

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.

lastungen erheblich schwankten, konnte doch für kurze Zeit andauernde Belastungen ein Wert C von 100 bis 140 kg/qcm und für eine Laststufe von 0 bis 2,9 kg/qcm, bei vierzehnstündiger Wirkung, ein Wert C von bloß 20 bis 30 kg/qcm festgestellt werden. Diese Werte waren von Bedeutung für die Berechnungen von Rahmenbrücken für Straßen, die die zuvor genannte Linie überspannen; sie zeigen auch den Einfluß der Zeit und der Belastungen auf die Bewegungen.

Die Rahmenbrücken, wie noch andere Bauwerke, haben daher die Fähigkeit, sich dem Kiesboden anzupassen, so daß der Bodendruck günstig ausfällt, also sich gewissermaßen automatisch ausgleicht. Dieser Vorgang muß aber, wenn nötig, im Überbau berücksichtigt werden, wenn damit größere Änderungen im Kraftverlauf verbunden sind. Auch bei anderen Gründungsfragen mögen diese Verhältnisse von Einfluß sein.

Beim Bau von Kraftübertragungsleitungen mit stark gespreizten Masten wurden Ausreißversuche von Fundamenten zur Bestimmung der Standfestigkeit gemacht,

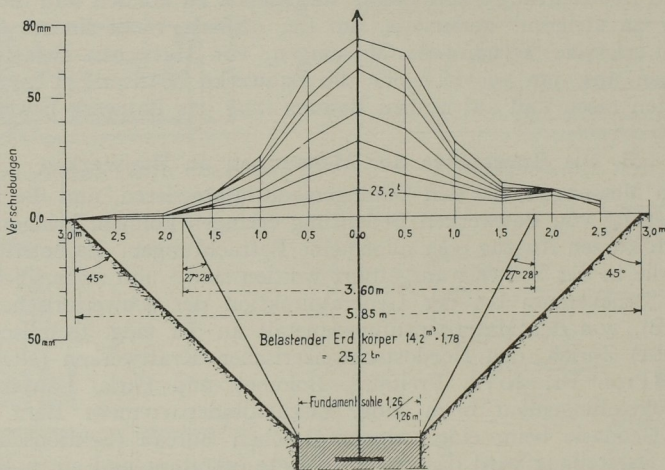


Abb. 4. Ausreißversuch bei einem Tragmastfundament in Mühleberg (1921)

die ergeben haben, daß ausreichend sicher gerechnet wird, wenn der Erdkegel über dem Fundament mit einem halben Öffnungswinkel von 5° bis 40° , je nach Bodenart und Einbauverfahren angenommen wird (Abb. 4).

In Verbindung mit der Revision der Vorschriften für elektrische Anlagen sind von der mit den Arbeiten betrauten Kommission umfangreiche Versuche mit verschiedenen Tragwerksfundamenten vorgenommen worden. Die Versuche beanspruchen allgemeines Interesse. Ihre Ergebnisse auch nur kurz zu erwähnen, würde zu weit führen. Es sei beigefügt, daß im Hinblick auf die beobachteten Formänderungen bei der Bemessung der Fundamente von einer zulässigen Mastneigung von $\frac{1}{100}$ ausgegangen wird und daß dafür und für verschiedene Bodenarten die erforderlichen, auf Versuchen beruhenden Angaben gemacht worden sind.

Im Zusammenhange damit sei noch bemerkt, daß vor einiger Zeit an der eidgen. technischen Hochschule in Zürich ein Erdbaulaboratorium eingerichtet worden ist, in dem Sonderfragen des Erdbaues genau geprüft werden können. Dieses Institut kann in Verbindung mit Versuchen an Bauten bei Fragen der Gründungen, des Tunnelbaues usw. große Dienste leisten.

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

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 scheiden 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.

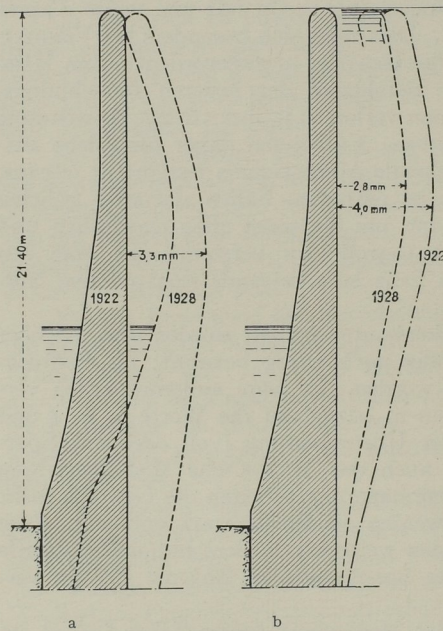


Abb. 5. Staumauer Pfaffensprung des Kraftwerkes Amsteg
a Bleibende Durchbiegung von 3,3 mm der Staumauer, zustande gekommen innerhalb der Jahre 1922/28

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

Als ein besonders interessantes und wichtiges Beobachtungsgebiet hat bei den Talsperren die Beobachtung der *Temperatureinflüsse* zu gelten, von denen sie ihrer Steifigkeit wegen sehr betroffen werden. Solche Messungen sind, wie bei den Brücken, schon verschiedentlich begonnen worden. Während bei Brücken noch mit billigen, gewöhnlichen Thermometern ein Auslangen gefunden werden kann, kommen bei Staumauern wohl einzig die Thermoelemente in Frage. Umfangreichere Temperaturmeßanlagen sind eingerichtet worden bei den Talsperren: an der Jogne (Montsalvens, Freiburgische Elektrizitätswerke), am Pfaffensprung des Kraftwerkes Amsteg (SBB), an der Barberine (SBB) und im Wäggital

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

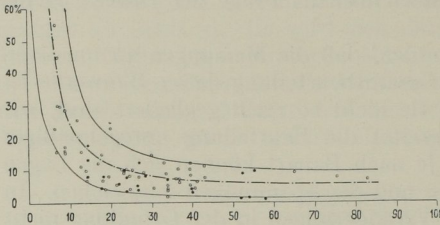


Abb. 6. Nebenspannungen bei eisernen Fachwerkträgern
Minimale und maximale Nebenspannungen in Prozent der Grundspannungen bei verschiedenen Verhältnissen der theoretischen Stablänge zum Abstand der Randfaser vom Stabschwerpunkt. Die Mittelwertkurve ist mit ——— bezeichnet. Die Meßwerte sind bezeichnet 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 Querkkräfte 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. Hierbei 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.

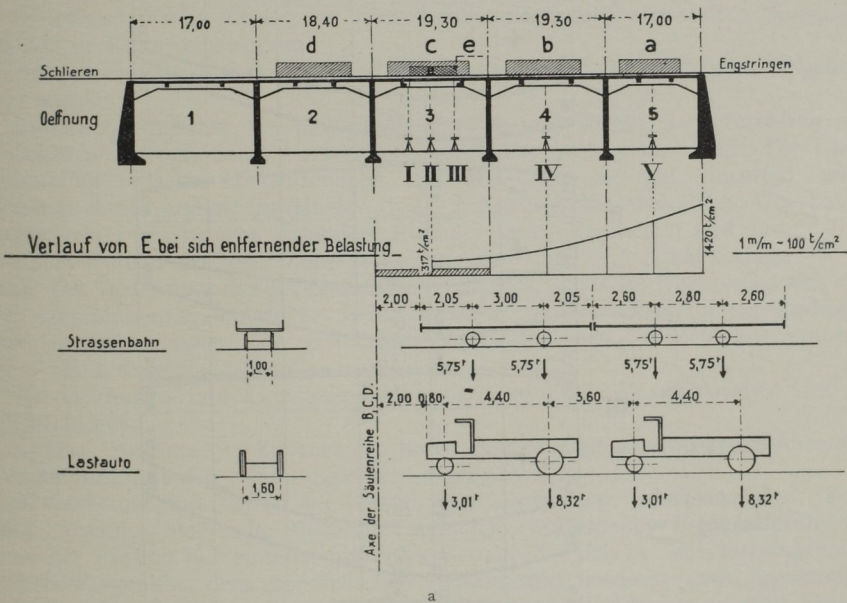


Abb. 7a. Überführung der Engstringenstrasse in Schlieren. Ergebnisse der Belastungsprobe a Bauwerksskizze, Belastungen, Belastungsfälle und Verlauf der Elastizitätsziffer

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.

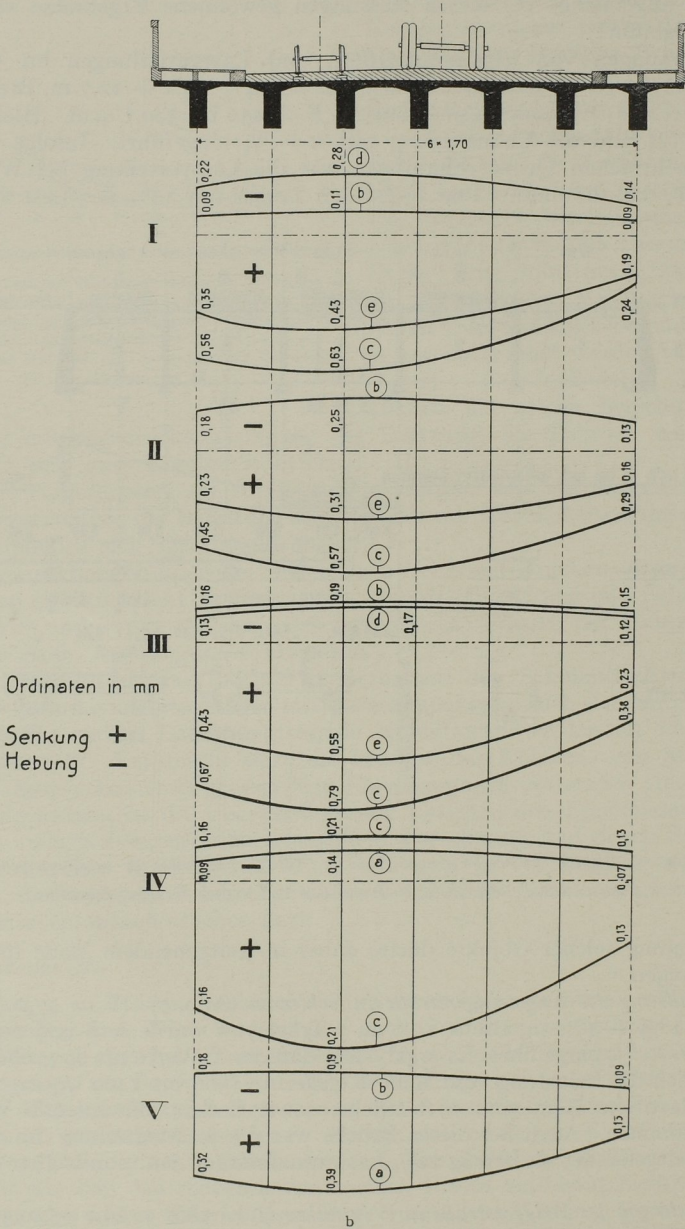


Abb. 7 b. Überführung der Engstringenstraße in Schlieren. Ergebnisse der Belastungsprobe
b Darstellung der Querdurchbiegungskurven in den Öffnungen 3 bis 5 und für die Laststellungen a bis e

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 Straßenbrücke 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.

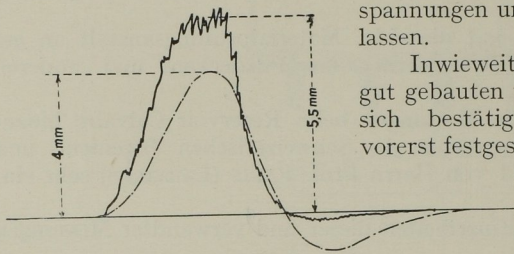


Abb. 8. Rheinbrücke bei Ragaz mit kontinuierlichen Howe'schen Fachwerkträgern über 6 Öffnungen von je 24 m Stützweite

— 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 (Verkehrsböden usw.)

Ein besonderes Gebiet der Messungen an Bauwerken bilden die Schwingungsmessungen an Häusern und Türmen, sei es z. B. infolge des Verkehrs (Verkehrsböden) 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

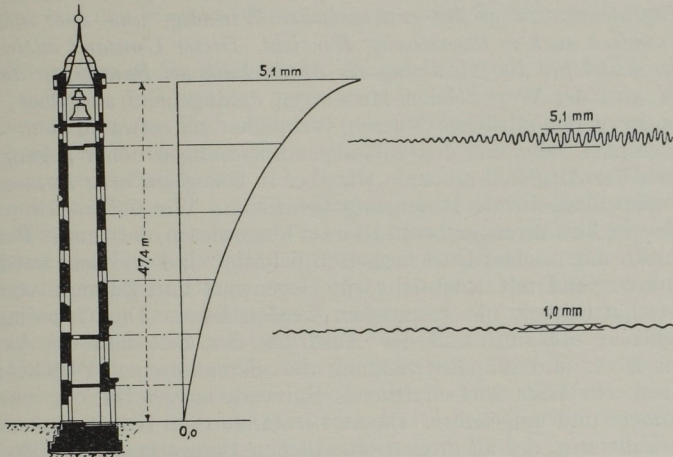


Abb. 9. Kirchturm Enge-Zürich

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