bemessen in statischer und dynamischer Hinsicht, beim Überwiegen der einen oder anderen Beanspruchung oder von der Rolle der Zeit bei sehr lange andauernden Kraftwirkungen? Denken wir an die ständig einwirkenden großen Eigengewichtskräfte der Firth-of-Forth-Brücke, oder an diejenigen der riesigen amerikanischen Hängebrücken, bei denen zudem Sonne, Wind und Regen schroffe örtliche Beanspruchungen erzeugen können! Verhalten sich Zug- und Druckstäbe oder auf Biegung beanspruchte Balken nicht verschieden? Wie steht es bei den Verbindungen, bei der Ausbildung der Knotenpunkte, ja nur beim einfachen genieteten Balken, wenn alle Einzelheiten bewußt richtig und wirtschaftlich festgesetzt werden sollen? Wie einfach wird das Nietproblem gelehrt, welche Sphinx ist es in Wirklichkeit! Hoffentlich hilft uns die elektrische Schweißung aus dem Dilemma. Zeigen sich bei einachsigen Spannungszuständen noch zahlreiche unabgeklärte Verhältnisse, so häufen sich die Schwierigkeiten beim Betrachten von zwei- und dreiachsigen Spannungszuständen, die in unseren Bauwerken die Regel bilden, sowie ihre Kombinationen mit den Dauerfestigkeiten und dem Altern unserer Materialien überhaupt.

Heute kann nur mit einiger Wahrscheinlichkeit gesagt werden, daß die auftretenden Spannungen unterhalb der Proportionalitätsgrenze der Materialien liegen sollten, wenn Schädigungen vermieden werden wollen, und zwar kann diese Grenze in etwas roher Weise zur Hälfte der statischen Bruchfestigkeit angenommen werden.¹ Hieraus geht hervor, daß Bruchversuche uns kein Maß für die „Dauer-Sicherheit“ eines Bauwerkes geben können.

Bei geringen Änderungen in der chemischen Zusammensetzung und bei etwas verschiedenem Herstellungsverfahren des Stahles lassen wir bei kleineren Brücken vielleicht bloß 0,7 t/qcm als Spannung zu, während bei großen Hängebrücken in Amerika auf 5,6 t/qcm Arbeitsspannung gegangen wird und 7 t/qcm Spannung in Aussicht genommen sind, ohne daß die Arbeitsfläche des Zugversuches der verwendeten Baustähle wesentliche Unterschiede aufwies (Abb. 1). Als höchste Bruchfestigkeit kommen jetzt 16,2 t/qcm in Frage bei 4% Dehnung. Bei der Freiburger Hängebrücke betrug die Drahtfestigkeit 8 t/qcm, die Arbeitsspannung 2,7 t/qcm. Wie soll man sich hiezu einstellen, ohne sich über gewisse Erscheinungen, wie Dauerfestigkeit, Hysteresis, Erholungsfähigkeit, aber auch Rückbildungen usw., einen genauen Einblick verschafft zu haben?²

¹ Die genauere Formulierung der Ermüdung der wesentlichsten Baumaterialien lautet heute: Die Ermüdungsgrenze bei Eisen fällt bei \pm Beanspruchung mit der Proportionalitätsgrenze und bei nur + oder nur - Beanspruchung mit der gehobenen „Proportionalitätsgrenze“ zusammen. Bei Beton stellt sich die Ermüdung ein, sobald nach oftmaliger Belastung die Formänderungen nicht mehr angenähert nach geradlinigem Gesetze verlaufen.

² Andere Widersprüche bestehen z. B. bei der Beurteilung des Bau- und Schienenstahles. Wie wohl selten ein Bauteil im Eisenbahnbetrieb, ist die *Schiene* heftigen Schlägen und Ver-

Diese Verhältnisse werden am besten klar, wenn bei einem gegebenen Bauwerk, z. B. einer Brücke, die im Eisenbahnbetriebsdienst häufig gestellte Frage zu beantworten ist, welche Lasten auf eine mehr oder weniger gegebene Zeit noch zugelassen werden können, oder, wenn die Aufgabe zu lösen wäre, eine Brücke zu erstellen, die unendlich viele Beanspruchungen durch bestimmte Lasten noch eben sollte aushalten können. Ohne Sicherheitsbeiwerte und ohne uns auf Vorschriften zu stützen, sind wir nicht in der Lage eine Antwort zu geben. Hinzu kommt noch die Einschätzung der Einflüsse von Materialfehlern.

Löst man sich so los vom hergebrachten, anezogenen, vereinfachenden und formalen technischen Denken, so möchte es manchmal scheinen, als ob der Boden unter den Füßen verloren ginge und ein Zurechtfinden in dem Chaos der Erscheinungen unmöglich wäre. Dem ist aber nicht ganz so. Es ist doch zu bedenken, daß wir in der Lage sind, wenigstens in großen Linien das Leben in unseren Bauwerken verstehen und voraussagen zu können. Wenn das heute noch nicht für alle Einzelheiten und alle Lebensäußerungen dieser Bauwerke gilt, so wird auch diese Kluft durch die unablässige Arbeit aller wissenschaftlich und praktisch arbeitenden Ingenieure einst überbrückt werden. Wir möchten den Wert dieser Gemeinschaftsarbeit schon an dieser Stelle betonen und hinzufügen, daß bei genauerem Zusehen ein Gegensatz zwischen Theorie und Praxis nie bestehen kann; beide sind heute aufeinander angewiesen, ja unlösbar miteinander verknüpft.

Wir haben eingangs der Auffassung Ausdruck gegeben, daß die üblichen theoretischen Grundlagen heute eine große Verbreiterung gefunden haben. Was weiterhin außerordentlich not täte, wäre eine Vertiefung und ein Ausbau dieser Grundlagen, in Verbindung mit genauen Materialkenntnissen, von denen wir bei unseren technischen Arbeiten Gebrauch machen müssen. Wie MARTENS möchten wir daher sagen: „Mehr Materialkenntnisse“, aber dazu beifügen: „Mehr Kenntnisse unserer Bauwerke und der Bauelemente“.

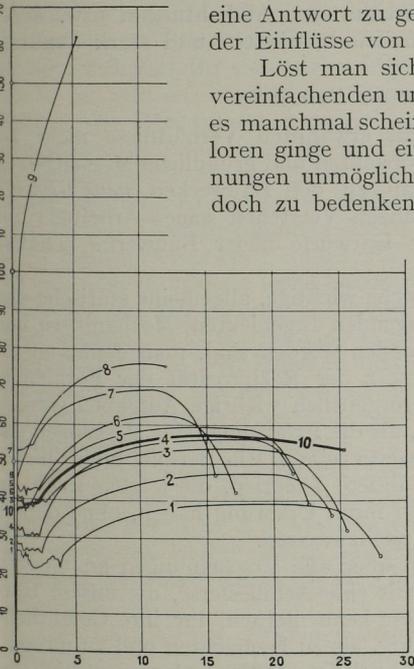


Abb. 1. Dehnungen (%/0) und Festigkeiten (kg/qmm²) von Baustählen

- | | |
|------------------------|--|
| 1. Fluß Eisen (St. 37) | C 0,1 ⁰ / ₀ |
| 2. Kohlenstoffstahl | C 0,2 ⁰ / ₀ |
| 3. Nickelstahl | Ni 3 ⁰ / ₀ |
| 4. Spezialstahl | — |
| 5. Nickelstahl | Ni 5 ⁰ / ₀ |
| 6. Chromnickelstahl | Cr + Ni 3 ⁰ / ₀ |
| 7. „ | Cr + Ni 4 ⁰ / ₀ |
| 8. Schienenstahl | S. B. B. |
| 9. Kabeldraht | C 0,85 ⁰ / ₀ ; P 0,04 ⁰ / ₀ ; S 0,04 ⁰ / ₀ |
| 10. Siliziumstahl | Si 1 ⁰ / ₀ |
- (Dehnungen gemessen auf 20 cm Länge)

Fortschritte in dieser Beziehung sind unverkennbar; wir erinnern nur an die Einführung des Schubmittelpunktes bei einem zur Krafrichtung unsymmetrischen Biegungen ausgesetzt. Trotzdem wird unter Verzicht auf hohe Dehnung die Bruchfestigkeit und der Widerstand gegen Abnutzung gesteigert. Beim Baustahl führt die ängstlich verteidigte hohe Dehnung zu tief liegenden Streckgrenzen, obschon die Beanspruchungen nie so heftig wie bei den Schienen sind. Theoretische Betrachtungen schützen alte praktische Ansichten, selbst wenn die Verhältnisse sich längst verändert haben und ein Schutz überflüssig wäre. Der Wert der Dehnung, festgestellt an kleinen Körpern, dürfte auch darum überschätzt werden, weil sie nur beim Beginn von Interesse ist. Die Erschöpfung aller Eisen enthaltenden Bauwerke liegt

Balken, an die Berechnung von vielen Einzelheiten eines Bauwerkes, wie Verbindungen bei mehrteiligen Druckstäben, Rahmenwirkungen usw., denen zweifellos ein Ausbau der Berechnung noch vieler weiterer Bauelemente folgen wird. Zurzeit wird in allen Ländern mit großem Fleiß an der Frage der Ermüdung der Materialien gearbeitet, mit Recht, da jedermann bestrebt ist, seine Bauwerke auf tunlichst lange Zeit sicherzustellen und vor Unterhaltarbeiten zu bewahren. In praktischer Hinsicht kommt auch noch die Frage der Abnutzung dazu, indem, wie z. B. bei Brücken, die Lager und oft auch die Fahrbahnteile, Abdichtungen usw. durch geringfügig erscheinende Gleitungen sich ineinanderarbeiten und stark abnutzen können.

2. Ziel der Messungen an Bauwerken

Wer möchte angesichts der vorstehend erwähnten Verhältnisse nicht zustimmend erklären, daß nur ein weiteres Beobachten und gründliche Messungen im Laboratorium und in gleichberechtigtem Maß an den Bauwerken, *neue Gesichtspunkte zum Beurteilen eines Baues*, zum ganzen Verstehen seines Arbeitens und seiner Natur eröffnen und Grundlagen zum Entwerfe neuer Bauwerke schaffen kann?

Es ist zwar nicht zu bestreiten, daß manche wichtige, allgemeine statische und auch dynamische Erkenntnisse von hervorragenden Ingenieuren, Mechanikern und Physikern auf rein theoretischem Wege gefunden worden sind, man denke an die EULER'sche Knickformel (1744), an das Gesetz der Reziprozität der Formänderungen usw., aber viele für die Praxis außerordentlich wichtige Aufgaben wurden oder konnten erst gestellt und gelöst werden, als die Erfahrung oder Messungen das Vorhandensein der Aufgaben und ihrer Tragweite zeigte. Ein Beispiel hierfür bieten die Nebenspannungen und wohl noch viele andere Theorien, die letzten Endes in Messungen oder unmittelbaren Anschauungen ihren Ursprung haben, ohne daß es heute möglich wäre, diese Zusammenhänge nachzuweisen.

Keines dieser allgemeinen Gesetze kann aber alle Erscheinungen an unseren Bauwerken restlos erläutern, fast immer bleibt eine Achillesferse, die unsere Herleitungen verwundbar macht. Wollen wir diese kennenlernen, ihr ihre Gefährlichkeit nehmen, so bleibt uns nichts anderes übrig, als zu beobachten und zu messen, ob die Ergebnisse der Berechnungen auch wirklich im großen und ganzen stimmen und ob und welche Verbesserungen daran nötig sind. Aus den Abweichungen zwischen Theorie und Messung können wir schließen, wo unsere Annahmen unzureichend sind und wie wir unsere Praxis, unser konstruktives Denken und Können zu ändern haben, um mit der Wirklichkeit besser übereinstimmende Ergebnisse zu erzielen.

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, daß diese Bestrebungen bereits auch auf die Berechnungsmethoden selbst übergegriffen haben und daß dort, wo die klassischen Berechnungsmethoden zu verwickelt und unkontrollierbar werden, Modellverfahren mit Vorteil einsetzen können. Wir nennen vor allen Dingen das BEGGS'sche Verfahren — auf ebene und räumliche Systeme anwendbar — und sodann das Verfahren mit polarisiertem Lichte, daß indessen nur bei ebenen Gebilden gebraucht werden kann und sich mehr für begrenzte, örtliche Spannungszustände eignet.

Aber nicht nur zur Überbrückung und Erklärung der Abweichungen zwischen rechnerischem und wirklichem Verhalten unserer Bauwerke sollen Versuche und Messungen an Bauwerken dienen: *sie sind auch das Mittel, unsere Arbeit dem höchsten Ziele ständig näherzubringen, nämlich dem der Bewährung, in dem sich sämtliche*

beim Beginne der Streckgrenze (auch Eisenbeton), weil große Verformungen nicht zugelassen werden können und weil bei großen Stabquerschnitten eine große Streckung nicht zustande kommt.

*Anstrengungen der Projektverfasser und der Ausführenden zu einer einzigen Resultierenden vereinigen müssen.*¹

An welchen bauenden Ingenieur ist nicht schon die bange Frage nach der Bewährung herangetreten? Welcher dieser Ingenieure erinnert sich nicht der sorgen- und freudvollen Gefühle zugleich, wenn das erste von ihm, wenn auch zum Teil unbewußt, auf übernommenen Regeln projektierte Bauwerk der Beendigung entgegengeht, oder gar vor der Probelastung stand?

Für manche ist allerdings mit dem sogenannten guten Ausfall einer selbst oberflächlichen Probelastung die Frage der Bewährung im günstigen Sinne erledigt, während für diejenigen Ingenieure, denen der Unterhalt der Bauwerke zufällt, hie und da die Zeit der Sorgen erst anbricht, denn erst unter der Dauerwirkung der Belastungen kommen gelegentlich Mängel zum Vorschein, oft erst nach Jahren, indessen um so früher, je mehr die Gebrauchslasten den Berechnungsannahmen gleichkommen. Stets wird es aber als gutes Zeichen gedeutet werden dürfen, wenn die Ergebnisse eingehender Messungen mit den rechnerischen Werten befriedigende Übereinstimmung zeigen und die Gründung unserer Bauwerke stabil zu bleiben verspricht. Hierbei soll, wie bereits betont, nicht übersehen werden, daß wir viele Einflüsse, insbesondere diejenigen der Zeit und der Witterung, der Ermüdung und des Alterns, sowie der reinen Abnutzung noch nicht genau voraussagen können. Hier besteht eine Lücke in unserem Wissen, deren Tragweite noch nicht abgeklärt ist. Wir kommen am Schlusse unserer Ausführungen darauf zurück. Wir stehen heute erst am Beginne dieser Bewegung; viel Kleinarbeit ist geleistet und muß noch geleistet werden, bis einst das Wesentliche zu großen Richtlinien zusammengefaßt werden kann.

Diese Zusammenfassung der Ergebnisse aller Laboratoriums- und Bauwerksmessungen, verflochten mit sorgfältig angewandten Berechnungsmethoden und gründlicher Kenntnis der konstruktiven Verhältnisse und der Werkstoffe selbst, wird uns in den Stand setzen, Bauwerke zu schaffen, die in höchstem Sinne wirtschaftlich sind und sich durch ihre Bewährung auszeichnen werden.

3. Prüfungsmethoden und Meßinstrumente

Die Messungen an Bauwerken werden erst dann ihre volle Bedeutung erlangen, wenn die Ergebnisse durch genau anzeigende Apparate durchaus sichergestellt sind, so daß gestützt darauf ein zutreffendes Urteil über das Berechnungsverfahren und die getroffenen Annahmen abgegeben werden kann. Dabei bestehen heute zwischen den Methoden und Instrumenten, wie sie im Laboratorium gebraucht und denen, die im „Felde“, d. h. bei der Messung an den Bauwerken selbst angewandt werden, keine so weitgehenden Unterschiede mehr wie ehemals.

Immerhin befinden sich die Messungen im Laboratorium insofern im Vorteil, daß bei ihnen auch die feinsten Meßapparate der Physiker gebraucht werden können und daß hinsichtlich der Prüfungsmethoden viele Möglichkeiten bestehen, im Hinblick auf die zahlreichen Prüfungsmaschinen, die erlauben, einfache und verwickeltere Belastungsfälle auf kleine, verhältnismäßig leicht übersehbare Probekörper zur Auswirkung zu bringen. Während man naturgemäß, wie die Bezeichnung „Festigkeitslehre“ zeigt, anfangs die Sicherheit eines Bauteiles auf den „Bruch“ (Festigkeit) bezog, ist, wie bereits erwähnt, in neuerer Zeit ein Wandel der Ansichten zu erkennen, der der Tatsache der Ermüdung und des Bruches eines Materials weit unterhalb seiner durch langsame Belastungszunahme bestimmten Festigkeit die gebührende Aufmerksamkeit schenken will. Demgemäß kommen in den Labora-

¹ Betrachtungen in künstlerischer Hinsicht sind ganz beiseite gelassen, ebenso solche, die die zweckmäßige Anwendung der verschiedenen Bauweisen betreffen.

torien heute in vermehrtem Maße Dauerprobemaschinen zur Aufstellung. Die Entwicklung dieses Gebietes der Materialuntersuchung ist in voller Entwicklung begriffen und verspricht äußerst lehrreiche Ergebnisse zu zeitigen.

Von demselben Gedanken ausgehend, daß die Verhältnisse beim Bruch eines Bauwerkes keinen Rückschluß auf seine Bewährung erlauben können, will die Messung am Bauwerk, so wie es ist, die normale Arbeitsweise feststellen und die Ergebnisse in Verbindung mit den grundlegenden Erkenntnissen der Materialforschung zu einem einheitlichen Schlusse verschmelzen. Diese Untersuchungsmethode verschmäht daher auch grundsätzlich die oft beliebte Überlastung der Bauwerke, die in vielen Fällen, insbesondere bei schlechter Ausführung, bleibende Schäden erzeugen kann.¹

Bei den Messungen an Bauwerken können sowohl statische, als auch dynamische Belastungen in Frage kommen; die Entwicklung der Belastungsvorrichtungen ist jetzt bereits so weit, daß sogar Dauerproben mit einfachen, wenig kostspieligen Mitteln an den Bauwerken möglich werden. Daneben können auch Bestimmungen von Temperatur- oder anderen Naturvorgängen in Frage kommen.

An statischen und dynamischen Belastungen und Belastungseinrichtungen kommen in erster Linie diejenigen in Frage, die uns die normale Betriebs- oder Gebrauchsweise eines Bauwerkes zur Verfügung stellen kann, und zwar *bei Eisenbahnbrücken*: mehr oder weniger gut ausgewuchtete Lokomotiven und verschiedene, auf Resonanzwirkungen der Achsdrücke zusammengesetzte Wagenzüge; Einzelachsfahrzeuge zur Gewinnung von statischen und dynamischen Einflußlinien und zur Analysierung der verwickelteren Spannungsverhältnisse, insbesondere bei den *Fahrbahnen*; bei *Straßenbrücken*: Pferdegespanne und Automobile, sowie gruppierte, allenfalls im Takte schreitende Menschenmassen oder Reiter, und bei *Hochbauten*: neben Menschengruppen, auf Karren aufgebrachte, leicht bewegliche Lasten (z. B. Bleibarren), die eine Erprobung wesentlich zu beschleunigen vermögen.

Bei *allen drei Bauwerksgruppen* verspricht eine Belastungsvorrichtung besonders gute Dienste zu leisten, deren endgültige Formgebung unmittelbar bevorsteht. Es sind dies schwingende Gewichte, die im Takte mit den durch sie erregten Schwingungen der Bauwerke sich drehen. Verhältnismäßig kleine Gewichte vermögen große Brücken und Bauwerke in heftige Schwingungen zu versetzen. Das Maß des Kraftaufwandes und die Zeit, sowie die Anzahl Impulse bis zur Herbeiführung der maximalen Schwingungen werden als Wertmesser für die Güte des Bauwerkes und seiner Steifigkeit dienen können. Ja diesem Sinne sind auch Fallgewichte brauchbar.

Was die Meßinstrumente anbelangt, so ist zu unterscheiden zwischen solchen für statische und dynamische Messungen. Während für die statischen Messungen eine Reihe vorzüglicher Apparate vorliegt, die „im Laboratorium“ und „im Felde“ gleich gut gebraucht werden können, ist es mit den dynamischen Meßapparaten zurzeit noch nicht gut bestellt, obschon zu erwarten steht, daß nunmehr innerhalb annehmbarer Frist gute Fortschritte und vielleicht sogar ein gewisser Abschluß der Bestrebungen erzielt werden können.

Für *statische Messungen* kommen zurzeit sozusagen allein in Frage (Abb. 2): *für Einsenkungen*: Meßuhren ($\frac{1}{100}$ bis $\frac{1}{1000}$ mm Meßgenauigkeit) verschiedener Systeme für Kontakt mit ausziehbaren eisernen Stangen, oder zum Einlegen von

¹ Als klassisch ist der Modellversuch anlässlich des Baues der Britanniabrücke (England) anzusehen, in $\frac{1}{3}$ Naturgröße. Der Appenzeller Zimmermeister GRUBENMANN bediente sich meistens ebenfalls eines Modelles, um die Tragfähigkeit seiner kühnen hölzernen Brückenprojekte augenfällig zu machen. Als groß angelegte Modellversuche möchten wir die österreichischen Gewölbeversuche nennen und in der Neuzeit auch die Probe-Bogenstaumauer in Kalifornien.

Drähten (am besten Invardrähten mit einem Durchmesser von 1,5 bis 2 mm); für *Winkeländerungen*: *Klinometer*, bestehend aus feinen, auf drehbaren Armen befestigten Libellen mit Trommel, an der etwa 1 bis 2" Drehwinkel ablesbar sind, sowie mit Zähler der Trommeldrehungen, montiert auf Kugelgelenkklammer; für *Dehnungen*: *Dehnungsmesser Okhuizen-Huggenberger* ($\frac{1}{1000}$ mm Längenänderung), und zwar für besonders geeignete, ausgewählte Beobachter das „Modell A“, mit Schneidenlagerung, und in anderen Verhältnissen „Modell B“ mit Zapfenlagerung der Hebel, und schließlich für die Feststellung von Dehnungen unter dem Eigen-gewicht, oder infolge anderer zeitlich sehr langsam verlaufenden Einflüsse: die Meßeinrichtung von Ingenieur MEYER, bestehend aus einem Invar-Zirkel, mit dem aus zwei Körnern auf ein Plättchen Striche geritzt werden, deren Abstände mit einem Meßmikroskop ($\frac{1}{1000}$ mm Meßgenauigkeit) festgestellt werden können.

Diese letztere, sehr einfache Apparatur hat sich bewährt und versprache für Messungen in großen Zeitabschnitten an den Bauwerken und im Laboratorium bedeutende Dienste zu leisten. Zur Vermeidung des Gebrauches eines Mikroskopes sind diese Zirkel auch so ausgebildet, daß sie in Verbindung mit einem Mikrometer gebraucht werden können.

Für dynamische Messungen können, zurzeit wenigstens, noch keine bestimmten Apparate als zweckmäßig und gut bezeichnet werden. In engerem Wettbewerbe stehen die Apparate (Abb. 3) für Dehnungsmessungen: ein Kohlenplättchenapparat (Coal-stick telemeter) des *Standard-Bureau in Washington*, in Verbindung mit einer Weathstone-schen Meßbrücke; und einem elektrischen Oszillographen; von *Fereday-Palmer*, der mechanisch-optisch vergrößert und photographisch registriert, und der rein mechanisch vergrößern und zeichnende *Apparat von Ing. Meyer*, an dessen

Entwicklung der Berichtstatter mitwirkt. Zu letzteren Apparaten gehört auch der GEIGERSCHE Spannungszeichner. Zu *Schwingungsmessungen* von einem festen Punkt aus, mittelst Invardrähten, werden *Schwingungszeichner* verschiedener Systeme gute Dienste leisten; ihre Konstruktion muß aber noch wesentlich verbessert werden, um Fehler erzeugende Massenwirkungen nach Tunlichkeit zu vermeiden. Diese Arbeit ist im Gange. Sodann werden auch noch *Apparate, die nach dem seismographischen Prinzip* gebaut sind, verwendet werden können. Ihre Anpassung an die Bedürfnisse der Brückenbauer ist aber erst aufgegriffen. Es bedarf noch gründlicher Versuche, um auch diese Apparate ihrem Zweck entsprechend gut auszubilden. Ob noch andere Methoden, wie diejenige der unmittelbaren Photographie (Kinematographie für Einsenkungen, mikroskopische Photographien für Dehnungen) Erfolg haben werden, muß dahingestellt bleiben, indem zu beachten ist, daß die heftigen Erschütterungen, insbesondere bei

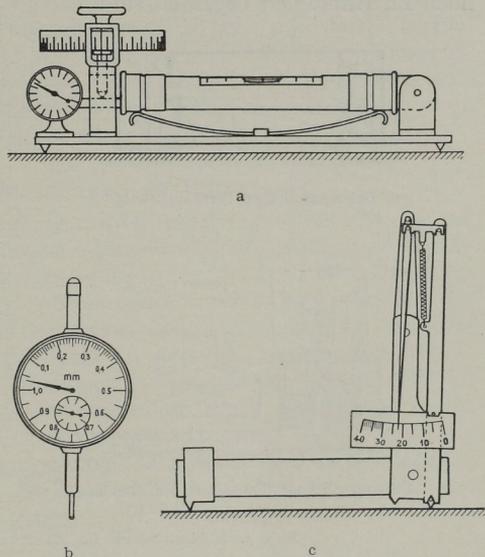


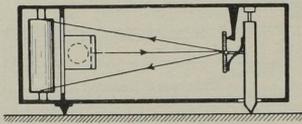
Abb. 2. Meßinstrumente für die statische Erprobung von Bauwerken

a Klinometer. b Meßuhr. c Dehnungsmesser mit Verlängerungsstange

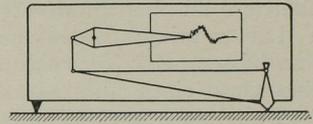
Brücken, auf die Meßapparate und ihre Wirkungsweise außerordentlich störend einwirken können.

Für *langsam verlaufende Bewegungen* mit einer Dauer von etwa $\frac{1}{2}$ bis 1 Stunde und mehr, z. B. bei Staumauern, hat sich in neuerer Zeit noch ein Verfahren als zweckmäßig und sehr genau herausgestellt, nämlich die geodätischen Vermessungen. Dank den Fortschritten im Bau von Theodoliten und Nivellierinstrumenten, die sich trotz der Steigerung der Genauigkeit in einer Verkleinerung der Abmessungen und einer bequemerer Handhabung äußern, ist es gelungen, Bewegungen bis zu $\frac{1}{10}$ mm nachzuweisen, bei Triangulationsseiten von etwa 20 m. Auch durch Nivellierungen lassen sich heute Höhenunterschiede von $\frac{1}{10}$ mm nachweisen.

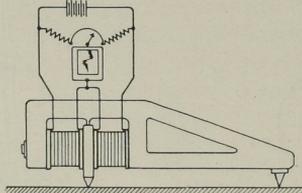
Zur Sicherung stets guter Meßergebnisse müssen die Apparate, gute Unterhaltung vorausgesetzt, von Zeit zu Zeit geprüft werden. Hierzu dienen Mikrometer, Kontrollibellen, Schütteltische, Okularschraubenmikrometer usw., die zum Teil noch im Entstehen begriffen sind.



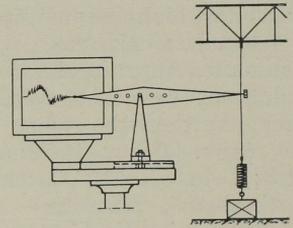
Dehnungszeichner Fere-day-Palmer



Dehnungszeichner Meyer



Dehnungszeichner (Telemeter) des Standard-Bureau, Washington (U. S. A.)



Durchbiegungszeichner

Abb. 3. Meßinstrumente für die dynamische Erprobung von Bauwerken

Zur Durchführung der Messungen bedarf es einer gewissen Übung. Schon die Aufstellung des Programmes muß mit Bedacht erfolgen und Rücksicht auf die Apparate, ihre Leistungsfähigkeit und die zu erwartenden Meßgrößen nehmen. Jeder Apparat hat gewissermaßen einen „toten Gang“ und ist mit inneren Reibungen behaftet; je kleiner der Meßwert ist, um so weniger genau wird das Ergebnis. Um daher zuverlässige Werte zu bekommen, muß der Apparat ein Vielfaches dieser Fehlergrenze laufen. Diese Abstimmung der Apparate (Änderung der Übersetzung, der Meßlänge u. dgl.) und die Wahl empfindlicher Beobachtungsstellen, wo große Meßwerte erzielbar sind, sind für den Erfolg der Messung von Bedeutung. Auch die Raschheit der Messungen spielt eine Rolle. Um die Einwirkungen der Temperaturänderungen auf Bauwerk und Meßeinrichtungen auszuschalten, oder möglichst zu vermindern, empfiehlt es sich, jede Meß-Serie so kurz als tunlich zu halten, oder dann dazwischen stets wieder sogenannte „Nullstellungen“ einzuführen.

Es ist daher meistens zweckmäßig, auch Temperatur und Zeitangaben neben den Beobachtungen zu notieren. Schließlich bildet die Ausgleichung der Meßergebnisse, ihre Auswertung und Darstellung eine oft mühevoll Arbeit; sie ist manchmal mit großen Schwierigkeiten verknüpft. Nicht alle Ingenieure und

Techniker eignen sich zu solchen Arbeiten und verstehen, richtige und vollständige Schlüsse, also ein Optimum aus den Meßergebnissen zu erzielen.

Die Auswahl guter Beobachter ist von Bedeutung. Es hat keinen Sinn und keinen Erfolg, feine Meßapparate ungeschickten Händen zu übergeben. Die Beobachter müssen die Apparate genau kennen und in der Handhabung geübt sein.

Die aus den Messungen zu gewinnenden Ergebnisse gehen aus dem folgenden Abschnitt hervor. Sie lassen sich kurz wie folgt umschreiben. Im allgemeinen kann die Elastizitätsziffer des Bauwerkes oder einzelner Bauelemente bestimmt werden, sei es aus Einsenkungen oder Drehwinkeln, im Vergleich mit rechnerischen Ergebnissen, wodurch das elastische Verhalten als Gesamtmittelwert zum Ausdruck kommt. Durch Dehnungsmessungen wird das örtliche Verhalten bestimmt, womit Unregelmäßigkeiten in der Arbeitsweise der Bauelemente usw. nachgewiesen werden können. Es ist erwünscht, in jedem Meßquerschnitte zahlreiche Apparate zu haben, einerseits, um Beobachtungsfehler besser ausgleichen zu können und die Sicherheit der Messung zu steigern, andererseits, um die oftmals nicht lineare Spannungsverteilung zu erfassen. Dynamische Messungen, von statischen Belastungen ausgehend, zeigen uns, um wieviel mehr die Bauwerke beansprucht werden, wenn sich die Lasten rasch und auf rauhen Bahnen über das Bauwerk bewegen.

II. Die Ergebnisse der Messungen an Bauwerken

Von den Messungen, die den Bauingenieur interessieren, und die für ihn bei der Projektierung von Bauwerken Bedeutung erlangen können, bringen wir nachstehend einen kurzen Auszug oder allgemeine Betrachtungen. Es betrifft dies alles Messungen, die in der Schweiz ausgeführt worden sind,¹ und zwar solche von der Sektion für Brückenbau bei der Generaldirektion der schweizerischen Bundesbahnen (SBB), von der Materialprüfungsanstalt an der eidg. technischen Hochschule (EMPA) Zürich, den Nordostschweizerischen Kraftwerken (NOK) Baden, den Herren Prof. Dr. JOYE, Freiburg, Bolomey und Paris, Lausanne, Herrn HÜBNER, Kontrollingenieur beim eidg. Eisenbahndepartement Bern, und der Sektion für Geodäsie beim eidg. topographischen Bureau (Sektionschef ZÖLLY, Ing.). Diese Darstellung wird das zuvor Gesagte erläutern und einen Begriff von der Mannigfaltigkeit solcher Messungen geben.

a) Bodenuntersuchungen

Dieser Zweig unseres Bauwissens dürfte vielleicht einer der ungepflegtesten sein. Erst in neuerer Zeit wird mit Nachdruck begonnen, dieses übrigens schwer zugängliche Gebiet genaueren Berechnungen zu eröffnen und die recht verwickelten Verhältnisse klarzulegen.

Einen interessanten Versuch haben die SBB im Jahre 1925, anlässlich der Verlegung der linksufrigen Zürichseebahn im Gebiete der Stadt Zürich ausgeführt, zur Bestimmung der Bettungsziffern, und zwar für Kies- und Sandboden in einem ungefähr 6 m tiefen Einschnitt, wo angenommen werden durfte, daß der Boden eine vollständig ungestörte Lagerung habe. Eine Fläche von 100×54 cm wurde sowohl lotrechten Belastungen, als auch Biegemomenten ausgesetzt und für die verschiedenen Laststufen aus den Einsenkungen und Winkeländerungen die Bettungsziffern berechnet. Obschon die Bettungsziffern (C) bei den verschiedenen Be-

¹ In diesem Bericht ist auf die Messungen an Bauwerken anderer Länder nicht näher eingegangen. Großes haben die amerikanischen Ingenieure geleistet, dann aber auch die französischen Ingenieure, die überhaupt den Grund zur Entwicklung der Meßtechnik an Bauwerken gelegt haben und schließlich möchten wir auch der deutschen, österreichischen und russischen Kollegen gedenken, die ebenfalls schon lange dieses Gebiet wissenschaftlich pflegen.

b) Massive Bauwerke aus Stein und Beton

Diese Bauwerke sind von jeher als außerordentlich steif angesehen worden, so daß Messungen an solchen Bauwerken lange als unnötig angesehen wurden. Man stellte sich vor, daß die zufällige Last nur einen sehr kleinen Bruchteil des Eigengewichtes ausmache, und schloß daraus, daß deren Einfluß verschwindend sei. Aber auch diese Bauwerke unterliegen leicht meßbaren Dehnungen, Formänderungen und Schwingungen. Nicht umsonst heißt ein indischer, philosophischer Ausspruch: „Das Gewölbe lebt.“

Daß die elastischen Auswirkungen meßbar geworden sind, liegt einerseits zum Teil daran, daß die Belastungen gegenüber früheren Zeiten bedeutend angewachsen sind, andererseits ist zu beachten, daß die Abmessungen sparsam und immer mehr genau nach statischen Grundsätzen gewählt werden, wodurch die Bauwerke vielfach schlanker ausfielen und sich mehr von den oft außerordentlichen massigen alten Bauweisen entfernten. Indessen nicht immer mit Erfolg. Die Bewährung, die sich in geringen Unterhaltungskosten ausdrückt, wurde mit diesen Bestrebungen nach geringen Bauaufwendungen oft empfindlich herabgedrückt. Reine Stein- und Betonbauwerke bedürfen, besonders im Eisenbahnbetrieb, einer gewissen minimalen Masse, an die ihre Bewährung geknüpft ist, ansonsten die dynamischen Wirkungen der Verkehrslasten ihnen hart zusetzen. Darum ist es auch zu verstehen, daß jene schweren, aus der Anfangszeit der Eisenbahnen stammenden Steinbauten sich bis in unsere Tage schadlos hineinretten konnten, wenn das Steinmaterial wetterbeständig blieb und die Entwässerung samt Abdichtung gut ausgeführt wurde.

Welches ist aber das Maß der Erschütterungen, das unsere massiven Brücken, ohne Schaden zu nehmen, dauernd ertragen können? Hier besteht noch eine empfindliche Lücke in der Erfahrung, wenn es auch naheliegen könnte, die Skala der Erdbebenforscher heranzuziehen, um ein Urteil über den Einfluß der Schwingungen zu gewinnen. An einer größeren Zahl neuerer massiver Eisenbahnbrücken haben wir die Schwingungen festgestellt. Es wird sich später zeigen, ob diese mit der Bewährung in eine Beziehung gebracht werden können.

Aus den bisherigen Beobachtungen an solchen Bauten lassen sich immerhin verschiedene Schlüsse ziehen, und zwar hauptsächlich hinsichtlich der Elastizitätsziffern des verwendeten Stein- und Betonmaterials. Es ergaben sich z. B.:

	Tessinbrücke bei	Dazio Grande	$E = 250 \text{ t/qcm}$ (Granitmauerwerk)
		Tessinbrücke oberhalb	
		Giornico	$E = 335 \text{ t/qcm}$ (Granitmauerwerk u. Hinterbetonierung)
Aus Einsenkungs-	messungen bei der	Unteren Birsbrücke	
		im Kessiloch	$E = 350 \text{ t/qcm}$ } Granitmauerwerk
		Oberen Birsbrücke	
		im Kessiloch	$E = 440 \text{ t/qcm}$ }
		Selvacciabrücke,	
		Cenerilinie	$E = 312 \text{ t/qcm}$ (Granitmauerwerk)
		Robasaccobrücke,	
		Cenerilinie	$E = 372 \text{ t/qcm}$ (Granitmauerwerk mit Hinterbetonierung)
Aus Dehnungs-	messungen bei der	Sensebrücke bei	
		Thörishaus	$E = 270 \text{ t/qcm}$ (Betongewölbe).

Es ist allerdings nicht zu übersehen, daß diese E -Werte sich aus dem Vergleiche rechnerischer Einsenkungen oder Spannungen, bezogen auf die rein elastisch an-

genommenen bloßen Gewölbe, mit den beobachteten Einsenkungen oder Spannungen ergaben, in denen die Mitarbeit der Übermauerung sich naturgemäß stark geltend machen muß, im Sinne einer Erhöhung der E -Werte und Verminderung der Spannung. Die wirklichen E -Werte sind tatsächlich erheblich kleiner, ebenso die Spannungen; ihre genaue rechnerische Bestimmung ist aber meistens mit Schwierigkeiten verknüpft. Der Verfasser dieses Referates hat wohl zum ersten Male im Jahre 1918 diesen Umstand meßtechnisch bei der Linthbrücke in Schwanden verfolgt und ist dabei zu der Schlußfolgerung gelangt, daß die Formänderungen des flachen Dreigelenkbogens für ein $E = 140 \text{ t/qcm}$ mit der Berechnung übereinstimmten, und zwar erst für *alle* Belastungsfälle, wenn die Übermauerung auch in der Berechnung als mitarbeitend angenommen wurde.

Im Vergleich zu obigen hohen Werten von E bei gemauerten Gewölben, bei denen die Aufmauerung stark mitwirkte, ergaben z. B. Messungen an Granitkörpern (Urner Granit), daß E sehr schwankend ist und als Mittelwert etwa der Formel $E = 116 + 570 \times \sigma$ folgt (Maße in t und cm). Aus Biegeproben hergeleitet, fällt E auf unter 100 t/qcm .

Bei der Bemessung von massiven Bauwerken wird oft die Zugspannung in den Mauerwerksfugen als wichtig und für die Bemessung als bestimmend angesehen. Versuche haben ergeben, daß die Haftfestigkeit von Mörtel und Granit etwa 8 kg/qcm beträgt, während die Biegefestigkeit des Granites allein 84 kg/qcm und des Mörtels 35 kg/qcm ergab. Die übliche Zulassung von 3 bis 5 kg/qcm Zugspannungen dürfte daher gerechtfertigt sein.

Für die Ergebnisse der Berechnung von massiven Bauwerken spielt besonders die Festsetzung der Ausdehnungsziffer für Temperaturänderungen eine große Rolle. Granitprismen mit und ohne Mörtelfugen ergaben im Wasserbad einen Wert $a = 0,000009$, der Fugenmörtel allein $0,000016$, also beinahe doppelt so viel, während im Petrolbade die Granitstäbe von $1 \times 3 \text{ cm}$ Querschnitt ein $a = 0,000007$ aufwiesen. Noch geringere Werte wurden bei Kalksandsteinen gefunden, und zwar $a = 0,0000045$.

Aus diesen wenigen Angaben läßt sich der Schluß ziehen, daß die nach Literaturangaben meist zu hoch bewerteten a -Werte vom Feuchtigkeitszustande, vermutlich aber auch von dem Druckzustand abhängig sind. Ein Bauwerk wird also mehr oder weniger beansprucht, wenn es neben einem Temperaturwechsel auch einen Wechsel im Feuchtigkeitszustand erleidet. Kennen wir diese Einflüsse genauer bei unseren Bauwerken? Mit nichten, wir kennen diese Erscheinungen nicht einmal ausreichend genau an unseren Baumaterialien auf Grund einfacher Laboratoriumsversuche, die auch den Einfluß der Zeit und des Druckzustandes zu berücksichtigen hätten. Wie wichtig die Bestimmungen der Ausdehnungsziffer (a), der Form und der Eindringungstiefe der Temperaturänderung (t) und schließlich auch der Bedeutung der Übermauerung bei Gewölben wären, zeigt sich bei der Berechnung jedes massiven Bauwerkes. Während Betonbauten infolge ihrer, die Rechnungsgrundlagen eher erfüllenden monolithischen Form tatsächlich reißen — oft allerdings unter dem schlimmen Einflusse des Schwindens¹ — wenn nicht Fugen angeordnet werden, ist dies bei Mauerwerksbauten anders. a , E und voraussichtlich auch t , infolge geringerer Wärmeleitungsfähigkeit der Fugen und der Struktur wegen, sind kleiner als bei

¹ Auch bei Massivbauten aus Bruchsteinen kann das Schwinden bedeutende Beträge erreichen, und zwar um so mehr, je mehr Mörtel für die Fugen benötigt wird, was besonders bei Bruchsteinmauerwerk der Fall ist. Bei sehr unregelmäßigen Bruchsteinen, wie z. B. bei denjenigen, die für die Pfeiler des Sitter-Viaduktes bei Bruggen (S.B.B.) verwendet wurden (sogenannter Schachengranit, ein hartes Konglomerat), stieg der Mörtelverbrauch auf 30 bis 40% des Mauerwerksmaßes, also mehr als bei Beton. Derartiges Mauerwerk muß „weich“, d. h. sehr elastisch ausfallen, weil überall kleine Hohlräume entstehen.

Betonbauten; ferner entfällt das Schwinden zum Teil, so daß die gemauerten Bauten durch Spannungsausgleich und bleibende Formänderungen selbst bei nachgiebigen Fundamenten sich gut halten können. Zeugnis hievon legen oft stark verbogene Stützmauern ab, ferner die interessanten Verbiegungen der Pfeiler der Brücken über den Rhein bei Eglisau und über die Sitter bei Bruggen (BT), bei denen Bogen-schübe im Verein mit der Zeitwirkung (20 Jahre) und den dynamischen Wirkungen, ausgelöst durch die Zugüberfahrten, Ausbiegungen der gewaltigen Pfeiler von 100 und 200 mm erzeugen konnten, ohne daß Risse entstanden. Hinzu kommt noch, daß insbesondere das mit hydraulischem Kalk erstellte Mauerwerk eine erhebliche Weichheit, also ein kleines \bar{E} besitzt, was auch in den oft schlecht ausgefüllten Fugen begründet ist.

SÉJOURNÉ in seinem Werk *Grandes Voûtes* sagt: „On fait une voûte d'après les voûtes faites, c'est affaire d'expérience“. Dies zeigt sich besonders bei Viaduktbauten, bei denen die Übermauerung auf die Gewölbe in außerordentlichem Maße lastverteilend und versteifend wirkt. Die Feinheiten der neueren Berechnungsverfahren gehen in den unerfüllten Annahmen verloren; ja ihre strenge Anwendung kann zu unrichtigen Maßnahmen Anlaß geben. Es können daher für solche ausgeführte Bauwerke sehr weit auseinandergehende Abmessungen festgestellt werden, ohne daß indessen die Bewährung auch in extremen Fällen darunter gelitten hätte.¹ Die Übermauerung, die notwendig ist, um die sonst allzu elastischen und durch Stöße in Schwingungen geratenden Gewölbe zu versteifen, ist eine den Wert der üblichen Berechnungen stark, ja ganz herabsetzende konstruktive Notwendigkeit.²

Obschon sehr zahlreiche massive Brückenbauten erstellt worden sind, ist über ihr wirkliches inneres Leben verhältnismäßig noch wenig bekannt; im meßtechnischen Sinne sind sie sehr vernachlässigt worden. Es wäre außerordentlich verdienstlich, wenn gründliche Untersuchungen in bezug auf die Werte α , E , t und den Einfluß der verschiedenen Formen der Übermauerung (voll oder mit Sparbogen) angestellt würden. Hiebei könnte auch das BEGGS'sche Modellverfahren wesentliche Dienste leisten. Infolge der Übermauerung arbeiten die Gewölbe mehr als Rahmen; durch ihre große Steifigkeit werden die Pfeiler stark entlastet. Zum mindesten bei gemauerten Gewölben scheidet weitgehende Berechnungskunstgriffe aus; die Gewölbe sind fähig, örtliche große Spannungen in längeren Fristen auszugleichen.

Ein weiteres, nicht unwesentliches, der Meßtechnik zugängliches Gebiet ist die Bestimmung der Lasten, die die Lehrgerüste bei ringweiser Ausführung der Gewölbe übernehmen, sowie ihres Einspannungsgrades. Es hat sich z. B. gezeigt, daß die Kämpfer der auf große Massivkörper aufgesetzten Gewölbe nicht als ganz fest eingespannt angesehen werden können, indem kleine Winkeländerungen bis zu 40'' nachgewiesen werden könnten. Auch beim Aufpressen von Gewölben (FÄRBER-FREYSSINET) ließen sich schon wertvolle Erhebungen durchführen; ebenso gelingt es leicht, Stoßwerte bei Eisenbahnbrücken nachzuweisen.

¹ Einer der die schlankesten Verhältnisse aufweisenden Viadukte dürfte der Lockwood-viadukt bei Huddersfield (England) sein, der 1846/49 erstellt, aus 32 Bogen von 9,12 m Weite besteht. Dieser kühne Viadukt ist 435 m lang und hat eine Höhe von 40 m; die Pfeiler haben oben nur 1,37 m Stärke, unten 2,22 m. Für diesen Bau wurden Bruchsteine verwendet. Die Gewölbe sind durch Längswände versteift.

² „De Haviland's arch“, Seringapatam, India. Es ist dies ein noch bestehendes Versuchsgewölbe, das von einem Ingenieur im Jahre 1808 aus Backsteinen erstellt wurde. Seine Spannweite beträgt zirka 30 m, die Pfeilerhöhe zirka 3,0 m, die Scheitelstärke zirka 1,2 m. Eine einzige, auf dem Scheitel des Gewölbes in Resonanz springende Person, kann bedeutende Schwingungen zustande bringen.

Ferner ist es auch nicht überraschend, daß durch die genaue Einmessung von schweizerischen Talsperren bereits in zwei Fällen, und zwar sowohl durch geodätische Messung, als auch mit Klinometern, festgestellt werden konnte, daß durch den ständig wirkenden Wasserdruck bleibende Durchbiegungen entstehen. Dies trifft sowohl für Schwergewichtsmauern, als auch für Bogenstaumauern zu (Abb. 5). Es wird sich daher empfehlen, bei Staumauern, wie es bei Brücken üblich ist, periodische Messungen vorzunehmen, um damit ein Maß für die Beurteilung ihrer Standsicherheit zu bekommen. Im Hinblick auf die durch den Bruch solcher Mauern frei werdenden, auf ihrem Weg alles vernichtenden Wassermassen, wären solche Messungen neben anderweitigen Prüfungen das Mindeste, was der Staat von den Eigentümern solcher Bauwerke im Interesse der allgemeinen Sicherheit verlangen sollte. Es wird künftigen Messungen noch vorbehalten bleiben, mittelst des MEYER'schen Apparates auch die Dehnungen an der Außenseite der Mauern zu verfolgen, während für das Innere die amerikanischen Telemeter (Standard-Bureau) zu verwenden sind.

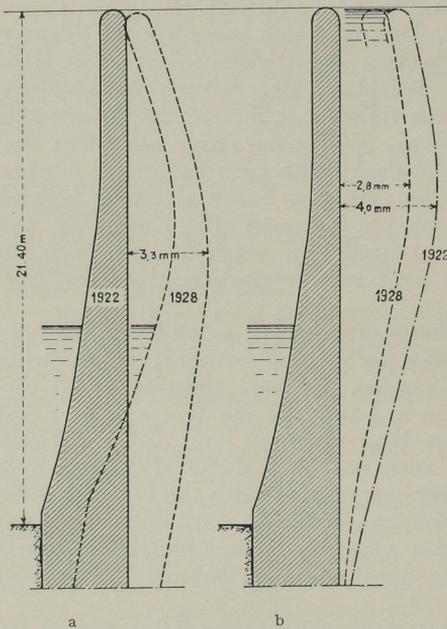


Abb. 5. Staumauer Pfaffensprung des Kraftwerkes Amsteg
a Bleibende Durchbiegung von 3,3 mm der Staumauer, zustande gekommen innerhalb der Jahre 1922/28

b Veränderung der Durchbiegung unter Vollast, und zwar 4,0 mm im Jahre 1922, 2,8 mm im Jahre 1928

(NOK). Die Auswertung der Beobachtungen wird erst erfolgen können, wenn eine längere Meßperiode abgelaufen ist. Es wird wichtig sein, zu wissen, wie sich die bei der Herstellung von Betonmauern entwickelnde Wärme bis zu 40° verteilt und nachher verflüchtigt und welche inneren Spannungen daraus entstehen werden. Es scheint nicht ausgeschlossen zu sein, daß diese Temperaturspannungen die auf übliche Weise berechneten Spannungen aus Eigengewicht und Wasserlast noch übertreffen werden. Herr Prof. Dr. JOYE der Universität in Freiburg (Schweiz) hat sich um die Entwicklung dieser Meßmethode sehr verdient gemacht.

Als weitere ingenieurtechnische Messungen sind jene in den Versuchs-Druckschächten in Amsteg und am Gelmersee-Handeck zu betrachten. Sie führten zu der Erkenntnis, daß bei dem anstehenden Gestein die elastischen und die bleibenden Formänderungen zu berücksichtigen sind. Die elastische Arbeitsweise des durch

die Stollen durchfahrenen Gesteins ist in den verschiedenen Durchmesserrichtungen veränderlich, so daß diesem Umstande durch bauliche Maßnahmen begegnet werden muß. Es zeigte sich auch, daß das Gestein nicht frei von Vorspannungen ist.

Die Formänderungsmessungen in den Stollen und Versuchsdruckschächten haben zu wertvollen Erkenntnissen und Schlüssen über die Frage der Druckschachtauskleidungen geführt.

Zusammenfassend darf daher gesagt werden, daß die Messungen an massiven Bauwerken erst am Anfange stehen. Eine Gesamtbeurteilung dieser Bauwerke ist zwar verhältnismäßig leicht anzugeben, da sie nicht so reich gegliedert sind, wie Eisen- und Eisenbetonbauwerke. Dafür bereitet die Beurteilung unregelmäßiger örtlicher Einflüsse große Schwierigkeiten. Je nach Bauart können sich die Lagen von Mitteldrucklinien selbsttätig verschieben und die Spannungen ausgleichen. In jungem Zustande sind die Bauwerke gegen Veränderungen in der Gründung nicht sehr empfindlich; sie können sich anpassen. Mit dem Alter werden sie steifer, die Temperaturkräfte werden größer, was nach erfolgter Anpassung ohne Belang ist. Wenn die Möglichkeit in statischer Hinsicht vorhanden ist, spielen sich daher Gründung und Bauwerk aufeinander ein, und zwar bei Mauerwerksbauten am ehesten.

c) *Eiserne Bauwerke*

Die bei eisernen Bauwerken durch Messungen zu lösenden Aufgaben sind außerordentlich zahlreich. Dank der Gleichmäßigkeit des Gefüges des Eisens und seiner für Zug, Druck und Biegung ziemlich gleichbleibenden Elastizitätsziffer sind solche Messungen sehr lehrreich. Neben der Abklärung von Einzelproblemen, wie z. B. der Nietungen, des Knickens mit und ohne Querbelastungen, der Fahrbahnen (Quer- und Längsträger), sowie der Einspannungen, Nebenspannungen und Zusatzspannungen in und quer zur Tragebene usw., kommt die *Nachprüfung der Arbeitsweise ganzer Bauwerke* in Frage. Diese letzteren Untersuchungen sind indessen sehr mühevoll und sind in der Schweiz erst bei einem Bauwerk, nämlich der Suldbachbrücke bei Mülmen durchgeführt worden. Es konnten dabei verschiedene Ergebnisse gewonnen werden, die von allgemeinem Interesse sind und nachstehend kurz zusammengefaßt seien:

a) Das Gewicht einer über einer Schwelle stehenden Achse wird nur zur Hälfte von dieser aufgenommen; die benachbarten Schwellen beteiligen sich zu je einem Viertel an der Lastübertragung.

β) Die Längsträger wirken als in vermindertem Maße durchgehende Träger, obschon die Anschlüsse nur aus Winkeleisen bestehen.

γ) Die gekreuzten Streben der Hauptträger nehmen die Querkräfte im Verhältnis zu ihren Querschnitten auf; die Gurtungen der Brücke arbeiten entsprechend Momentenlinien, deren Drehpunkt unter den Kreuzungspunkten der Streben liegt; die Untergurte sind durch die Fahrbahn und den unteren Windverband erheblich entlastet.

Hinsichtlich der *Lösung von Einzelproblemen* ist zu bemerken, daß diese Art von Untersuchungen viel rascher zu Ergebnissen und durch Messung an verschiedenen Bauwerken auch zu allgemeinen Schlüssen führt. Wenn nicht erhebliche Mittel zur Verfügung stehen, wird es auch stets gegeben sein, sich mit Einzelproblemen zu befassen, was übrigens auch in bezug auf andere Bauwerke gilt.

Einzelprobleme sind vielerlei in Angriff genommen worden, so wurde die Frage der Nebenspannungen, der Kontinuitätswirkungen bei Fahrbahnen, der Torsionsbeanspruchungen bei Kastenträgern von Unterwerksgerüsten und dgl. behandelt und einer Lösung entgegenzuführen gesucht.

Von den Ergebnissen möchten wir folgende anführen:

a) Die Größe der Nebenspannungen wurde von der Gruppe V der Technischen Kommission des Verbandes schweizerischer Brücken- und Eisenhochbaufabriken an einer großen Anzahl eiserner Brücken festgestellt. Die Ergebnisse konnten

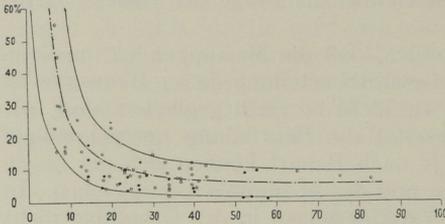


Abb. 6. Nebenspannungen bei eisernen Fachwerkträgern
Minimale und maximale Nebenspannungen in Prozent der Grundspannungen bei verschiedenen Verhältnissen der theoretischen Stablänge zum Abstand der Randfaser vom Stabschwerpunkt. Die Mittelwertkurve ist mit ——— bezeichnet. Die Meßwerte sind bezeichnet für Gurstäbe mit O, Streben mit ●

in einem Schaubilde zusammengefaßt werden, aus dem hervorgeht, daß die Nebenspannungen zwar erheblich sind, aber bei den heutigen Bemessungsverfahren in den meisten Fällen vernachlässigt werden können (Abb. 6).

β) Eine andere Untersuchung bezieht sich auf die Verteilung der Querkräfte bei mehrteiligen Strebenfachwerken. Die Ergebnisse sind in einem Berichte von Ingenieur MEYER zusammengefaßt. Dieser Frage sind auch Bruchversuche mit sechs großen Fachwerkträgern gewidmet, die auf einer besonderen Biegepresse ausgeführt worden sind.

γ) Durchgehende Längsträger können als solche berechnet werden, wobei, bei erheblicher Nachgiebigkeit der Stützung, die Tabellen von Prof. Dr. W. RITTER sehr gute Ergebnisse liefern.

δ) Bei Trägerdecken, die für Eisenbahnbrücken sehr viel vorgesehen werden, ist die Querverteilung der Belastung sehr weitgehend. Zur Sicherung des Zusammenhanges empfehlen sich Querbewehrungen.

ε) Untersuchungen über die Stoßwerte bei eisernen Brücken. Ihre zutreffende Festsetzung mit Rücksicht auf Stützweite, Bauart (Gliederung und Fahrbahn), Belastungslänge, schwerste Achsen, Geschwindigkeit, Bauart der Fahrzeuge usw., wird noch große Anstrengungen erfordern.

Im Laboratorium sind \square -Eisen in bezug auf den Schubmittelpunkt geprüft worden, während genietete Träger mit Lamellenpaketen noch der Untersuchungen harren, ebenso andere Bauelemente. Die Knickfragen werden im Laboratorium weiter untersucht. Erwünscht wäre die Prüfung des Knickens von Stabgruppen, da in den Bauwerken stets gegenseitige Einspannungen vorhanden sind.

Im allgemeinen ist die Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen einer eingehenden, auch Nebenumstände erfassenden Berechnung und denen der Messung an Eisenbauwerken befriedigend, öfters sehr gut, ja vollkommen, was das Zutrauen zu den sachgemäß berechneten und erstellten Eisenbauwerken zu einem beinahe unbeschränkten erheben darf.

d) Eisenbetonbauten

Messungen an Eisenbetonbauten sind nicht leicht auszuführen, will man neben Durchbiegungen und Winkeländerungen auch Spannungen (örtliche Dehnungen) messen. Wie sich dies bei einem größeren Versuchsmodell gezeigt hat, fallen Dehnungsmessungen am Beton und an den Bewehrungsseisen sehr unregelmäßig aus, wegen der Heterogenität des Betons und den frühzeitig einsetzenden Rissen. Es darf heute als feststehend angesehen werden, daß es keinen Eisenbetonbau gibt, der nicht zum mindesten Haarrisse aufweist; hinsichtlich seiner Bewährung hängt alles davon ab, daß das Bauwerk von solchen Rissen verschont bleibt, bei denen Frost, Rost oder andere Einwirkungen ihre verderbliche Wirkung beginnen können.

Von schweizerischen Messungen an Eisenbetonbauwerken sind zu erwähnen: solche an Rahmenbrücken zur Bestimmung der Lastverteilung im Quersinn, so-

dann an Eisenbetongewölben *ohne* Aufbauten, die noch zu ergänzen sind durch Messungen an den Gewölben *mit* Aufbauten, ferner an Pilzdecken, Behältern und Druckleitungen, sowie an Decken zur Bestimmung des Einspanngrades und an Versuchsbalken zur Bestimmung der Rißsicherheit bei Dauerbeanspruchungen.

Einige allgemeine, bei diesen Messungen gewonnene Ergebnisse seien nachstehend aufgeführt:

Bestimmungen von Elastizitätsziffern und Lastverteilungen im Quersinne:

Überführung der Bederstraße in Zürich ($L = 6,4 + 14,1 + 12,7$ m, Breite 18,4 m, 14 Träger): aus Einsenkungsmessungen $E = 250$ bis 380 t/qcm. Hiebei wurde $n = 8$ gesetzt und die Chaussierung mit $n = \frac{2}{3}$ eingeführt. Infolge der angeordneten mehrfachen Querverbindungen war die Lastverteilung bei Wagenlasten eine so gute, daß die unmittelbar belasteten Träger nur 16% der Last aufnahmen.

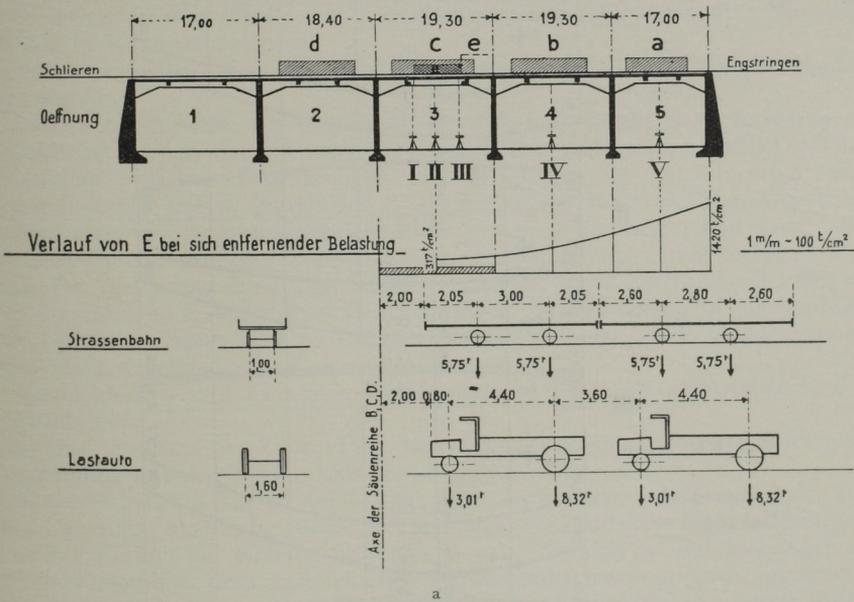


Abb. 7a. Überführung der Engstringenstrasse in Schlieren. Ergebnisse der Belastungsprobe a Bauwerksskizze, Belastungen, Belastungsfälle und Verlauf der Elastizitätsziffer

Die Berechnung solcher Objekte dürfte daher in weitgehendem Maße für verteilte Lasten erfolgen.

Überführung der Engstringerstraße in Schlieren (Abb. 7) ($L = 17,0 + 18,4 + 19,3 + 18,4 + 17,0$ m, Breite 12,0 m, 7 Träger): n wurde = 8 und die Straßendecke mit $n = \frac{1}{2}$ eingeführt. Es ergab sich, daß die E -Werte um so größer wurden, je weiter sich die Belastung vom Meßort entfernte (300 bis 1400 t/qcm), wofür als Ursache elastische Remanenzen, zeitliche, sowie andere versteifende Wirkungen in Frage kommen. Auch bei dieser Brücke war die Lastverteilung im Quersinne eine sehr weitgehende; sie betrug 20% Lastaufnahme für den unmittelbar belasteten Träger.

Überführung der Briggerstraße in Winterthur ($L = 18,0 + 26,7 + 20,5$ m, Breite 8,10 m, 6 Träger). Mit $n = 8$ und Berücksichtigung der Straßendecke zu $n = \frac{2}{3}$ ergaben sich für $E = 240$ bis 290 t/qcm. Die Lastverteilung im Quersinne war

sehr gut; bei Verhältnissen von $\frac{\text{Stützweite}}{\text{Breite}} \geq 2$ kann die Querverteilung der Lasten nach linearem Gesetze vorgenommen werden. Dampfwalzen auf Kleinsteinpflaster ergaben Stoßwerte bis zu 210/0.

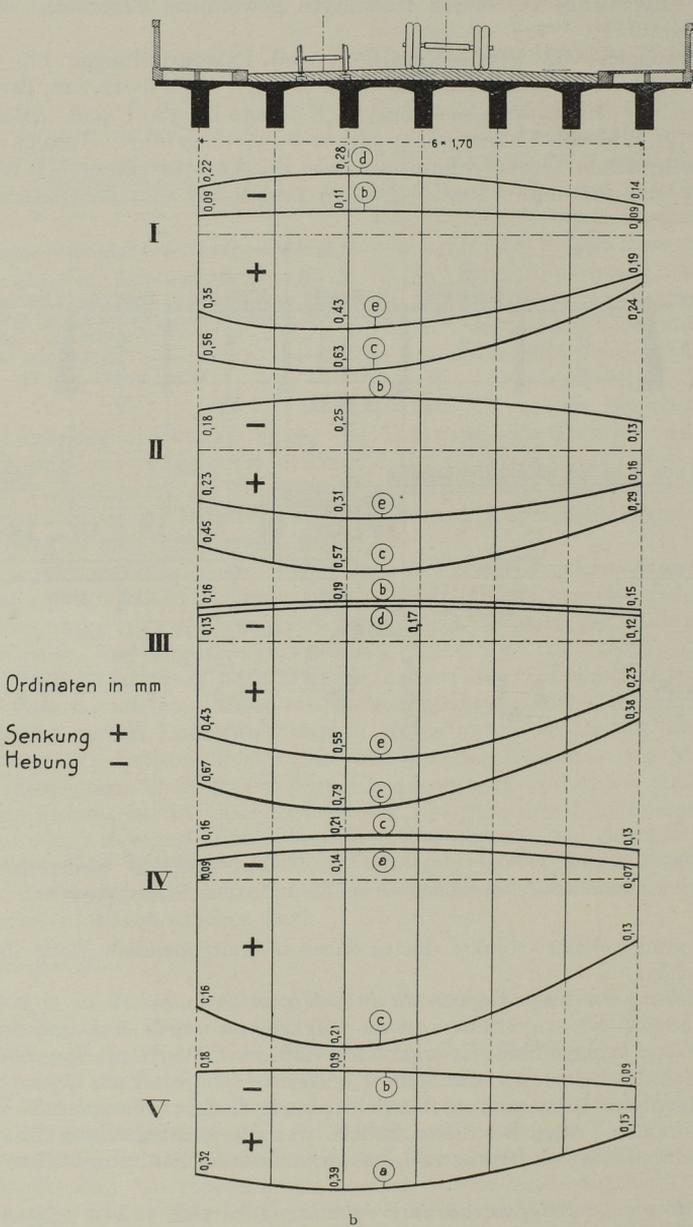


Abb. 7 b. Überführung der Engstringenstraße in Schlieren. Ergebnisse der Belastungsprobe
b Darstellung der Querdurchbiegungskurven in den Öffnungen 3 bis 5 und für die Laststellungen a bis e

Ähnliche Ergebnisse fanden sich bei der großen Überführung in Muttenz (Basel) mit Stützweiten von $15,0 + 23,5 + 20,3 + 13,0$ m bei einer Breite von 7,0 m. Bei den großen Überführungen der verlegten linksufrigen Zürichseebahn, mit Lichtweiten bis zu 24,0 m, die aus 1,0 m hohen Differdingerträgern als Rahmenbrücken erstellt wurden, fand sich E zu 200 bis 300 t/qcm, bei Berücksichtigung der Straßendecke.

Weitere eingehende Messungen hat die eidg. Materialprüfungsanstalt an gewölbten Eisenbetonbrücken ausgeführt, ferner an Pilzdecken und anderen Bauten.

Besonders ist auch noch auf die Messungen beim Reservoir Calvaire hinzuweisen, die von der Gruppe für Eisenbeton des Schweizerischen Ingenieur- und Architektenvereins durchgeführt und von Herrn Prof. PARIS (Lausanne) sehr eingehend ausgewertet wurden.

Es würde zu weit führen, auf Einzelheiten dieser und verwandter Messungen auch nur in Kürze einzutreten.

Zusammenfassend kann zu den Messungen an Eisenbetonbauten folgendes gesagt werden:

Eisenbetonbauwerke, die sachgemäß bewehrt und erstellt sind, verhalten sich als elastische Körper, deren Formänderungen leicht nachweisbar sind. Die Übereinstimmung zwischen Berechnungen und Messungen ist gut, insofern nicht Störungen durch andere Bauglieder (z. B. Aufbauten bei Gewölben, Überbeton, Straßendecken usw.) durch besondere Auflagerungen, Reibungen und andere Einflüsse sich geltend machen. Zum Teil lassen sich diese Umstände rechnerisch erfassen. Die Bedeutung der Rißbildungen (Haarrisse, statische Risse) wird sich nur durch langjährige, systematische Beobachtungen an Bauwerken in einwandfreier Weise beurteilen lassen; der rechnerisch ermittelte Wert der Betonzugspannung scheint nicht ausschlaggebend zu sein.

Bei Dehnungs- und Einsenkungsmessungen an Eisenbetonbauwerken sind zu berücksichtigen:

α) Das Alter und der Zustand des Bauwerkes (Betonierungsfugen, Schwinden) in Verbindung mit den Spannungen aus Eigengewicht;

β) die Dauer und Anzahl der Belastungen, sowie deren Geschwindigkeit (Zeiteinfluß, gesamte bleibende, elastische und sich rückbildende Formänderungen);

γ) der Einfluß der Heterogenität des Betons, die sich in Verschiebungen des elastischen gegenüber dem geometrischen Schwerpunkt, sowie in einem Spannungsausgleich zwischen Teilen geringer Festigkeit (kleines E) und Teilen größerer Festigkeit (großes E) äußern kann.

Die im Vergleich zu den Eisenbauten sehr verwickelten Verhältnisse bei Eisenbetonbauten rechtfertigen die Bestrebungen, durch Versuche im Laboratorium, auf der Baustelle und am Bauwerk selbst, nach Möglichkeit Licht und Erkenntnis über diese Bauweise zu verbreiten.

e) Holzbauten

Neben zahlreichen Versuchen zur Abklärung der Wirkungsweise von Holzverbindungen sind auch hölzerne Bauwerke meßtechnisch untersucht worden, so z. B. die nun abgebrochene hölzerne Eisenbahnbrücke über den Rhein bei Ragaz, bei der schon die üblichen Durchbiegungsmessungen erkennen ließen (Abb. 8), daß trotz der konstruktiv gut durchgeführten Kontinuität der Hauptträger dennoch eine wesentliche Abminderung dieser Wirkungsweise bestand. Unregelmäßigkeiten in der Arbeitsweise einzelner Bauteile (Querträger, Gurtungen, Streben) waren sehr ausgeprägt. Dasselbe fand sich bestätigt bei Messungen an der hölzernen Straßbrücke über die Limmat bei Wettingen.

Aus den bisherigen Messungen darf geschlossen werden, daß die Kräfteverteilung bei nicht ganz klaren Tragwerken eine unsichere ist. Die Formänderungen als Einsenkungen bestimmt, stimmen mit den theoretisch ermittelten Werten ziemlich gut überein, während die Dehnungsmessungen, als örtliche Untersuchung, unregelmäßige Ergebnisse zeitigen und auf Nebenspannungen und exzentrische Wirkungen schließen lassen.

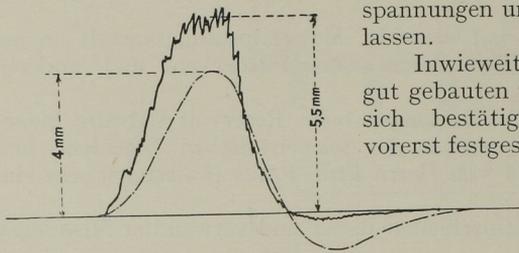


Abb. 8. Rheinbrücke bei Ragaz mit kontinuierlichen Howe'schen Fachwerkträgern über 6 Öffnungen von je 24 m Stützweite
 ——— Einsenkungsdiagramm bei einer Endöffnung
 - - - - - theoretisches Einsenkungsdiagramm bei voller Kontinuität

Inwieweit diese Feststellungen auch an neueren, gut gebauten und klar durchgebildeten Bauwerken sich bestätigt finden, muß durch Messungen vorerst festgestellt werden. Es wäre sehr erwünscht, wenn diese Lücke in der meßtechnischen Behandlung von Holzbauten noch geschlossen würde. Immerhin ist zu erwarten, daß die Heterogenität des inneren Holzaufbaues, die nicht vermeidbaren exzentrischen Wirkungen und die bei allen Holzverbindungen vorhandene erhebliche

Nachgiebigkeit stets einen ungünstigen Einfluß auf die Meßergebnisse ausüben werden, so daß die Erfassung der Umstände, die die Unterschiede zwischen Berechnung und Messung erklären können, nicht leicht oder unmöglich ist.

f) Schwingungsmessungen an Häusern und Türmen (Verkehrsbeben usw.)

Ein besonderes Gebiet der Messungen an Bauwerken bilden die Schwingungsmessungen an Häusern und Türmen, sei es z. B. infolge des Verkehrs (Verkehrsbeben) oder Maschinenwirkungen, sei es bei Türmen infolge des Glockengeläutes. Man hat es hier mit einer Aufgabe zu tun, die ein Grenzgebiet zwischen den rein ingenieurtechnischen Aufgaben und den Aufgaben der Erdbebenforscher darstellen. Ursache und Wirkung stehen dabei in so enger Verbindung, daß die Aufgabe und Auswertung der Messungen eher zu einer bautechnischen wird, auch aus dem Grunde, weil es sich um sehr heftige Schwingungen handelt, die die Apparate der Erdbebenforscher meist nicht richtig aufzeichnen vermögen, oder weil die Ausschläge so groß sind, daß eine Aufzeichnung Instrumente erfordert, die den Zwecken der Brückenbauer angepaßt sind.

Prof. Dr. RITTER hat schon im Jahre 1894 und 1895 mit einem FRÄNKEL'schen Schwingungsmesser den schlanken Kirchturm in Zürich-Enge untersucht. Es gelang, die Schwingungen genau aufzunehmen und sie auch zu erklären. Er fand die Elastizitätsziffer des Mauerwerkes zu $E = 153 \text{ t/qcm}$ (Bächler-Sandsteine) (Abb. 9). Eine Kontrollmessung der eidg. Materialprüfungsanstalt im Jahre 1926 ergab keine Veränderung der Verhältnisse.

Die EMPA fand im Jahre 1926 an den viele Jahrhunderte alten Türmen des Basler Münsters einen E -Wert von 56 qcm (Roter Vogesen-Sandstein).

In den letzten Jahren sind auch zahlreiche Messungen an Gebäuden in der Nähe von Eisenbahnlinien gemacht worden. Die Besitzer glaubten sich berechtigt, im Hinblick auf das zunehmende Gewicht und die vermehrte Geschwindigkeit der elektrisch geführten Züge, Mängel ihrer Gebäude auf diese Umstände zurückzuführen, und so auf die Bahnverwaltung abwälzen zu können. In allen Fällen konnte aber durch vergleichende Messungen gezeigt werden, daß die neue Betriebsart günstiger sei, als diejenige mit Dampflokomotiven. Dies darf den vollständig ausgewuchteten elektrischen Lokomotiven gutgeschrieben werden. Wichtig hat sich

auch erwiesen, daß die Schienenstöße gut unterhalten oder durch Verwendung langer Schienen an kritischen Stellen ausgemerzt werden. Ungünstig wirken schnell befahrene Weichenanlagen. Von großer Bedeutung wäre die Feststellung von Normalwerten der Erschütterungen des Bodens in Funktion des Abstandes vom

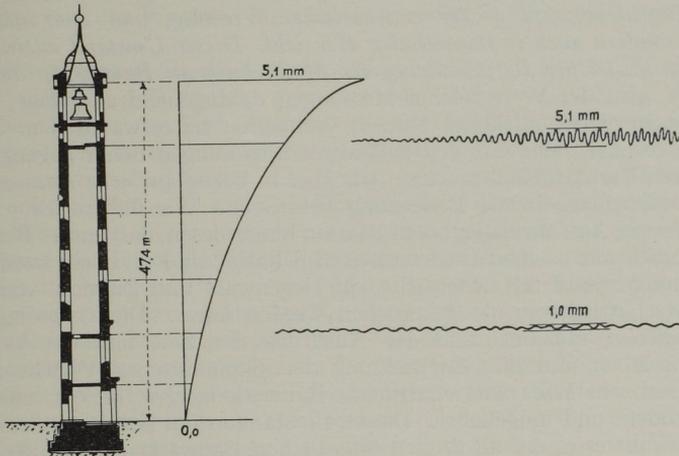


Abb. 9. Kirchturm Enge-Zürich

Ergebnisse der Schwingungsmessungen bei Resonanzerscheinungen des Glockengeläutes

Bahnkörper für verschiedene Untergrundverhältnisse und der Erschütterungen von Gebäuden in bezug auf die Beschädigungsmöglichkeit.

In dieser Beziehung sind auch die schweizerischen Lastkraftwagenbesitzer an der Arbeit, um ihre Interessen wahrzunehmen.

III. Wert der Messungen an Bauwerken

Obschon die Messungen an Bauwerken nur ein Mittel in der Hand des Ingenieurs sind, um sein Können und Wissen zu vertiefen, so ist es wohl eines der mächtigsten, das ihm erlaubt, seine Bauwerke vollkommener auszugestalten und dem Ziele, Berechnungen und tatsächliche Arbeitsweise in Übereinstimmung zu bringen und die Bewährung zu steigern, immer näher zu kommen. Die vorangehende gedrängte Darstellung der bisherigen Messungen dürfte ein Hinweis sein, wie diese Angelegenheit angefaßt und weiter entwickelt werden kann. Wir möchten aber betonen, daß auch in der Schweiz das Meßwesen eigentlich erst im Beginne der Entwicklung steht. Mit verhältnismäßig wenig Mitteln und Personal mußten neben dringenden Arbeiten die Meßtechnik gepflegt und die benötigten Apparate dazu gesucht und verbessert werden. Wenn trotzdem schon interessante Ergebnisse gefunden wurden, so ist das nicht zuletzt dem Zusammenwirken einer Anzahl gleichgesinnter Kollegen zu danken. Gestützt auf das bisher Geleistete, muß aber ein weiterer systematischer Ausbau der Messungen noch erfolgen, wozu auch die Mitarbeit der ausländischen Fachkollegen nötig ist.

Was nun die Messungen an Bauwerken selbst anbetrifft, haben diese auf die mit Projektierungsarbeiten beschäftigten Ingenieure einen besonderen, heilsamen Einfluß. Die Feststellung, wie erheblich theoretische und gemessene Werte auseinandergehen können, legen es nahe, nur einfache Bauweisen vorzusehen, die wohl immer am wirtschaftlichsten sind und am besten halten und bei denen die für eine

Berechnung stets zu machenden Annahmen am ehesten zutreffen. Die Pflicht, die Unterschiede zwischen Beobachtung und Messung aufzuklären, führen dazu, der gegenseitigen Beeinflussung der Bauteile nachzugehen, oder dafür zum mindesten ein Maß zu gewinnen, was auf anderem Wege nicht möglich ist. *Auf Grund unserer Erfahrungen ist daher die Ausübung der Meßtechnik an Bauwerken für die beteiligten Ingenieure von großer erzieherischer Wirkung, und zwar nicht nur in praktischer, sondern auch in theoretischer Hinsicht. Dieser Umstand allein rechtfertigt es, erhebliche Mittel für die Ausübung der Meßtechnik an Bauwerken aufzuwenden.*

Vielfach wird der Wert solcher Messungen dahingehend ausgelegt, daß damit ein bedeutender wirtschaftlicher Nutzen verbunden sei, etwa in dem Sinne, daß an Material gespart, oder mit den zulässigen Spannungen höher gegangen werden könne. Diesen Verhältnissen möchten wir aber in bezug auf *neue Bauwerke* vorderhand keine ausschlaggebende Bedeutung beimessen. Wir haben schon im ersten Abschnitt unserer Ausführungen bereits darauf hingewiesen, daß unsere Berechnungsgrundlagen noch mit solchen Unsicherheiten behaftet sind und sein werden, daß in allen Beziehungen und mit Rücksicht auf Gegenwart und Zukunft von einer absoluten Wirtschaftlichkeit nie gesprochen werden kann. Die Grundlagen, deren wir uns bedienen müssen, sind der Ausdruck der Zeit und der Verhältnisse, in denen wir leben und die Entwicklung der ökonomischen Verhältnisse eines Landes können ein *heute* wirtschaftliches Bauwerk *morgen* in ein unwirtschaftliches verwandeln und umgekehrt. Dieser Umstände muß sich besonders derjenige Ingenieur bewußt sein, der an großen öffentlichen Bauwerken mitwirkt, deren Bestand die verhältnismäßig kurzfristige Zeit der schöpferischen Tätigkeit des Ingenieurs lange überdauert. So kann es z. B. weder vom Standpunkte des Privaten, noch von dem des Staates als wirtschaftlich angesehen werden, wenn, wie es bei Brückenbauten vorgekommen ist, innerhalb 70 Jahren ein Bauwerk infolge der Belastungszunahme dreimal ersetzt werden mußte, so daß heute die vierte Brückengeneration im Betriebe steht. Mit Rücksicht auf die Entwicklung der Anforderungen, z. B. der Betriebsmittel, können also heute wirtschaftlich erscheinende Bauwerke nach kurzer Frist unwirtschaftlich werden. Wer bürgt aber dafür, daß wir heute die Entwicklung der Betriebsmittel nicht überschätzen und früher oder später ein Rückschlag eintritt? Damit müssen wir erkennen, daß das Ziel des dauernd wirtschaftlichen Bauwerkes ein Phantom ist, das um so weiter entflieht, je mehr wir seine wahre Gestalt erfassen möchten. Wir ersehen daraus, daß unsere Bauwerke nur relativ wirtschaftlich sein können, gemessen an den heute gegebenen Belastungsgrundlagen. Es kann aber keinem Ingenieur ein Vorwurf gemacht werden, wenn er dabei eher leicht oder eher schwer baut. Neigen wir heute zu letzterem, so hat das seinen Grund darin, daß der teure Unterhalt und die Abnutzung der Bauwerke tunlichst hintangehalten, also die Bewährung möglichst gesteigert werden soll, die von jeher und auch noch heute nur mit kräftigen Bauwerken erkaufte werden kann.

Ganz anders liegen die Verhältnisse, wenn *bestehende Bauwerke* für erhöhte Belastungen zu berechnen und zu untersuchen sind. Hier können wir von festen Grundlagen ausgehen; Belastung und Bauwerk sind gegeben und nur noch die dritte große Unbekannte, die Frage nach den zulässigen Spannungen trübt die Sicherheit unseres Urteils. Gewisse engere Grenzen sind dafür allerdings vorhanden, wenn nicht sogar Vorschriften gestatten, sich auf bestimmte Werte zu stützen. In diesen Fällen leisten nun auf meßtechnischen Untersuchungen aufgebaute Nachrechnungen große Dienste, indem sie an den Berechnungen diejenigen Verbesserungen anzubringen gestatten, die sich auf Grund der Feststellung der wirklichen Arbeitsweise ergeben. Bei den zumeist in eher verwickelter Weise angeordneten älteren Bauwerken ist dies von erheblicher Bedeutung, so z. B. bei der Bestimmung der Querkraftverteilung auf vielfache Strebenzüge, bei Lastverteilungen auf

mehrere Hauptträger, von Einspannungen, der Schubregulierung von Bogenbrücken usw. In solchen Fällen kann ein unmittelbarer wirtschaftlicher Nutzen entstehen, wenn Verstärkungen umgangen oder günstige Verhältnisse nachgewiesen werden können, die durch die Berechnung allein nicht faßbar sind.

Damit kommen wir zum Schluß unserer Ausführungen, indem wir das Ziel, die Ergebnisse und den Wert der Messungen wie folgt in einigen Thesen zusammenfassen:

1. Die Messungen an Bauwerken sind geeignet, Theorie (Berechnungsmethoden) und Praxis (wirkliche Arbeitsweise) einander vollständig nahe zu bringen, die grundlegenden Versuche in den Laboratorien (die in kleinen und kurz dauernden Erprobungen bestehen) in denkbar bester Weise zu ergänzen und die Zulässigkeit der Übertragung solcher Ergebnisse ins Große, also auf Ingenieurbauwerke nachzuprüfen. Es wäre erwünscht, daß diese Bestrebungen überall Unterstützung fänden.

2. Die Messungen an Bauwerken machen den Ingenieur mit seinem Werk erst richtig bekannt und verschaffen ihm Anregungen und Belehrungen; die Auswertung veranlaßt ihn zu einfachem Bauen, sowie dazu konstruktiv richtige Lösungen anzuwenden und weist ihn darauf hin, auch untergeordnet erscheinenden Einzelheiten Aufmerksamkeit zu schenken. Damit und aus der zutreffenderen Beurteilung der wirklichen Verhältnisse entsteht bei der Projektierung von Neubauten ein großer Vorteil. Bei der Beurteilung bestehender Bauwerke kann die Meßtechnik unschätzbare Dienste leisten und sogar großen wirtschaftlichen Gewinn abwerfen.

3. Bruchversuche mit ganzen Bauwerken und Modellen, oder Überlastungen derselben geben hauptsächlich in Knickfragen wertvolle Aufschlüsse; sie können aber grundsätzlich entbehrt werden, da sie uns über den Sicherheitsgrad nicht mehr aussagen, als die Versuche an Bauwerken, in Verbindung mit Versuchen im Laboratorium. Die Sicherheit eines Bauwerkes ist nämlich eine Funktion der verschiedenen, vom inneren Aufbau abhängigen Dauerfestigkeiten der Materialien und wird damit zugleich abhängig vom Verhältnis und der Art der dauernden Kräfte (Eigengewicht) zu den veränderlichen Kräften (Belastungen) und von der Form der Bauelemente selbst. Da voraussichtlich für die Bewährung eines Bauwerkes die Einhaltung der Proportionalitätsgrenze (Eisen) oder dazu eines Erschütterungsmaßes (Massivbau, Eisenbeton) oder noch andere Gesichtspunkte ausschlaggebend sind, kann uns nur die genaue Beobachtung und Erforschung der Bauwerke diejenigen Wege weisen, die zu einer zuverlässigen Beurteilung derselben und damit auch zu einwandfreien Grundsätzen für Neubauten führen können.¹

Literaturangaben betreffend neuere schweizerische Messungen an Bauwerken

BÜHLER u. RUEGG: Die neue Linthbrücke bei Schwanden. Schweiz. Bauzeitung 1919, Nr. 7 v. 16. Aug. — DRUCKSTOLLENKOMMISSION SBB: Bericht 1923, Nov. — Prof. JOYE: Recherches sur les variations et la répartition de la température dans le barrage de Montsalvens. Fribourg 1923. — ZÖLLY: Trigonometrische Beobachtung der elastischen Deformationen der

¹ Diese Umstände würden nahe legen, nur noch wenige Bauwerktypen auszuführen, die dann aber nach allen Richtungen genau zu berechnen und konstruktiv vollständig abschließend durchzudenken wären. Es ist unendlich schade, wie viel Unzulängliches gebaut wird, meistens allerdings unter dem Drucke der Verhältnisse. Es gilt zum Teil auch im Ingenieurbau, was FORD in bezug auf den Häuserbau (Architekten) ausgesprochen hat. Da wir alle einer höheren Warte zusteuern, hoffen wir, es werden auch die in den verschiedenen Ländern noch bestehenden Unterschiede in der Denkweise der Ingenieure sich ausgleichen. Manche Anzeichen hiefür sind da. Es werden sich einst einheitliche Belastungsannahmen und Bemessungsregeln herauskristallisieren müssen, da die Bedingungen prinzipiell ja überall dieselben sind, obschon bis heute gerne stets das Trennende betont wurde, was gerade dem wissenschaftlich gebildeten Ingenieur schlecht ansteht.

Staumauer am Pfaffensprung, Schweiz. Bauzeitung, Nr. 3, 20. Jan. 1923. — Wyss: Beitrag zur Spannungsuntersuchung an Knotenblechen eiserner Fachwerke. Forschungsheft V. d. I., Nr. 262. — BÜHLER u. MEYER: Beschreibung von Apparaten zur Untersuchung von eisernen und massiven Bauwerken. Schweiz. Bundesbahnen Bern, 1924, 2. Aufl. — *Diskussionsberichte der eidg. Materialprüfungsanstalt*: Nr. 8, 14, 29. — *Schweizerische Ingenieurbauten in Theorie und Praxis* (Denkschrift zum 1. Internationalen Kongreß für Brückenbau und Hochbau), Zürich, Sept. 1926. Verlag Ernst & Sohn, Berlin. Aus diesem Werke sind besonders im Hinblick auf die Darstellung von Meßergebnissen zu erwähnen: ACKERMANN: Versuche mit Holzverbindungen. BÜHLER: Stoßwirkungen bei eisernen Eisenbahnbrücken. HÜBNER: Erfahrungen bei Versuchen an Bauwerken. MEYER: Spannungsverteilung in Füllungsgliedern von Brücken. Roš: Spannungsmessungen an der durch Steinschlag beschädigten eisernen Brücke der Chur-Arosa-Bahn; Nebenspannungen infolge vernieteter Knotenpunktverbindungen; Messungen an der hölzernen Straßenbrücke bei Wettingen; Messungen an den Eisenbetonbrücken bei Hundwil und Baden. STURZENEGGER: Meßergebnisse an der Isornobrücke der Centovallibahn. S. J. A. Prof. A. PARIS: Réservoir au Calvaire sur Lausanne (Bulletin technique de la Suisse romande 1928, Nr. 6/9). — SULZBERGER: Die Fundamente der Freileitungstragwerke und ihre Berechnung. Bull. d. elektr. Ver., Nr. 5 u. 7/1924, 10/1925, 6/1927. — MEYER-Roš: Gutachten über den Druckschacht Gelmersee-Handeck, 1927. — GASSMANN: Einige neuere Schwingungsmeßapparate. Schweiz. techn. Zeitschr., 12. April 1928. — STADELMANN: Temperaturscheinungen am Mauerwerk. S.-A. aus Hoch- u. Tiefbau, 1928. — MONTEIL: Die schweizerischen Untersuchungen der Bereifung von Motorlastwagen. Verband schweiz. Motorlastwagenbesitzer. Bern 1928. Mitwirkung der Beratungsstelle für Erschütterungsmessungen. Trüb, Täuber & Cie., Zürich 6. — NATER: Ergebnisse der Belastungsprobe des SBB Sitter Viaduktes. Vortrag am Brückenbaukongreß 1926, erscheint in der Zeitschrift Bautechnik.

Diskussion

Dr.-Ing. FRANZ FALTUS, Pilsen:

Als Beitrag zu den Ausführungen des Herrn Referenten sei es mir erlaubt, ein nicht alltägliches Beispiel von Messungen an einem hochgradig statisch unbestimmten

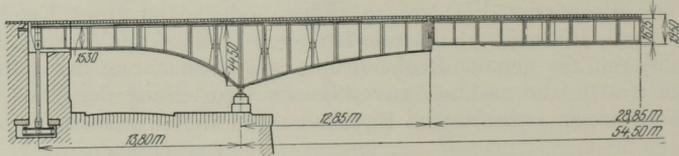


Abb. 10. Friedensbrücke in Wien, Längsschnitt

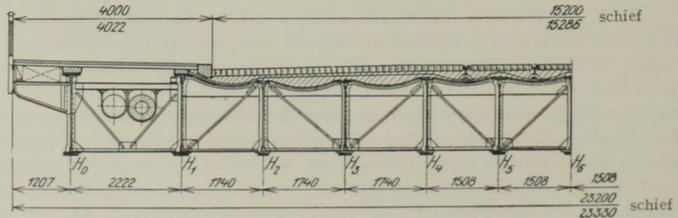


Abb. 11. Friedensbrücke in Wien, Querschnitt

Tragwerk zu erwähnen, und zwar die Kontrolle der Wirksamkeit der Querversteifung der neuen Friedensbrücke über den Donaukanal in Wien.

Abb. 10 zeigt im Längsschnitt der Brücke die vollwandigen gegerberten Haupt-

träger von 13,8 + 54,5 + 13,8 m Stützweite. Im Querschnitt (Abb. 11) ist die Anordnung der 13 Hauptträger ersichtlich. Die Fahrbahn wird ohne Vermittlung eines Querträgerrostes von Hängeblechen getragen, die an die vorstehenden Obergurt-

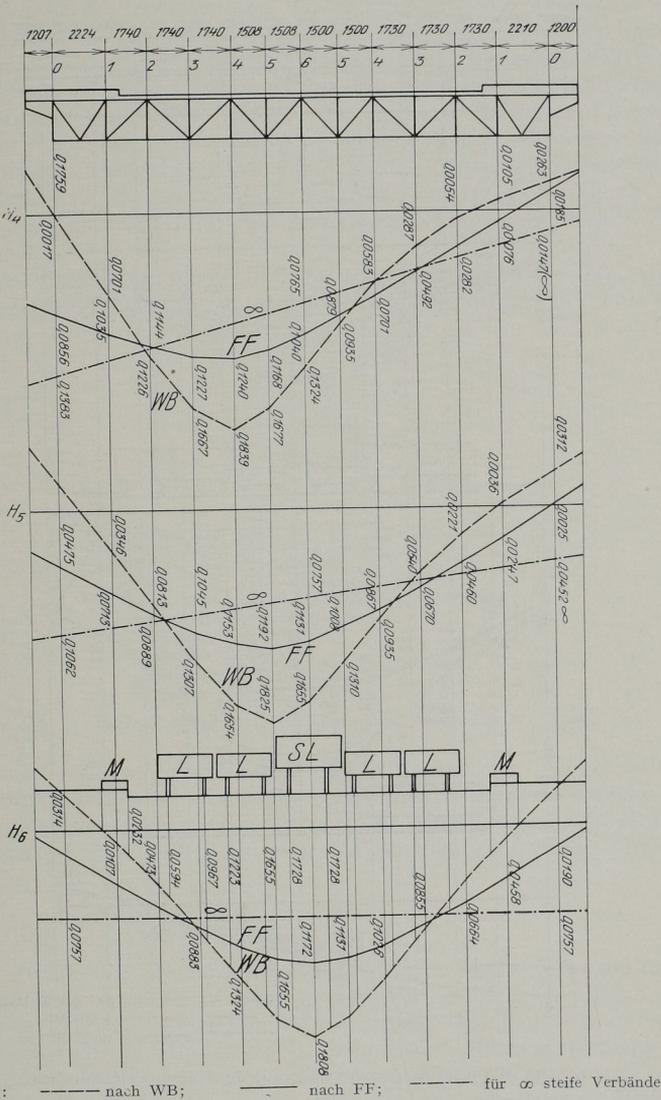


Abb. 12. Querverteilungseinflußlinien

lamellen genietet sind. Zur Sicherung einer guten Zusammenarbeit der Träger wurden steife Querverbände in Abständen von zirka 3,0 m angeordnet, deren lastverteilende Wirkung schon bei der Berechnung der Brücke schätzungsweise berücksichtigt wurde. Die Näherungsrechnung fußte auf der Annahme, daß jeder der Querverbände als Träger auf 13 elastisch nachgiebigen Stützen, nur die ihn unmittelbar treffenden

Lasten in der Querrichtung verteilt. Die gegenseitige Beeinflussung der Querverbände, die durch die einförmige Krümmung der Biegelinie der Hauptträger hervorgerufen wird, wurde zunächst nicht berücksichtigt.

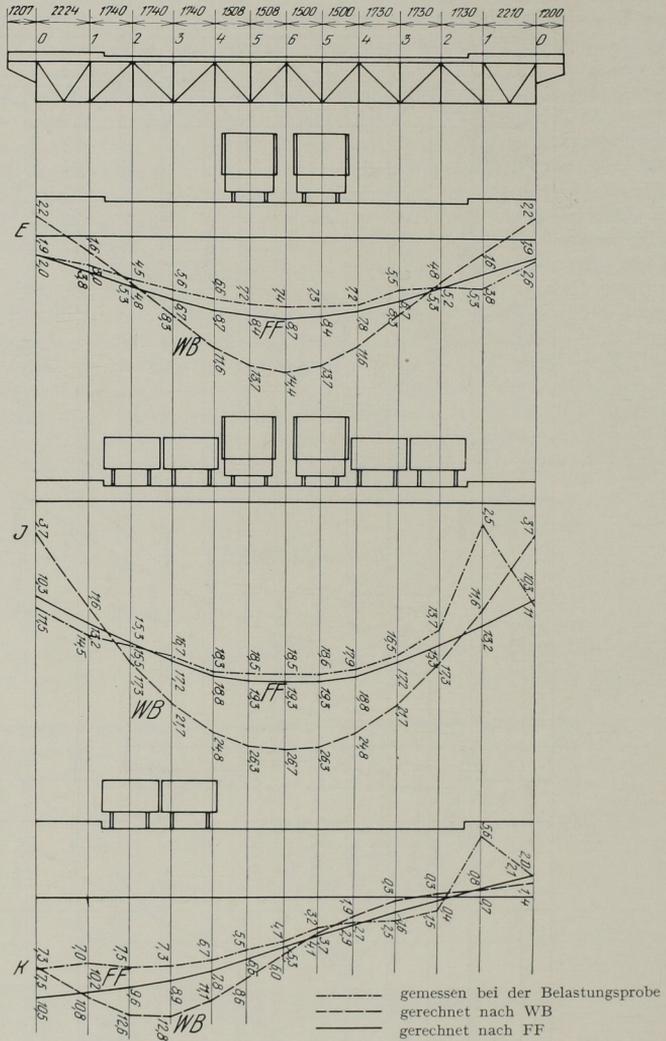


Abb. 13. Schaubild der Durchbiegungen in Brückenmitte. Maße in mm

Eine genauere Berechnung, die mit demselben Aufwand an Rechenarbeit zu erledigen ist, wurde im Bauingenieur¹ entwickelt und zur Neuberechnung der Einflußlinien der Friedensbrücke verwendet. In der Abb. 12 sind die Einflußlinien der Querverteilung nach der ursprünglichen Berechnung (WB) und nach der neuen

¹ Siehe FALTUS, Lastverteilende Querverbindungen, Zeitschrift „Der Bauingenieur“, Jg. 1927, S. 853.

Berechnung (*FF*) dargestellt. Der Unterschied beider Linien ist ganz beträchtlich. So würde z. B. der Träger H_6 von einer über ihm stehenden Last 18% zu übernehmen haben, während nach der genaueren Berechnung diesem nur 11,7% zufallen.

Über das *wirkliche* Verhalten des Tragwerkes gibt die Probelastung Aufschluß. Abb. 13 zeigt die für verschiedene Belastungen gemessenen und gerechneten Durchbiegungen der 13 Hauptträger in Brückenmitte. Die nach *WB* errechneten Durchbiegungen weichen sehr stark von den gemessenen Werten ab und entsprechen diesen nicht einmal qualitativ. Die Übereinstimmung der nach *FF* gerechneten Werte mit dem Ergebnis der Messung ist hingegen als befriedigend zu bezeichnen.

Es kann dies als Bestätigung der entwickelten Theorie und auch dafür angesprochen werden, daß die Berechnung von Stahlkonstruktionen auch bei hochgradiger statischer Unbestimmtheit für ruhende Belastungen zutreffende Ergebnisse zu liefern vermag.

Zum Schlusse sei noch auf die Abb. 14 verwiesen, in der die Maximalmomente für die für die Berechnung der Friedensbrücke vorgeschriebenen Verkehrslasten dar-

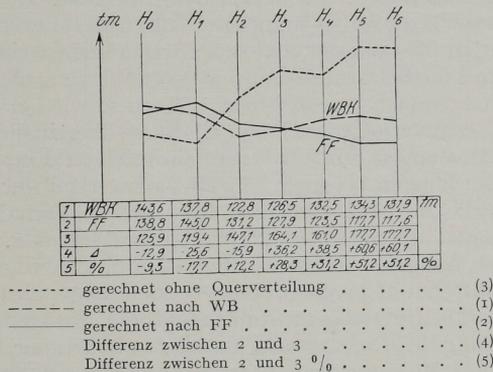


Abb. 14. Maximalmomente in Brückenmitte von Verkehrslast herrührend

gestellt sind, und zwar *mit* und *ohne* Berücksichtigung der Querverteilung. Zum Verständnis der Abbildung ist zu erwähnen, daß für die Mitte der Brücke besonders schwere Belastungen vorgeschrieben waren. Die Abminderung der Momente der mittleren Träger ist ganz bedeutend und der günstige Einfluß der Querverbände augenscheinlich.

Professor Dr.-Ing. L. KARNER, Zürich:

Ziel und Zweck von Messungen an ausgeführten Bauwerken sind zweifacher Art, einmal soll die technische Ausführung eines Baues überprüft werden, um durch Vergleich der rechnerisch ermittelten Werte der Spannungen und Deformationen mit den gemessenen die Richtigkeit der baulichen Durchführung nachzuweisen, zum anderen soll durch Messungen unter bestimmten Lasten, Temperatur usw. rück-schließende Grundlagen für die genaue Berechnung komplizierter Bauwerke gewonnen oder auch Fehler in den Berechnungsannahmen aufgedeckt werden. *Die Bewertung der Messungsergebnisse ist jedoch für beide oben angeführten Forderungen sehr von dem Baustoff bzw. der Bauweise abhängig.*

Im Eisenbau sind am ausgeführten Bauwerk alle Bemessungs- und Festigkeitswerte bekannt, Querschnitte und Trägheitsmomente können nachgerechnet und die Festigkeitswerte des Baustoffes geprüft werden, es ist somit möglich, die gewünschte Überprüfung der technischen Ausführung vorzunehmen, und bei entsprechender

Belastung ist auch der Nachweis möglich, daß das Bauwerk den gestellten Anforderungen entspricht. Ebenso kann das statische und dynamische Verhalten des Bauwerkes unter bestimmten Belastungsannahmen ermöglichen, theoretische Berechnungsgrundlagen zu überprüfen, sowie etwaige Fehler im Bauwerk durch Auswertung der Messungsergebnisse aufzufinden.

Im Eisenbetonbau sind im fertigen Bauwerk die Bemessungsgrößen nur mangelhaft zu bestimmen, da die aus verschiedenen Gründen auftretenden Rißbildungen, um nur ein Beispiel zu nennen, es verhindern, wirksame Querschnitte und Trägheitsmomente richtig in die Rechnung einzusetzen. Bei geringen Konstruktionshöhen, beispielsweise bei Platten spielt ferner die mehr oder weniger richtige Höhenlage der Armierung, die nicht nachprüfbar ist, eine bedeutende Rolle. Da auch die Festlegung der Festigkeitswerte infolge der Heterogenität des Baustoffes nur innerhalb weiter Grenzen möglich ist, können Messungsergebnisse an ausgeführten Eisenbetonbauten selten als absolut sichere Vergleichsgrößen zu den Rechnungswerten gelten. Die Messung kann daher höchstens den ersten Zweck erfüllen, die technisch richtige Ausführung angenähert zu überprüfen, während Rückschlüsse auf Berechnungsannahmen sowie die Aufsuchung von Fehlern im Bauwerk kaum möglich ist.

Um ferner aus den Messungsergebnissen an Bauwerken einwandfreie Schlüsse ziehen zu können, sind die Belastungen, unter deren Wirkung die Verformung untersucht wird, möglichst einfach anzunehmen. Genau so wie bei der Berechnung die Wirkung einzelner Lasten verfolgt und deren Einflüsse übereinander gelagert werden, so sollen auch bei Messungen tunlichst der Einfluß von Einzellasten untersucht werden. Beispielsweise können bei mehrteiligen Fachwerken nur durch Anbringung von Einzellasten wirkliche Aufschlüsse über das statische Verhalten solcher Trägerformen, über die dabei auftretenden Nebenspannungen usw. Aufschluß geben. Nebenher werden Belastungen durch verteilte Last und durch Lastgruppen, die den praktischen Verhältnissen entsprechen, immer noch angewandt werden, um die Eignung eines Bauwerkes ganz allgemein nachzuprüfen. Kommen wir daher auf die Schlußzusammenfassung des Referates A₄ zurück, so haben wir noch hinzuzufügen, daß die Bewertung der Messungsergebnisse an ausgeführten Bauwerken sehr vom Baustoff und der Bauweise abhängig ist. Rückschlüsse auf eine richtige technische Ausführung und auf richtige Annahme aller Berechnungsgrundlagen sind bei Stahlbauten viel genauer als bei Massivbauweisen, ebenso wie fehlerhafte technische Ausführungen oder fehlerhafte Berechnungsannahmen leichter bei ersterer Bauweise durch Messungen nachgewiesen werden können. Schließlich ist noch ganz besonders die Forderung aufzustellen, daß bei allen Messungen tunlichst einfache Belastungsfälle am besten durch Einzellasten den Messungen zugrunde gelegt werden, um ihre Wirkung auf die Verformung klar und eindeutig zu erhalten.

Direktor Dr.-Ing. KOMMERELL, Berlin:

Ich stimme mit Herrn BÜHLER darin überein, daß bei den dynamischen Beanspruchungen die Zeit eine sehr große Rolle spielt. Es ist aber sicher ein großer Unterschied, ob ich einen Stab in ununterbrochener Reihenfolge sehr schnell Zug- und Druckkräften aussetze oder ob ich ihn dazwischen wieder ruhen lasse. Ich halte es für fraglich, ob wir der experimentell nachgewiesenen Ermüdungsfestigkeit für unsere Ingenieurbauwerke eine so große Rolle beimessen dürfen wie der Maschinenbau, wo tatsächlich den Versuchen nahekommende Lastwechsel auftreten.

Die augenblicklich herrschende Berechnungsmethode, die dynamischen Einflüsse durch Beiwerte und die Einflüsse der Nebenspannungen und der Ungleichheit des Werkstoffes durch Annahme eines bestimmten Sicherheitsgrades — abhängig von der Streckgrenze des Werkstoffes — zu berücksichtigen, hat den großen Vorzug

der Einfachheit der Berechnung. So wichtig es erscheinen mag, bei unseren Brückenberechnungen auch die Gesetze der Dynamik anzuwenden, so muß man doch angesichts der ungeheuren Zahl von Bauwerken stets im Auge behalten, daß die Berechnungen nicht zu umständlich werden. Richtig scheint der Weg zu sein, durch möglichst feine Meßinstrumente und auch auf theoretischem Wege an charakteristischen Beispielen systematisch den dynamischen Einfluß unserer Fahrzeuge zu ergründen und womöglich in Einzeleinflüsse aufzulösen, damit man erkennt, ob wir alle Teile sicher genug oder ob wir einzelne Glieder nicht zu ungünstig berechnen. Dies muß dann auch dazu führen, die Anforderungen an die für die Praxis erforderlichen Meßinstrumente zu bestimmen. Es ist wohl möglich, daß wir bei unseren gewöhnlichen Brückenprüfungen mit viel weniger empfindlichen Meßinstrumenten auskommen; wir müssen aber erst mit den denkbar feinsten Instrumenten einen möglichst genauen Einblick in das Kräftespiel bekommen. Die feinen Instrumente sollen uns zur Eichung der für den täglichen Gebrauch bestimmten dienen.

Regelmäßig wiederkehrende Probelastungen, deren Meßergebnisse nicht ausgewertet werden, sind völlig zwecklos und zudem sehr teuer. Die Deutsche Reichsbahn ist daher schon seit längerer Zeit dazu übergegangen, Probelastungen nur noch bei neuen und verstärkten Brücken auszuführen. Die Ergebnisse werden den theoretischen Durchbiegungen, die an der Hand von Einflußlinien berechnet werden, gegenübergestellt.

An der Hand der Ergebnisse der bis jetzt vorgenommenen Messungen hat Herr BÜHLER eine Fülle von Aufgaben berührt, die ihrer Lösung und Erforschung harren. Auf dem Gebiet der Brückenmeßtechnik ist noch sehr viel zu tun und die Versuche kosten viel Zeit und Geld. Wenn auch sicher von großem Werte wäre, wenn sich verschiedene Forscher unabhängig voneinander mit den schwierigen Problemen beschäftigten, so glaube ich doch vorschlagen zu müssen, daß wir vorläufig die verschiedenen Gebiete, die Herr BÜHLER erwähnt hat, so aufteilen sollten, daß jedes Land sich zunächst auf ganz bestimmte Probleme konzentriert, und es wäre ein großer Gewinn unserer Tagung, wenn in dieser Richtung eine Verständigung stattfände.

Prof. Dr. Ing. M. ROß, Zürich:

Zur Bekräftigung der Ausführungen von Sektionschef A. BÜHLER über die Bedeutung der Messungen an ausgeführten Bauwerken nenne ich nachfolgend die Ergebnisse der von der Eidg. Materialprüfungsanstalt in den Jahren 1924 bis 1928 durchgeführten Verformungs- und Spannungsmessungen an zwei Gruppen hochgradig statisch unbestimmter Eisenbeton-Tragwerke:

1. Eingespannte Bogen,
2. Pilzdecken.

Die rechnerische Ermittlung der Spannungen und Verformungen so hochgradig statisch unbestimmter Tragwerke aus Eisenbeton ist äußerst zeitraubend und genau praktisch unmöglich. Desto wertvoller sind die Ergebnisse der Messungen am ausgeführten Bauwerk.

1. *Eingespannte Bogen.* In den Jahren 1924 bis 1928 wurden die weitgespannten Bogenbrücken über die *Urnäsch bei Hundwil*, Kanton Appenzell (Abb. 15), und über die *Limmat in Baden*, Kanton Aargau (Abb. 16), Versuchen durch Belastungen im Bogenscheitel und Bogenviertel unterzogen, einmal ohne (Abb. 17 und 18) und sodann mit Überbau (Abb. 15 und 16). Aus dem Vergleich der so gewonnenen Ergebnisse, erstens am dreifach statisch unbestimmten Bogentragwerk (Bogen ohne Überbau) und sodann am hochgradig statisch unbestimmten Bogenträger (Bogen mit Überbau) ist es möglich, auf die *entlastende Wirkung des Überbaues auf den Bogen allein*, so wie er berechnet und dimensioniert wird, zu schließen. Die Er-



Abb. 15

Hundwilertobelbrücke über die Urnäsch, Kt. Appenzell. Stützweite 105 m. Höhe über Talsohle 73 m. Nach eigenem Entwurfe erbaut von Ed. Züblin & Co. A. G. Zürich-Basel, 1924/25. Bauleitung: A. Schläpfer, Kantonsingenieur, Herisau

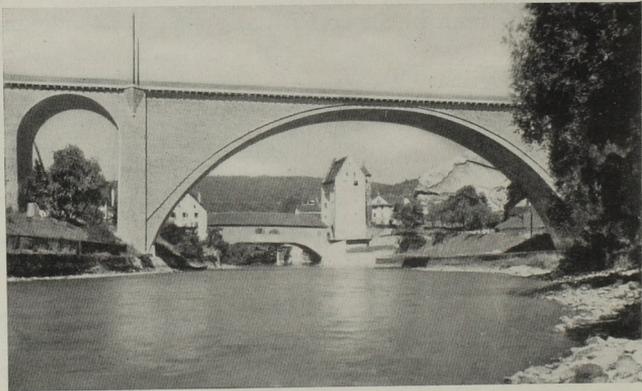


Abb. 16

Hochbrücke Baden-Wettingen, Kt. Aargau, 1925/26. Stützweite 68 m, Höhe über Wasserspiegel 28 m. Entwurf: J. Bolliger & Co., Ingenieurbureau, Zürich. Unternehmung: T. Bertschinger A. G. & Ingenieurbureau Rothplatz & Lienhard. Bauleitung: Kantonsingenieur E. Wydler

gebnisse dieser Messungen sind für die Hundwilertobelbrücke in den Abb. 19 und 20 und für die Hochbrücke Baden-Wettingen in den Abb. 21 und 22 zur Darstellung gebracht. Die Abb. 23 bezieht sich auf die im Jahre 1928 durchgeführten Messungen an der neu erbauten *Tavanasa-Brücke über den Rhein*, Kanton Graubünden (Abb. 24). Da diese letzteren Belastungsversuche nur am Bogen mit Überbau durchgeführt



Abb. 17

Hundwilertobelbrücke. Bauzustand Ende Dezember 1924

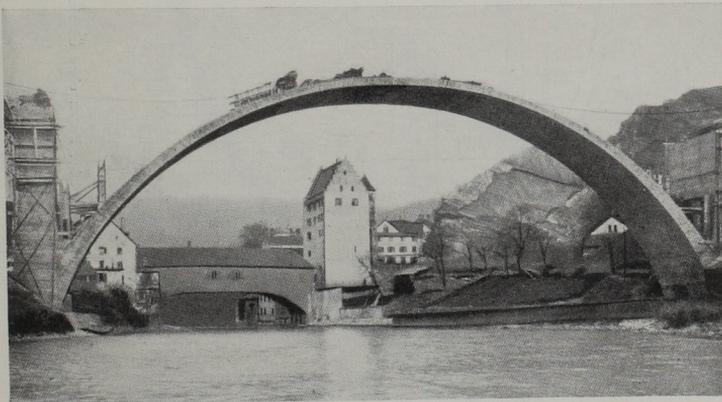


Abb. 18

Hochbrücke Baden-Wettingen. Bogen ohne Überbau

worden sind, ist aus den in der Abb. 23 eingetragenen Messungsergebnissen nur ein Vergleich zwischen den rechnerischen Verformungen und Spannungen des Bogens ohne Überbau und den wirklich gemessenen des Bogens mit Überbau möglich. Zufolge des Vergleichs der rechnerischen Spannungen mit den gemessenen für den Bogen ohne Überbau bei der Hundwilertobelbrücke und Hochbrücke Baden-Wettingen, welcher Vergleich eine praktisch gute Übereinstimmung zeigt, ist es zulässig,

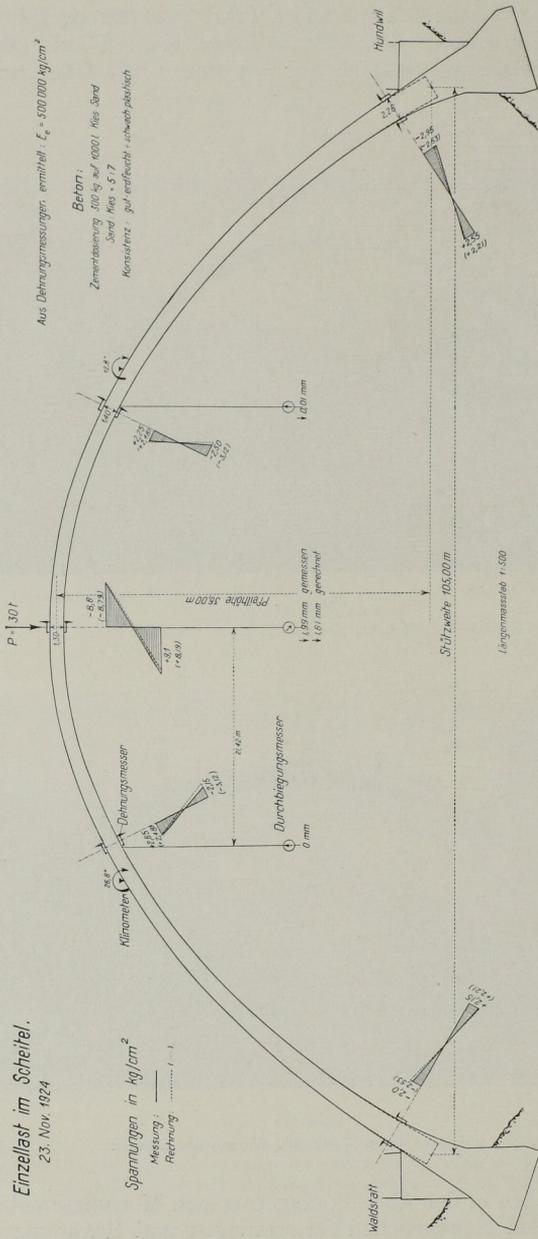
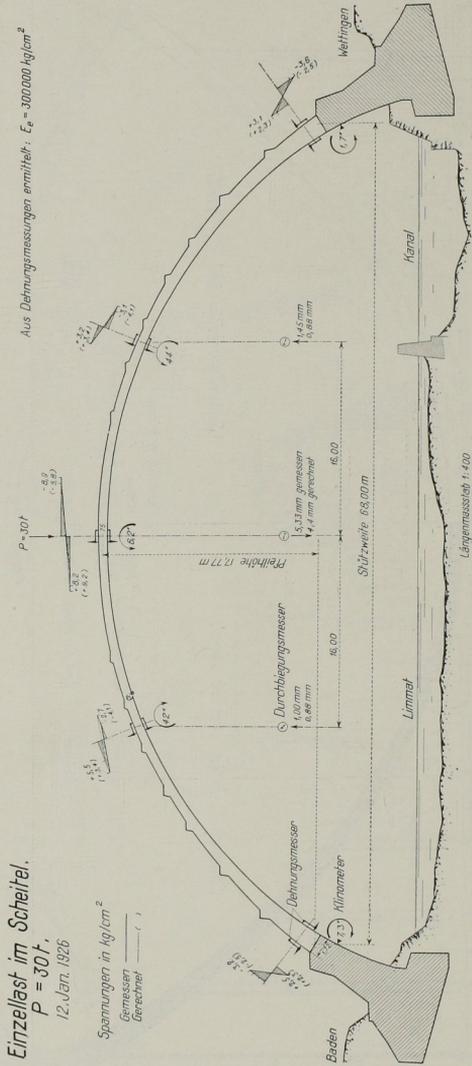


Abb. 19
Hundswilertobelbrücke. Bogen ohne Überbau, Einzelblatt $P = 30t$ im Scheitel. Messungsergebnisse

auch bei der Tavanasa-Brücke die erwähnten rechnerischen und wirklich gemessenen Werte gegenüberzustellen. Die weitgehende entlastende Wirkung des Überbaues auf den Bogen tritt deutlich in Erscheinung und sie ist je nach der Art der Ausbildung und der Steifigkeitsverhältnisse des Überbaues auch verschieden groß. In



Hochbrücke Baden-Wettingen. Bogen ohne Überbau. Einzelblatt $P = 30t$ im Scheitel. Messungsergebnisse
Abb. 21

Zahlen ausgedrückt belaufen sich diese auf die jeweiligen rechnerischen Größen bezogenen Entlastungen:

Hundwilertobelbrücke,

Größte Randfaserspannungen (Bogenscheitel, Viertel und Kämpfer)
Größte lotrechte Durchbiegungen (Bogenscheitel)

Entlastung
30 bis 60%
rund 50%

Hochbrücke Baden-Wettingen,

Größte Randfaserspannungen	75 bis 90%
Größte lotrechte Durchbiegungen	rund 95%
Größte Drehungen (Bogenviertel)	rund 90%

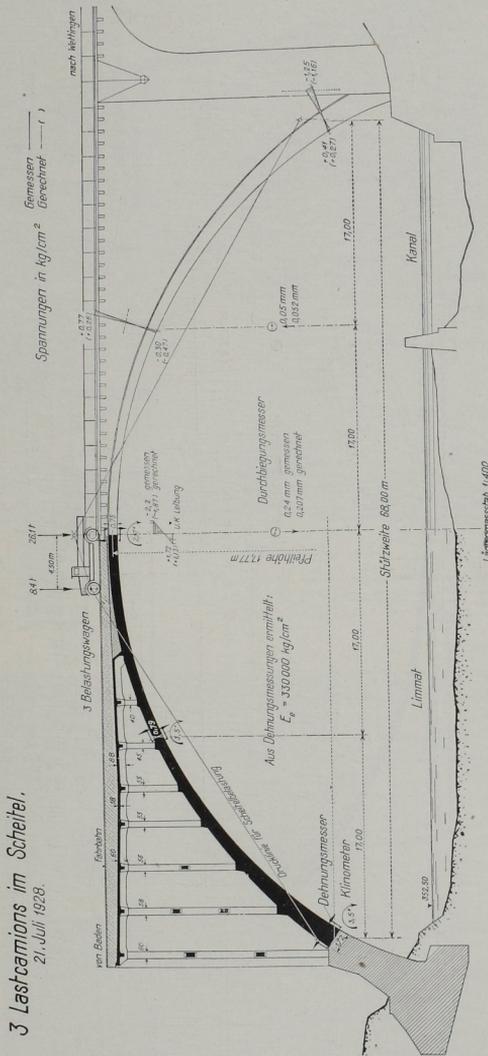


Abb. 22
Hochbrücke Baden-Wettingen. Bogen mit Überbau. 3 Camions im Scheitel. Messungsergebnisse

Rheinbrücke Tavanasa,

Größte Randfaserspannungen	50 bis 75%
Größte lotrechte Durchbiegungen	60%

2. Pilzdecken. Aus den in den Jahren 1925 bis 1927 durchgeführten eingehenden Dehnungs- und Durchbiegungsmessungen mit den Pilzdecken in Chiasso, Basel, Mülhausen (Elsaß) und Zürich (Abb. 25), wobei gleichmäßig verteilte Belastung



Abb. 24

Rheinbrücke bei Tavanasa. Ansicht. Entwurf: Ing. W. Versell, Chur. Bauunternehmung: B. & C. Caprez, Chur & Arosa.
Bauleitung: Obering. J. Solca, Chur

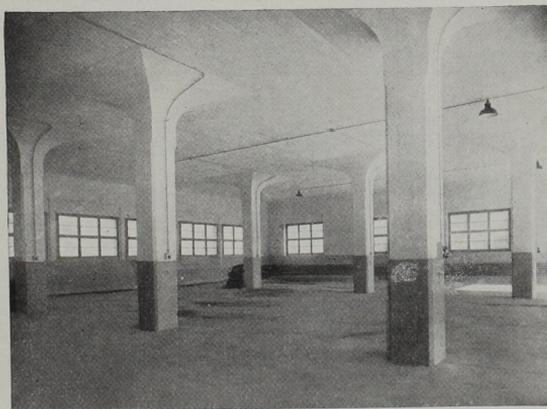


Abb. 25

Pilzdecken. Kehrlichtverbrennungsanstalt Zürich. Entwurf und Bauleitung: Ingenieur R. Maillart, Genf

ganzer Pilzdeckenfelder bis zu 2000 kg/qm, sowie wandernde Einzellasten bis zu 6,5 t zur Auswirkung gelangten (Abb. 26), kann auf Grund einer praktisch sehr gut brauchbaren Näherungsformel für die Durchbiegung in Feldmitte δ_m bei voller gleichmäßig verteilter Belastung p eines ganzen Deckenfeldes, dessen theoretische Stützweiten l_x und l_y betragen und dessen Trägheitsmoment von der Größe J ist,

$$\delta_m = \frac{p (l_x^4 + l_y^4)}{552 E \cdot J}$$

der Wert des Elastizitätsmoduls E ermittelt werden. Legt man den so errechneten E -Modul der Bestimmung der Randfaserspannungen aus den gemessenen Randdehnungen und somit der Ermittlung der Biegemomente zugrunde, so ergeben sich die in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellten Größtwerte der Momente für die Feldmitte (Feldmoment) und für die der Mitte zwischen den Säulen (Gurtmoment). Den so aus den Messungen abgeleiteten Momenten wurden die nach H. MARCUS rechnerisch ermittelten gegenübergestellt. Die Übereinstimmung ist eine sehr befriedigende.

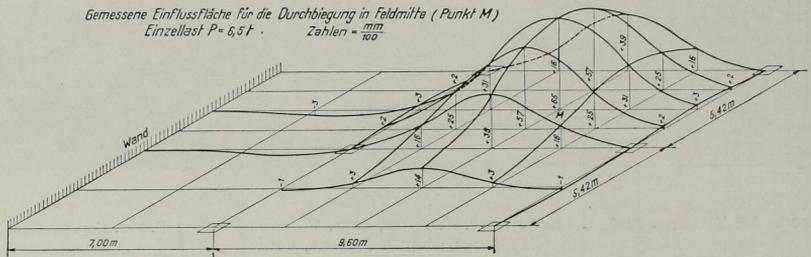


Abb. 26

Pilzdecken, Kehrlichtverbrennungsanstalt Zürich. Messungsergebnisse

Pilz-Decken

Ort	Zeit	Probe-Belastung		Nutzlast p	Plattenstärke	Feldweiten l_x und l_y	Gemessene bzw. abgeleitete Durchbiegung in Feldmitte f. Feldbelastung m. Nutzlast	Elastizitätsmodul	Beiwerte n M für Streifenbelastung $= \frac{p l^2}{n}$				Entwurf	
		t/qm	t						Feldmitte		Gurtmitte			
				t/qm	cm	m	mm	t/cqm	Mess.	Rech.	Mess.	Rech.		
Chiasso	X. 1925	2,0	2,0	23	5,0	5,2	3,1	169	37,4	33,6	24,6	22,4	R. MAILLART	
Basel	XI. 1926	2,0	2,0	22	5,0	4,3	1,7	243	34,6	32,4	21,6	21,6	Dr. M. RITTER	
Mulhouse	I. 1927		5,0	0,5	23	8,0	7,0	2,2	257	32,6	31,5	23,3	21,0	Dr. M. RITTER
Zürich	XII. 1927		6,5	1,0	29	9,6	5,4	2,1	389	26,8	31,7	24,0	21,1	R. MAILLART

BÜHLER:

Zu den Ausführungen der Diskussionsredner möchte ich zusammenfassend bemerken, daß ich die Auffassung von Herrn Reichsbahndirektor KOMMERELL (Berlin), die Dauerfestigkeit spiele bei der Bemessung keine Rolle, nicht ganz teilen kann, indem ansonst zahlreiche Brucherscheinungen bei älteren Brücken nicht erklärt werden könnten. Hingegen stimme ich mit ihm überein, was die dynamischen

Erscheinungen an den Brücken anbelangt. Es wird wohl unmöglich sein, diese stets und in allen Beziehungen in den Berechnungen zum Ausdruck zu bringen, weshalb es angezeigt wäre, zu international anerkannten Bautypen zu gelangen, um so mehr als es ausgeschlossen ist, bei der Fülle der Bauaufgaben alle Entwürfe „ab ovo“ stets gleich gut zu studieren. Auch die Bemerkungen betreffend die Meßapparate (einfache, die sich aus den feinsten Instrumenten herleiten lassen) halte ich für zutreffend.

Die Beispiele von Herrn Direktor Roš (Zürich) beweisen sicherlich die Wichtigkeit der Messungen an Bauwerken; sie zeigen ebenfalls deutlich, wie unvollkommen unsere Berechnungsmethoden eigentlich noch sind. Die Beweiskraft seiner Darlegung wäre indessen wohl ein Vielfaches, wenn nicht die Entlastung der Gewölbe, die uns weniger interessiert, als vielmehr die Mehrbelastung der Aufbauten angegeben worden wäre.

Die Anregung von Herrn Professor KARNER (Zürich) begrüße ich sehr. Als „Punkt 4“ der Schlußfolgerungen meines Referates könnte daher auch im Sinne der dortigen Darlegungen aufgenommen werden:

4. Der Wert der Messungen an Bauwerken ist derzeit noch ein relativer. Bei eisernen Bauwerken sind die Voraussetzungen der Theorie und Praxis am besten erfüllt, um sichere Schlüsse ziehen zu können. Bei den massiven Bauten sinkt die Sicherheit der Beurteilung erheblich, weil die wirksamen Querschnitte und Trägheitsmomente nicht genau zu ermitteln sind und die Voraussetzung der Homogenität der Materialien fehlt. Beim Holzbau wird der Wert durch die Nachgiebigkeit der Verbindungen und durch die vorerwähnten Umstände weiter herabgesetzt.

Zusammenfassend möchte ich daher feststellen, daß die Kongreßteilnehmer mit dem Inhalt meines Referates einig gehen und insbesondere den großen Wert der Messungen an Bauwerken anerkennen. Ich hoffe daher, daß das Meßwesen sich weiter verbreitet und daß insbesondere den jüngeren projektierenden Ingenieuren Gelegenheit gegeben werden möge, aus dem Bureau herauszutreten und das Werk, die Frucht ihrer Studien zu sehen, nachzuprüfen und so die Anregung und den Eifer zu Verbesserungen und Vervollkommnungen für neu zu erstellende Bauwerke heimzubringen. Wo es nötig ist, möge das Referat denjenigen eine Unterstützung bieten, denen bei der Anforderung der für solche Messungen erforderlichen Geldmittel etwelche Schwierigkeiten begegnen.

Professor Dr.-Ing. W. GEHLER, Dresden (Vorsitzender):

Wir danken nicht nur dem Herrn Berichtstatter, sondern auch den Herren Diskussionsrednern für ihre wertvollen Darlegungen. Unser Dank gilt vor allem den schweizerischen Fachgenossen, deren Versuche an Bauwerken als vorbildlich zu bezeichnen sind. Das von Herrn Roš vorgeführte Beispiel der Messungen an massiven Bogenbrücken, sowohl vor, als auch nach Aufbringung der Überbauten, sind besonders lehrreich. In erster Linie ist unser Ziel, zweckmäßige Bauwerke zu schaffen, selbst dann, wenn dadurch eine höhere statische Unbestimmtheit, ja sogar eine statische Unklarheit in Kauf genommen werden muß. Die Gewölbeaufbauten wirken nicht nur lastverteilend, sie sind auch günstig hinsichtlich der Stoßwirkungen. Sie verschleiern aber die Kraftwirkung oft derart, daß nur durch die Messung an Bauwerken selbst ein Aufschluß erzielt werden kann. Auch das von Herrn FALTUS aufgerollte Problem der Lastverteilung im Quersinn ist ein bemerkenswertes Beispiel für die Bedeutung der Messungen an Bauwerken.