

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 80 (1962)
Heft: 43

Artikel: Photoelastische Untersuchungen an den Wehrpfeilern des Kraftwerkes Schaffhausen
Autor: Martinola, M.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-66250>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 22.02.2026

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

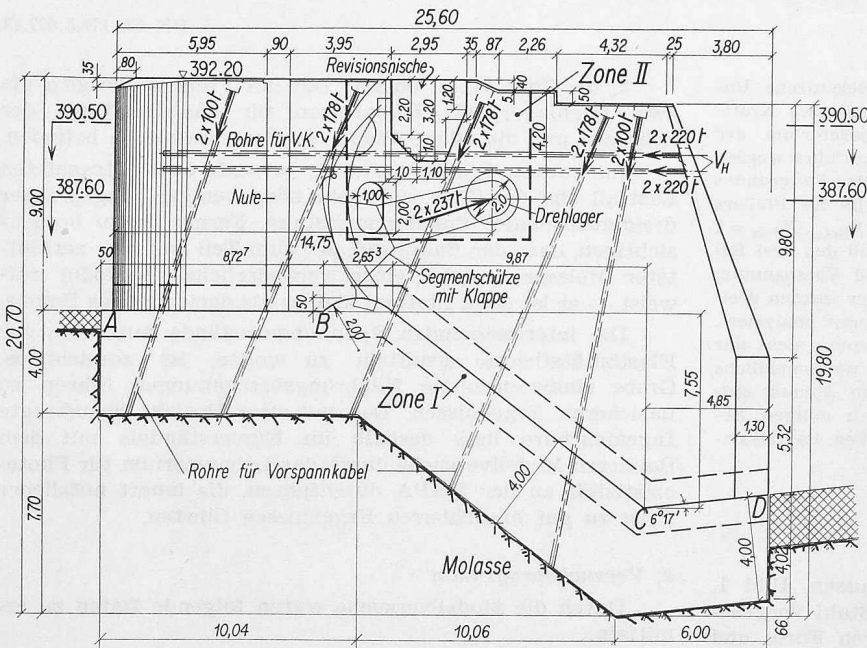
3. Wahl des Messverfahrens

Für unsere quantitativen Analysen kommt als Messmethode in erster Linie die Photoelastizität in Frage und zwar aus folgenden Gründen:

- sie gewährleistet die erforderliche Genauigkeit,
- löst vollständig und befriedigend zwei- und dreidimensionale Probleme,
- berücksichtigt mühelos jede Spannungsspitze,

- verlangt kleine, d. h. billige Modelle und infolgedessen auch einfache Belastungsapparate,
- gibt punktweise oder flächenweise Informationen,
- ist eine verhältnismässig einfache, rasch durchführbare und wirtschaftliche Methode von grosser Leistungsfähigkeit.

Die Bestimmung der Spannungen erfolgte in der Zone I infolge der symmetrischen Belastung punktweise mit Hilfe der rein optischen Methode von Favre [1]²⁾ und infolge des unsymmetrischen Wasserdruckes (Bild 5) mit dem Erstarrungsverfahren [2] [15].

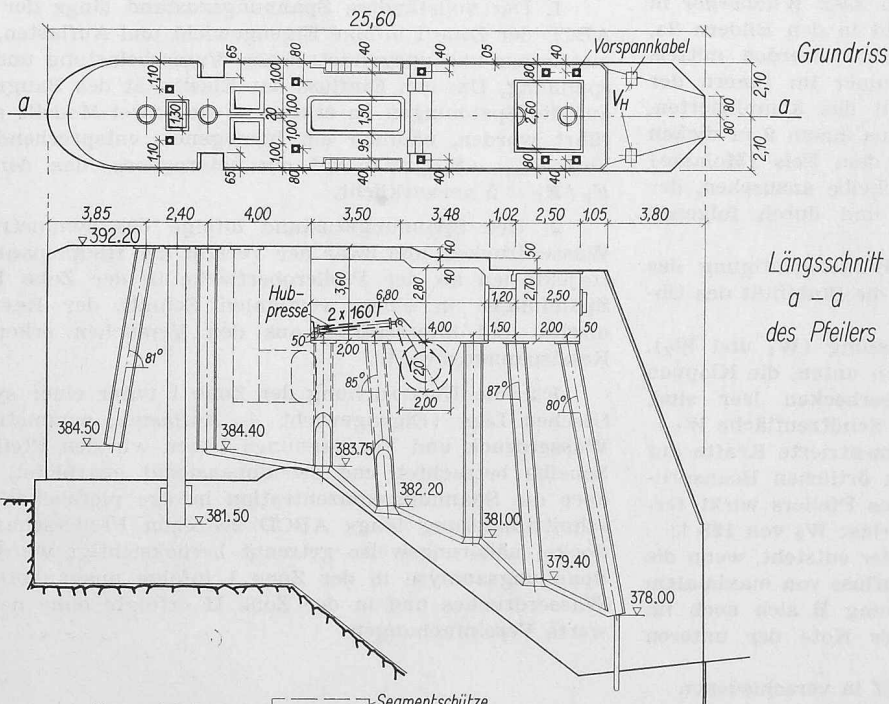


Pfeiler-Ansicht

B. Ausföhrung der Versuche I. Zone I

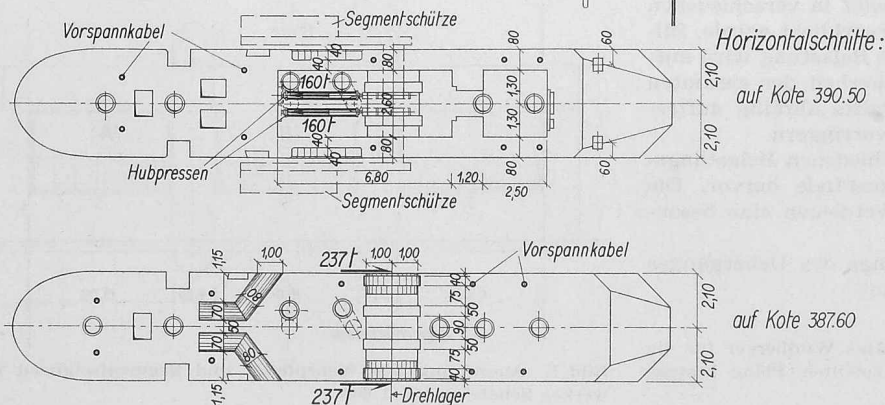
1. Zweidimensionale Untersuchung a) Modelle

Um den Einfluss des elastischen Verhaltens des Baugrundes zu zeigen, sind, wie schon erwähnt, zwei Modelle im Massstab 1:200 hergestellt worden. Das homogene Modell besteht aus drei polierten, planparallelen Scheiben aus Allite CR 39³⁾, deren genaue Abmessungen aus Bild 8 ersichtlich sind. Als Leim für das Zusammenkleben der drei Scheiben diente Crystic 191 LV⁴⁾. Um das heterogene Modell zu verwirklichen, wurde der Beton durch das Aggregat Glas + Allite CR 39 und der Fels durch Araldit B⁵⁾ nachgeahmt, Bild 9. Diese an sich komplizierte Lösung musste gewählt werden, weil es leider nicht gelungen ist, zwei durchsichtige, optisch einwandfreie Kunststoffe mit dem gewünschten Verhältnis der E -Moduli zu finden. Die Herstellung eines heterogenen Modells bietet einige Schwierigkeiten. Zuerst muss man die richtigen Scheibendicken wählen⁶⁾. Das ist nicht leicht, wenn man bedenkt, dass die Glasbearbeitung von dünnen Scheiben heikel ist und eine flächenweise spannungsfreie Kunststoffbearbeitung grosse Erfahrungen voraussetzt. Dazu kommt noch die Tatsache, dass ein solches Modell wegen des Glases verhältnismässig kleine optische Konstanten aufweist, so dass man mit der



Grundriss

Längsschnitt
a - a
des Pfeilers



Horizontalschnitte:
auf Kote 390.50

auf Kote 387.60

2) Die Zahlen in eckigen Klammern beziehen sich auf das Literaturverzeichnis am Ende des Aufsatzes.

3) Das Kunstharz CR 39 wird von der Homalite Corporation in Wilmington, Delaware, USA, hergestellt.

4) Wir verdanken der Firma Dr. W. Mäder in Baden die Gratislieferung des Klebemittels.

5) In zwei getrennten Komponenten: Harz und Härter, durch die Firma CIBA AG in Basel geliefert.

6) Die Theorie der heterogenen Scheiben ist in Unterabschnitt 2 des Anhangs enthalten.

Bild 2. Der untersuchte Wehrpfeiler zwischen den Öffnungen A und B, 1:300

rein optischen Methode operieren muss, was für die interferometrischen Messungen hohe Anforderungen an Reinheit und Parallelität des Modells stellt. In unserem konkreten Falle ist es gelungen, die vier Scheiben in der erforderlichen Dicke fertig zu kaufen, so dass wir auf eine Nachbearbeitung der Flächen verzichten konnten. Die Herstellung der Araldit-Platten in der gewünschten Dicke bot dagegen keine nennenswerten Schwierigkeiten. Die Bearbeitung der dünnen Glasplatten auf die Pfeilerschaft- und Pfeilersockelform wurde von der Firma W. Koch AG in Zürich befriedigend ausgeführt. Die Werte der elastischen Konstanten von Glas, Allite CR 39 und Araldit lauten⁷⁾:

$$\begin{aligned} E_{\text{Glas}} &= 6800 \text{ km/mm}^2, & E_{\text{CR 39}} &= 235 \text{ kg/mm}^2, \\ \nu_{\text{Glas}} &= 0,22, & \nu_{\text{CR 39}} &= 0,40, \\ E_{\text{Araldit}} &= 340 \text{ kg/mm}^2, & \nu_{\text{Araldit}} &= 0,39. \end{aligned}$$

Mit diesen Daten lassen sich die Scheibendicken leicht kontrollieren. Für den Pfeilerschaft mit $h_1 = 1,48 \text{ mm}$, $h_2 = 11,6 \text{ mm}$ bekommt man⁶⁾:

$$L_{i1} = \frac{h_1 E_1}{1 - \nu_1^2} + \frac{h_2 E_2}{1 - \nu_2^2} = 13821 \text{ kg/mm},$$

für den Pfeilersockel mit $h_1 = 3,88 \text{ mm}$, $h_2 = 11,6 \text{ mm}$

$L_{i2} = 30971 \text{ kg/mm}$;
das Verhältnis der beiden ideellen Steifigkeiten beträgt also:

$$L_{i1}/L_{i2} = 0,45, \text{ anstatt } 0,47 \text{ im Bauwerk.}$$

Für den Fels ist $L_{i3} = 6255 \text{ kg/mm}$, der Quotient $L_{i2}/L_{i3} \approx 5$ entspricht also den gewünschten elastischen Verhältnissen⁸⁾. Der «Fels» wurde in beiden Modellen kreisförmig abgeschnitten, um günstige Randbedingungen bezüglich der Spannungsverteilung zu schaffen, Bilder 6, 7a und 7b. Die Modelle sitzen festgeklebt in einem robusten, verstellbaren Metallring, der verschiedenen geneigte Lasten, wie z. B. Eigengewicht und Vorspannung, mühelos zu verwirklichen erlaubt (Bilder 6, 7a und 7b).

b) Wahl der Messpunkte

Wir haben längs ABCD die Spannungen in 16 Punkten gemessen, deren genaue Lage in den Bildern 8 und 9 sichtbar ist. Die Linie ABCD ist ungefähr 1 mm von der Diskontinuitätsstelle des Pfeilerquerschnittes entfernt, was in der Natur 20 cm entspricht. Um die genaue Lage der Messpunkte während des Messens festzustellen, ist eine Blende aus Millimeterpapier mit Löchern von rd. 0,8 mm Durchmesser auf das Modell geklebt worden.

c) Belastungen

Die oben unter A 2 genannten Belastungsfälle sind getrennt untersucht worden, um den Einfluss der verschiedenen Lasten erkennen zu können und den günstigsten Fall durch Super-

⁷⁾ Die E -Moduli wurden mit drei Biegeversuchen bestimmt, die Werte von ν sind aus [3] und [4] entnommen worden.

⁸⁾ Als mittragende Breite des Felsens wurde, wegen des zerklüfteten Zustandes der Molasse, nur die Fundamentsockelbreite angenommen; diese Vereinfachung ist zulässig, da die untersuchten Spannungen sich mit der Elastizität des Baugrundes nur wenig verändern (Bild 15).

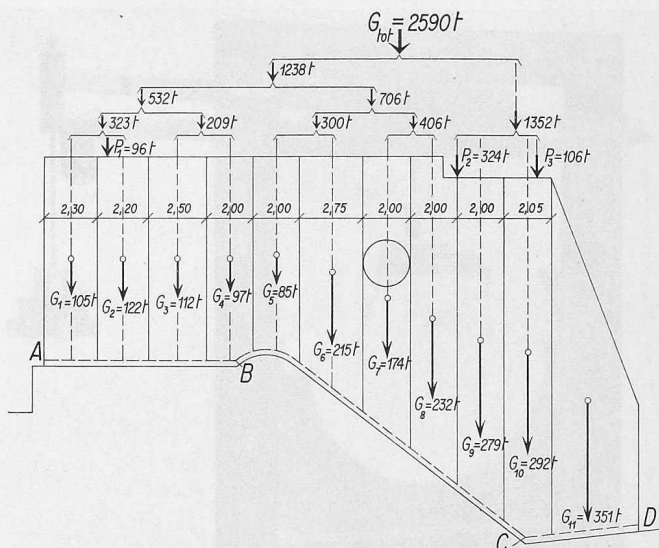


Bild 3. Lastbild für Eigengewicht und Auflasten P_1, P_2, P_3 längs ABCD (Auftrieb inbegriffen)

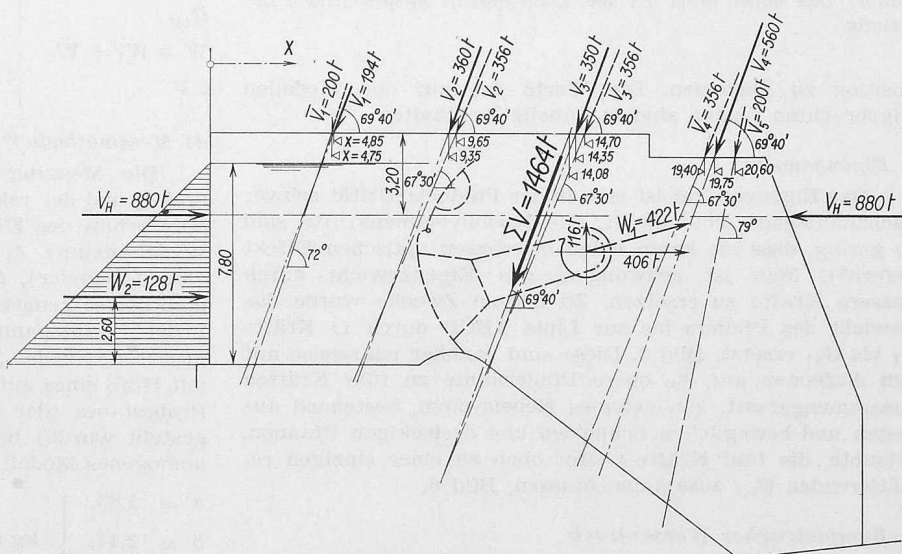


Bild 4. Symmetrische Belastung durch Wasserdruck und Vorspannung. Die gestrichelten Linien zeigen die im Projekt vorgesehene Lage der Vorspannkabel, die strichpunktlierten Linien die für die Modellversuche angenommene Anordnung

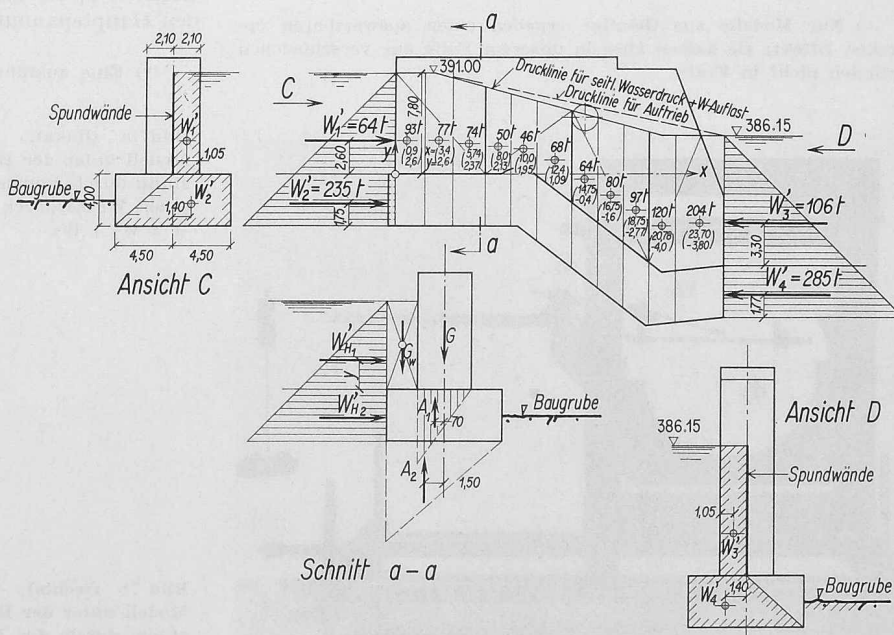


Bild 5. Unsymmetrische Belastung durch den Wasserdruck

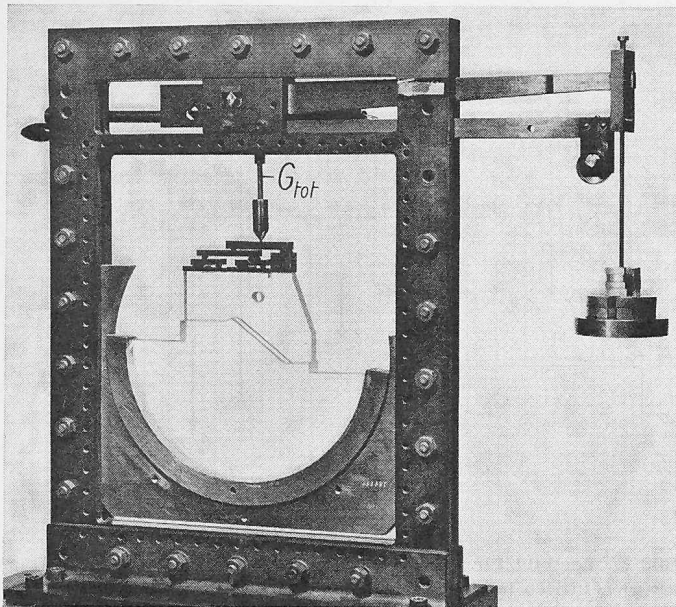


Bild 6. Das Modell unter der dem Eigengewicht entsprechenden Belastung

position zu gewinnen. Die Werte der auf den Modellen angebrachten Lasten sind in Tabelle I enthalten.

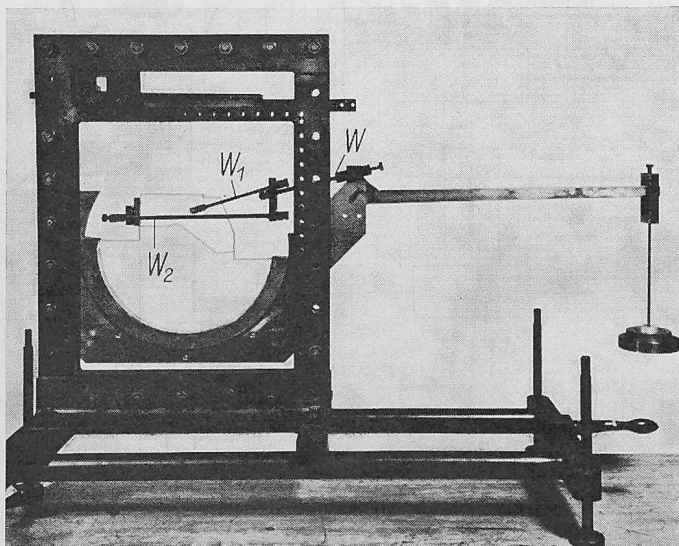
α. Eigengewicht

Das Eigengewicht ist eine in der Photoelastizität schwer nachzuahmende Volumkraft. Die Modellvolumenkräfte sind so gering, dass sie kaum einen messbaren optischen Effekt liefern⁹⁾. Man ist gezwungen, das Eigengewicht durch äussere Kräfte zu ersetzen. Zu diesem Zwecke wurde das Gewicht des Pfeilers bis zur Linie ABCD durch 11 Kräfte G_1 bis G_{11} ersetzt, Bild 3. Diese sind nachher paarweise mit den Auflasten auf die obere Pfeilerkante zu fünf Kräften zusammengefasst. Ein genaues Hebelsystem, bestehend aus festen und beweglichen Schneiden und dreieckigen Pfannen, erlaubte, die fünf Kräfte weiter oben zu einer einzigen resultierenden G_{tot} zusammenzufassen, Bild 6.

β. Symmetrischer Wasserdruck

Zuerst wurde der seitliche Wasserdruck auf den Pfeilerkopf zu einer Einzelkraft W_2 zusammengefasst. Die zwei Kräfte W_1 und W_2 sind nachher mit Hilfe eines Hebelsystems zur Resultierenden W zusammengesetzt worden, Bild 7 a.

⁹⁾ Nur Modelle aus Gelatine ergeben einen auswertbaren optischen Effekt; sie kamen aber in unserem Falle aus verschiedenen Gründen nicht in Frage.



γ. Vorspannung

Die Vorspannung besteht aus sechs im Bauwerk durch je zwei Kabel aufgebrachten Kräften, die verschieden geneigt sind, Bild 4. Hier hat man einige Vereinfachungen getroffen. Zuerst wurde auf die Nachahmung der horizontalen Vorspannung V_H verzichtet, da ihr direkter Einfluss in erster Linie nur im oberen Pfeilerteil (Zone II) merkbar sein sollte; dann ersetzte man die schiefen und verschieden geneigten Vorspannkräfte \bar{V}_1 bis \bar{V}_5 durch parallele Kräfte V_1 bis V_4 , so dass die Resultierende ΣV mit $\Sigma \bar{V}$ übereinstimmt, Bild 4. Die konstante Neigung der Kräfte beträgt $69^\circ 40'$. Die experimentelle Ausführung der Belastung ist in Bild 7b sichtbar. Die Resultierende ΣV wirkte vertikal, und das Modell wurde im Belastungsrahmen um $20^\circ 20'$ gegen die Horizontale geneigt. Die Werte der angebrachten Lasten sind in Tabelle 1 enthalten.

Tabelle 1

Belastung	Bauwerk	Modell	
		homogen	heterogen
G_{tot}	2 590 t	180,7 kg	193,6 kg
$W = W_1 + W_2$	546 t	73,5 kg	78,9 kg
ΣV	1 464 t	181,4 kg	119,0 kg

d) Messmethode¹⁰⁾

Die Messung der absoluten Phasenverschiebungen δ_1 und δ_2 und der relativen δ_3 erfolgte im Photoelastischen Laboratorium der ETH (Prof. Dr. H. Favre und Ass. Prof. Dr. W. Schumann). δ_1 und δ_2 wurden mit einem Interferometer (Mach-Zehnder), δ_3 mit Hilfe eines Bravais Kompensators punktweise gemessen. Die Ermittlung der Richtungen 1 und 2 der Hauptspannungen erfolgte punktweise zwischen gekreuzten Nicols. Die photoelastischen Konstanten wurden mit Hilfe eines auf reinen Druck beanspruchten rechteckigen Probestabes (der aus demselben Stoff wie das Modell hergestellt wurde) bestimmt; sie betrugen:

homogenes Modell heterogenes Modell (Pfeilerschaft)

$$\left. \begin{array}{l} a = 1,83, \\ b = 2,41, \\ c = -0,58, \end{array} \right\} \text{ kg}^{-1} \lambda \text{ mm.} \quad \left. \begin{array}{l} A' = 0,624, \\ B' = 0,790, \\ C' = -0,166, \end{array} \right\} \text{ kg}^{-1} \lambda \text{ mm.}$$

e) Grundlagen der Auswertung

Für das homogene Modell hängen die drei gemessenen Grössen δ_1 , δ_2 und δ_3 durch die folgenden Gleichungen von den Hauptspannungen σ_1 und σ_2 ab¹⁰⁾:

¹⁰⁾ Eine ausführliche Beschreibung findet sich im Anhang.

Bild 7a (links). Das Modell unter der Belastung durch symmetrischen Wasserdruck $W = W_1 + W_2$

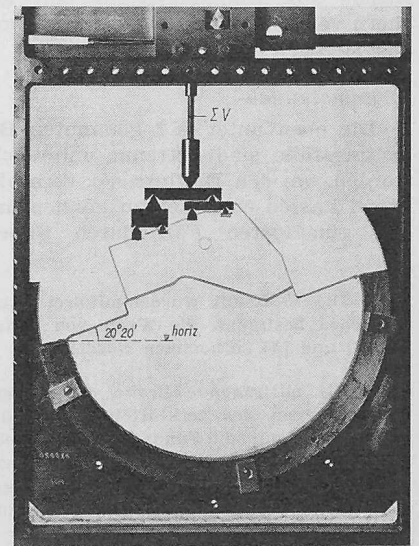


Bild 7b (rechts). Das Modell unter der Belastung durch die Vorspannkabel ΣV

$$(1) \begin{cases} \delta_1 = ae\sigma_1 + be\sigma_2, \\ \delta_2 = be\sigma_1 + ae\sigma_2, \\ \delta_3 = ce(\sigma_1 - \sigma_2), \end{cases}$$

worin e die Dicke des Modells bedeutet.

Das System (1) von drei Gleichungen zur Bestimmung der zwei Unbekannten σ_1 und σ_2 wird nach der Ausgleichsmethode der kleinsten Quadrate von Gauss gelöst; damit ist es möglich, die wahrscheinlichsten Werte von σ_1 und σ_2 zu finden. Sind die Spannungswerte σ_1 und σ_2 und ihre Richtung in einem Punkt des Modells bekannt, dann lassen sich die parallel zu den orthogonalen Axen n und t gesuchten Spannungen σ_n , σ_t und τ_{nt} sofort berechnen; es gelten die Beziehungen:

$$(2) \begin{cases} \sigma_n = \sigma_1 \cos^2 \alpha + \sigma_2 \sin^2 \alpha, \\ \sigma_t = \sigma_1 \sin^2 \alpha + \sigma_2 \cos^2 \alpha, \\ \tau_{nt} = \tau_{tn} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin 2\alpha, \end{cases}$$

worin α der Winkel zwischen den Axen t und der Richtung 2 ist. Für das heterogene Modell gelten ähnliche Gleichungen (s. Anhang).

f) Uebertragung der Modellergebnisse auf das Bauwerk

Bezeichnet man mit:

Λ den Längenmasstab (d.h. das Verhältnis der Längen des Bauwerks zu den Modelllängen),

κ den Kräftemasstab,

Δ den Masstab für die Dicken,

dann gilt für das homogene Modell die bekannte Formel:

$$(3) \quad (\sigma)_{\text{Natur}} = (\sigma)_{\text{Modell}} \cdot \frac{\kappa}{\Lambda \Delta}$$

streng im Falle des Eigengewichtes und der Vorspannung, genügend genau für den symmetrischen Wassdruck [W₁ erfüllt hier die Michellsche Bedingung nicht¹¹⁾]. Auch für das heterogene Modell haben wir die einfache Formel (3) angewandt, die als genügend genaue Annäherung für die Praxis zu betrachten ist. In der Folge sind in allen Diagrammen nur die auftretenden Spannungen im Bauwerk eingetragen worden. Fortsetzung folgt

¹¹⁾ Sie lautet: an jeder geschlossenen Berandung der Scheibe dürfen die angreifenden Kräfte keine Resultierende, höchstens ein resultierendes Moment aufweisen.

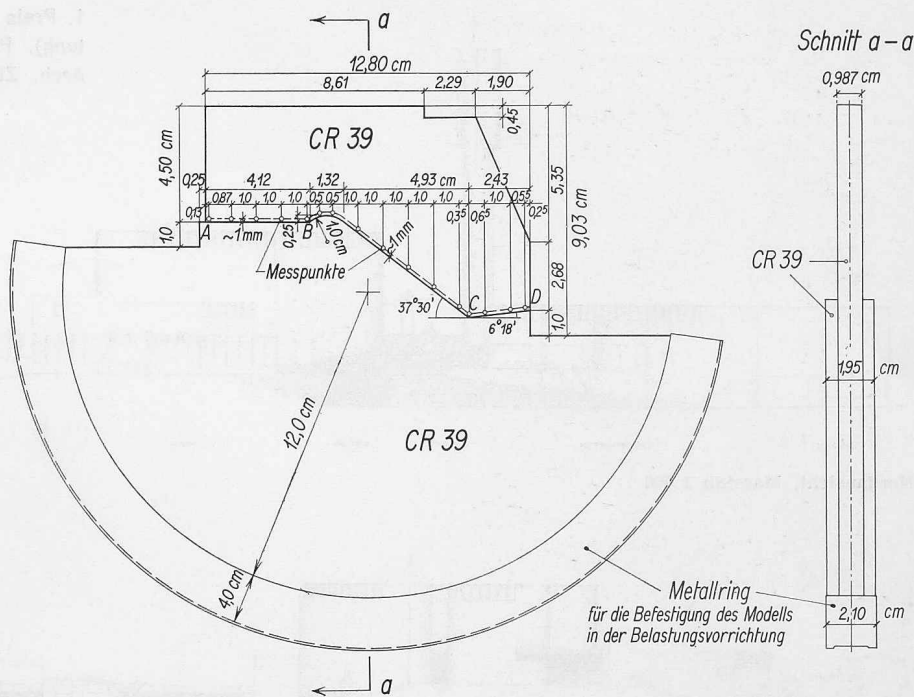


Bild 8. Homogenes Modell aus Allite CR 39. Verkleinerung gegenüber dem Bauwerk 1:200

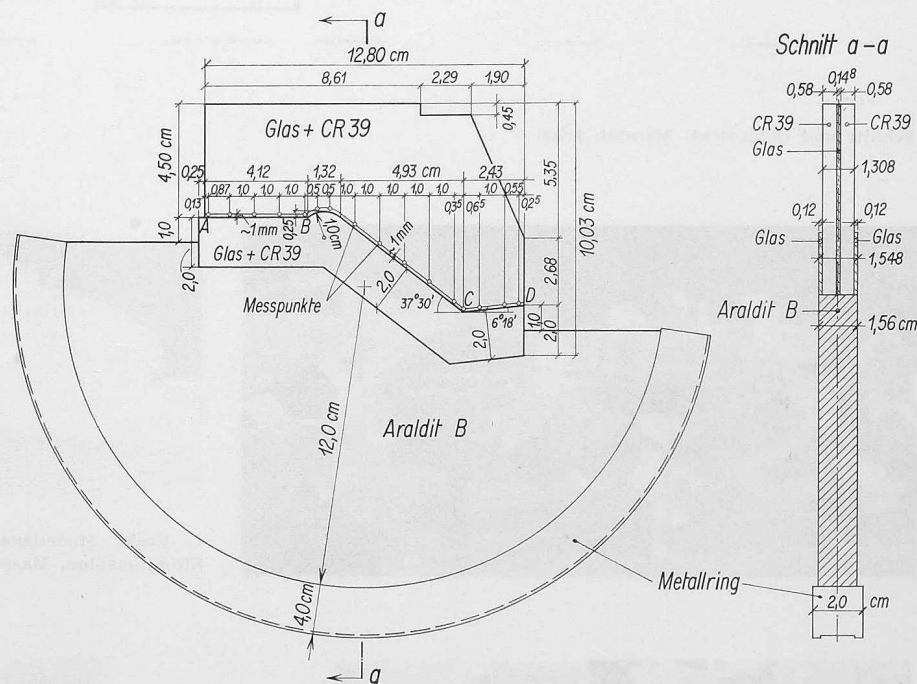


Bild 9. Heterogenes Modell aus Allite CR 39, Glas und Araldit B. Verkleinerung 1:200

Wettbewerb für Kirchenbau und Dorfzentrum in Pfäffikon (Schwyz)

DK 726.5

Aus dem Programm

Der Kirchenbauverein Pfäffikon SZ schreibt in Verbindung mit der Politischen Gemeinde Freienbach SZ einen engeren Ideenwettbewerb aus zur Erlangung von Entwürfen für eine neue Kirche mit Nebengebäuden und zur Gestaltung eines Dorfkerns.

Als Wettbewerbsgebiet stehen folgende Liegenschaften zur Verfügung: Kat. Nr. 640 (Steinbock): Eigentum der Politischen Gemeinde Freienbach. Die darauf befindlichen Bauten werden abgebrochen. Der Kanton sieht Strassenverbreiterungen vor. Auf dieser Liegenschaft soll wiederum eine Metzgerei mit Restaurant erstellt werden, in einer Weise, welche die Kirche nicht stört. Der Baukörper soll auch als

Lärmschutz für die Kirche dienen. — Kat. Nr. 1521: Eigentum des Kirchenbauvereins, das daraufstehende Josefshaus Nr. 689 kann abgebrochen werden. Kat. Nr. 639: in Privatbesitz, soll in die Gesamtprojektierung einbezogen werden, jedoch in einer Weise, welche die Bebauung dieser Liegenschaft in einer späteren Bauetappe erlaubt. Kat. Nr. 638: Gemeindehaus, steht für die Gestaltung des Dorfplatzes und von Parkplätzen ebenfalls zur Verfügung. Das Gemeindehaus soll erhalten bleiben. Es können Verschiebungen der Grenzen zwischen den einzelnen Liegenschaften in Aussicht genommen werden, soweit dies zur Erzielung einer guten Gesamtlösung nötig ist.

Schluss siehe Seite 737