

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, anerzogenen, 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 Kluff 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“.

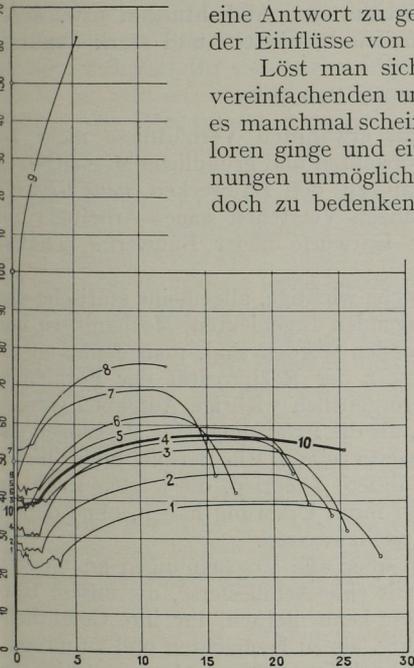


Abb. 1. Dehnungen (%/0) und Festigkeiten (kg/qmm²) von Baustählen

- | | |
|-----------------------|--|
| 1. Flußeisen (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 Eigengewicht, 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 GEIGER'SCHE 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

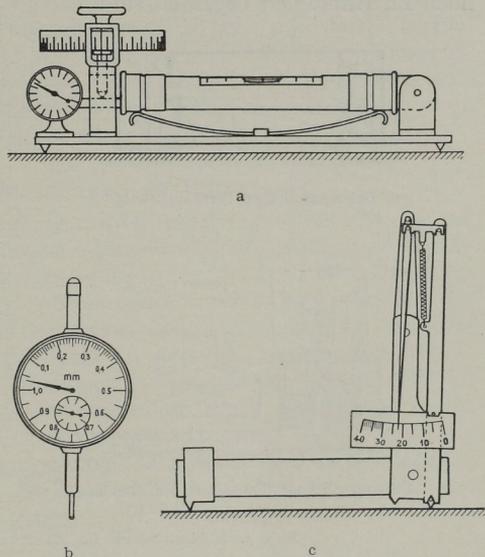


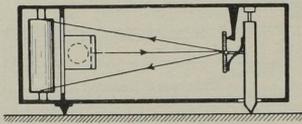
Abb. 2. Meßinstrumente für die statische Erprobung von Bauwerken

a Klinometer. b Meßuhr. c Dehnungsmesser mit Verlängerungsstange

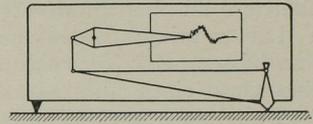
Brücken, auf die Meßapparate und ihre Wirkungsweise außerordentlich störend einwirken können.

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.

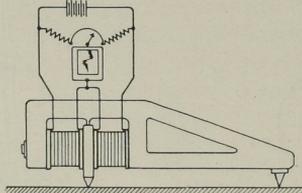
Zur Sicherung stets guter Meßergebnisse müssen die Apparate, gute Unterhaltung vorausgesetzt, von Zeit zu Zeit geprüft werden. Hierzu dienen Mikrometer, Kontrollibellen, Schütteltische, Okularschraubenmikrometer usw., die zum Teil noch im Entstehen begriffen sind.



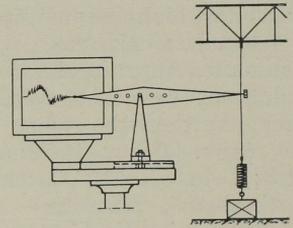
Dehnungszeichner Fere-day-Palmer



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 Auswertung der Meßergebnisse, ihre Auswertung und Darstellung eine oft mühevollen 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 rauen 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.