

|                     |   |
|---------------------|---|
| <b>Zeitschrift:</b> | Schweizerische Bauzeitung   |
| <b>Herausgeber:</b> | Verlags-AG der akademischen technischen Vereine                                       |
| <b>Band:</b>        | 80 (1962)   |
| <b>Heft:</b>        | 44  |
| <b>Artikel:</b>     | Photoelastische Untersuchungen an den Wehrpfeilern des Kraftwerkes Schaffhausen       |
| <b>Autor:</b>       | Martinola, M.   |
| <b>DOI:</b>         | <a href="https://doi.org/10.5169/seals-66255">https://doi.org/10.5169/seals-66255</a> |

### 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>**

Berufe der Maschinen- und Elektroingenieure sowie der Mathematiker und Physiker erkennen.

#### Neuaufnahmen an der ETH im Jahre

|                | 1956                          |                     | 1961                          |                     | Zunahme<br>seit 1956<br>in % |
|----------------|-------------------------------|---------------------|-------------------------------|---------------------|------------------------------|
|                | Schweizer<br>und<br>Ausländer | Schweizer<br>allein | Schweizer<br>und<br>Ausländer | Schweizer<br>allein |                              |
|                | A                             | B                   | A                             | B                   |                              |
| Masch.-Ing.    | 102                           | 80                  | 171                           | 136                 | 68/70                        |
| El.-Ing.       | 93                            | 75                  | 147                           | 119                 | 58/59                        |
| Math. u. Phys. | 70                            | 58                  | 160                           | 131                 | 129/126                      |
| Uebrige Abt.   | 416                           | 359                 | 527                           | 444                 | 27/24                        |
| Alle Abt.      | 681                           | 572                 | 1005                          | 830                 | 54/45                        |

Auch die EPUL hat eine gewisse Zunahme von Studierenden zu verzeichnen, sie entfällt aber überwiegend auf Ausländer.

Im Bericht des AGV wird auf die Bedeutung hingewiesen, welche der Weiterbildung aller Stufen zukommt und der auch die Firmen im Rahmen ihrer Personalpolitik grosses Interesse entgegenbringen, gilt es doch, fähige Nachwuchskräfte in den eigenen Reihen zu ermitteln und für den beruflichen Aufstieg auszubilden.

In einem ausführlichen Kapitel wird der heutige Stand des Lehrlingswesens und der Werkmeister-Ausbildung geschildert. Wir beschränken uns nachstehend auf die Wiedergabe einiger besonders interessanter Feststellungen.

a) *Lehrlingswesen*. Der Lehrlingsbestand der die Industrie interessierenden Berufe nimmt seit 1951 stetig zu; für die Mitglieder des AGV allein betrug er 15 977 im Jahre 1961, oder 5,1 % mehr als im Vorjahr (Zeichner, Laboranten und Kaufleute einbezogen). Auf 161 089 Arbeiter (ohne Lehrlinge) entfielen im Berichtsjahr 12 059 Werkstattlehrlinge, oder 7,5 % der Arbeiterzahl. Dieser Nachwuchs verteilt sich auf 18 verschiedene Berufe.

|   | Jahr 1960 | Jahr 1961 | Zunahme<br>in % |
|---|-----------|-----------|-----------------|
| Total der Lehrlinge<br>aller Branchen unseres<br>Landes                         | 110 442   | 119 450   | 8               |
| Total der Lehrlinge<br>der Metallverarbeitung<br>(AGV-Mitglieder und<br>andere) | 36 606    | 38 946    | 6               |

b) *Werkmeisterschule*. Diese vom AGV im Jahre 1946 in Winterthur eröffnete Institution erlebte im Berichtsjahr die höchste Besuchsfrequenz. In den erweiterten Räumlichkeiten konnten insgesamt 276 Schüler aufgenommen werden. Die Nachfrage nach den Kursen war sehr gross und ein Teil der Anmeldungen musste aufs nächste Jahr zurückgestellt werden. Diese sechs verschiedene Lehrpläne umfassende Schule entspricht offensichtlich einem wachsenden Bedürfnis. Bemerkenswert ist auch, dass in allen Lehrplänen Menschenführung und Menschenkenntnis an erster Stelle aufgeführt sind.

G. A. Fischer

## Vermessungstechnische Abteilung des Technikums beider Basel

DK 373.639

Im Zusammenhang mit dem in Gründung begriffenen Technikum beider Basel wird im April 1963, vorläufig in Basel, der Schulbetrieb der Vermessungstechnischen Abteilung mit dem ersten Ausbildungs-Semester beginnen. Es handelt sich bei der Vermessungstechnischen Abteilung um ein Gemeinschaftswerk beider Halbkantone. Als Aufsichtsbehörde wirkt vorläufig die paritätische Technikums-Kommission Baselstadt-Basel; später der noch zu bildende Technikumsrat. Mit der direkten Leitung sind von den beiden Kantonsregierungen interimistisch beauftragt worden: als Direktor Dr. J. Dürrwang, als Abteilungsvorsteher E. Bachmann, dipl. Ing. In der Aufsichtsbehörde wirken auch die Eidg. Vermessungsdirektion und Delegierte der Berufsverbände mit.

Die Ausbildung zerfällt in einen theoretischen Teil von 4 Semestern, die in Basel zu absolvieren sind, während das dritte Ausbildungsjahr ausserhalb der Schule bei einem Vermessungsamt oder Geometerbüro zu bestehen ist. Nach zwei Jahren erfolgt die Vordiplomprüfung; nach dem gelenkten

Praktikum die Diplomprüfung. Das Diplom lautet auf «Vermessungstechniker des Technikums beider Basel» und wird von der Eidg. Vermessungsdirektion anerkannt. Interessenten können beim Sekretariat den Studienplan beziehen. Aufnahmebedingungen: Abgeschlossene Lehre als Vermessungszeichner und Bestehen einer Aufnahmeprüfung: Algebra (Gleichungen ersten Grades mit einer Unbekannten), Planimetrie (Grundkenntnisse), Trigonometrie (Rechtwinkliges Dreieck), Aufsatz und Rechnen.

Voraussichtlich wird das Semestergeld 60 Fr. und die Anmeldegebühr (einschl. Prüfungsgebühr für Neueintretende) 10 Fr. betragen. Die Gebühren für die übrigen Prüfungen werden noch festgelegt. Zur Abklärung organisatorischer Fragen ist für den ersten Kurs eine Voranmeldung auf dem entsprechenden Anmeldeschein erforderlich. Eine Anmeldegebühr ist hingegen noch nicht zu entrichten. Adresse für alle Zuschriften: Technikum beider Basel, Sekretariat der Vermessungsabteilung, Vogelsangstrasse 15, Basel, Tel. 061/33 79 00.

DK 620.171.5:627.43

## Photoelastische Untersuchungen an den Wehrpfeilern des Kraftwerkes Schaffhausen

Von Dr. M. Martinola, EMPA, Zürich

Fortsetzung von S. 729

### g) Versuchsergebnisse

#### a. Homogenes Modell

##### Eigengewicht (Bilder 10a bis 10d)

In Bild 10a sind die Diagramme der Hauptspannungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  längs ABCD dargestellt. Es treten ausschliesslich Druckspannungen auf. Der maximale Wert im Punkt D beträgt rund 5 kg/cm<sup>2</sup>; im Punkte A haben wir eine Druckspannung von 1,6 kg/cm<sup>2</sup> gemessen. Bild 10b zeigt die Diagramme der Spannungen  $\sigma_n$ ,  $\sigma_t$  und  $\tau_{nt}$  senkrecht und parallel zur Linie ABCD. Wie im Massivbau üblich ist, haben wir die Druckspannungen als positiv und die Zugspannungen als negativ bezeichnet, für die Schubspannungen gilt die übliche Vorzeichenregel<sup>12)</sup>.

<sup>12)</sup> Siehe z. B. H. Favre, Cours de Mécanique, T. I., Leemann, Zurich, 1953, S. 207.

Da für den Bauingenieur die Prüfung der Zuverlässigkeit einer Näherungsberechnung interessant sein dürfte, sind in Bild 10c auf die Horizontale ABC'D' (Projektion der Linie ABCD) die Werte der längs ABCD gemessenen Vertikalspannungen  $\sigma_v$  aufgetragen und diese mit zwei Näherungsberechnungen verglichen. Die gestrichelte Gerade stellt die Naviersche Lösung für den mit  $G_{tot}$  belasteten Querschnitt AD' des Pfeilerschaftes dar; die strichpunktierte Kurve entspricht der hydrostatischen Verteilung des Eigengewichtes + Auflasten. In Tabelle 2 sind die gemessenen Werte in den Punkten A, B, C, D mit den Näherungswerten und den relativen Fehlern dargestellt. Daraus geht klar hervor, wie vorsichtig man sein muss, wenn die Resultate der linearen Festigkeitslehre auf Scheiben extrapoliert werden.

Tabelle 2. Vergleich von gemessenen und Näherungswerten<sup>13)</sup>

| Punkt | $\sigma_v$<br>gemess.<br>Werte<br>kg/cm <sup>2</sup> | $\bar{\sigma}_v$<br>nach<br>Navier<br>kg/cm <sup>2</sup> | $\sigma_{v'}$<br>hydr.<br>Verteilung<br>kg/cm <sup>2</sup> | relativer Fehler  |  |
|-------|--|--|--|---|--|
|       |  |  |  | $\frac{\sigma_v - \bar{\sigma}_v}{\bar{\sigma}_v}$<br>% | $\frac{\sigma_v - \sigma_{v'}}{\sigma_v}$<br>% |
| A     | 1,6  | 1,0  | 1,3  | +38   | +19  |
| B     | 1,7  | 1,9  | 1,3  | -12   | +24  |
| C     | 2,8  | 3,3  | 4,1  | -18   | -46  |
| D     | 4,9  | 3,8  | 1,9  | +22   | +61  |

13) Der Vergleich bezieht sich nur auf die Mittelwerte der Spannungen über dem Pfeilerquerschnitt ohne Berücksichtigung der Spannungsspitze infolge plötzlicher Querschnittsänderung zwischen Pfeilerschaft und Sockel (Bild 15, Schnitt a—a).

Um eine gesamthafte Kontrolle der Messungen zu erhalten, haben wir die drei Gleichgewichtsbedingungen in der Ebene:

$$\sum X = 0, \quad \sum Y = 0, \quad \sum M_0 = 0,$$

auf den Pfeilerschaft angewandt. Zu diesem Zwecke sind die Spannungen  $\sigma_n$ ,  $\sigma_t$  und  $\tau_{nt}$ , graphisch durch die Resultierenden  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$ ,  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$  ersetzt (Bild 10d). Tabelle 3 enthält die Kontrollresultate.

#### Wasserdruck

Die Diagramme der Hauptspannungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  sind in Bild 11a dargestellt. Längs  $\overline{AC}$  treten kleine Zugspannungen auf, deren maximaler Wert nur  $-0,9 \text{ kg/cm}^2$  beträgt; in D wurde die grösste Druckspannung von  $\sigma_2 = 1,1 \text{ kg/cm}^2$  gemessen. Bild 11 b zeigt den Verlauf der Spannungen  $\sigma_n$ ,  $\sigma_t$  und  $\tau_{nt}$ .

#### Vorspannung

Bild 12 a stellt die Diagramme der Hauptspannungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  dar. Es treten praktisch nur Druckspannungen auf. Der maximale Wert beträgt in A  $\sigma_A = 3,2 \text{ kg/cm}^2$ , in D ist  $\sigma_D = 0,6 \text{ kg/cm}^2$ . Die Spannungen  $\sigma_n$ ,  $\sigma_t$  und  $\tau_{nt}$  sind in Bild 12 b graphisch dargestellt. Um wieder die gemessenen Werte mit einer Näherungsberechnung zu vergleichen, ist in Bild

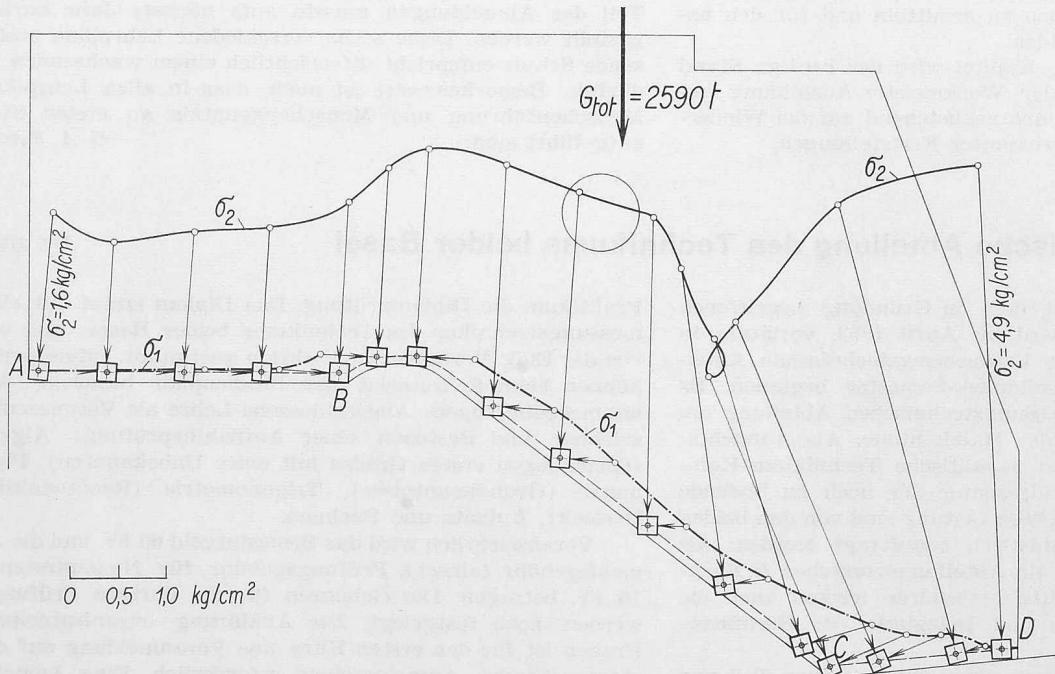


Bild 10a. Verlauf der Hauptspannungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  längs A B C D infolge  $G_{tot}$

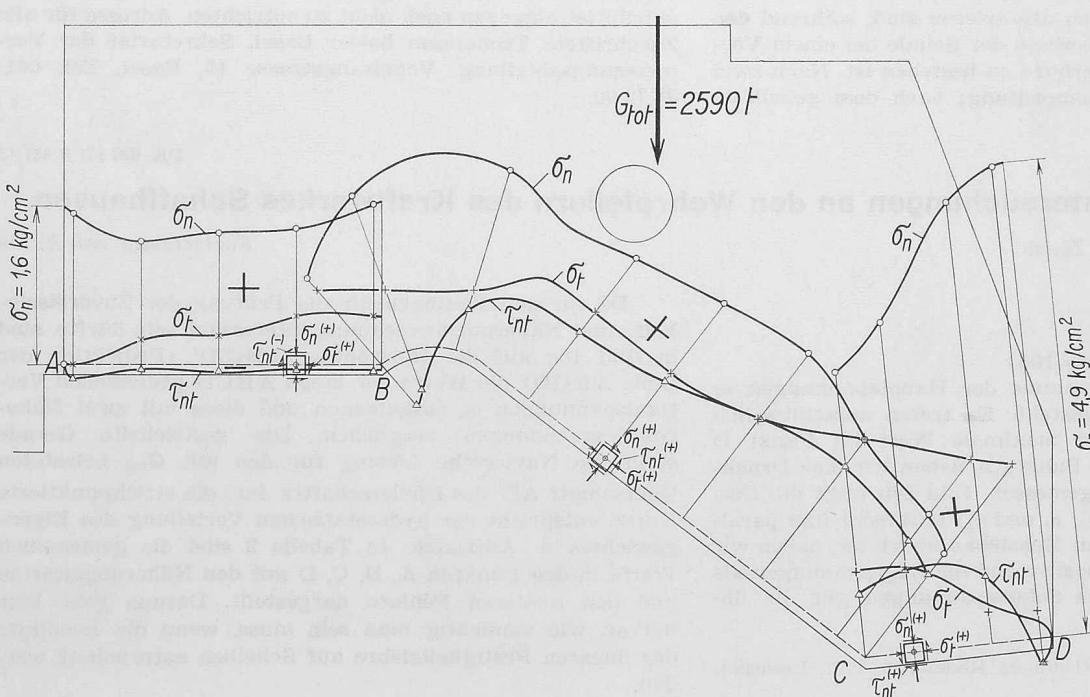


Bild 10b. Verlauf der Spannungen  $\sigma_n$ ,  $\sigma_t$  und  $\tau_{nt}$  längs A B C D infolge  $G_{tot}$

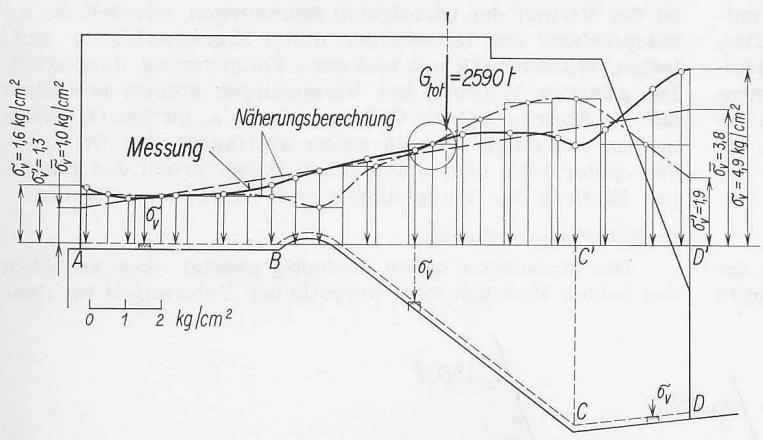


Bild 10c. Vergleich der Messungen mit den Näherungsberechnungen.  
Spannungen  $\sigma_v$  infolge  $G_{tot}$

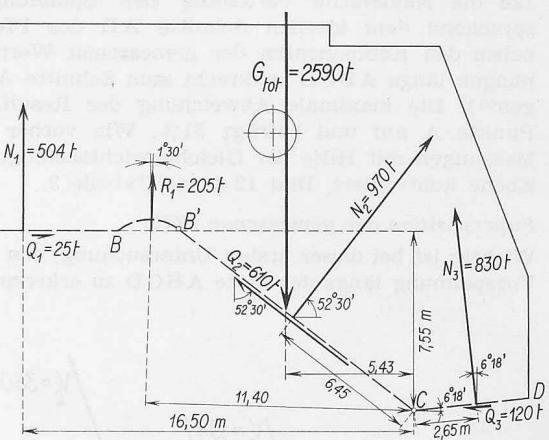


Bild 10d. Gleichgewichtskontrolle der äusseren und inneren Kräfte  
für die Belastung infolge  $G_{tot}$

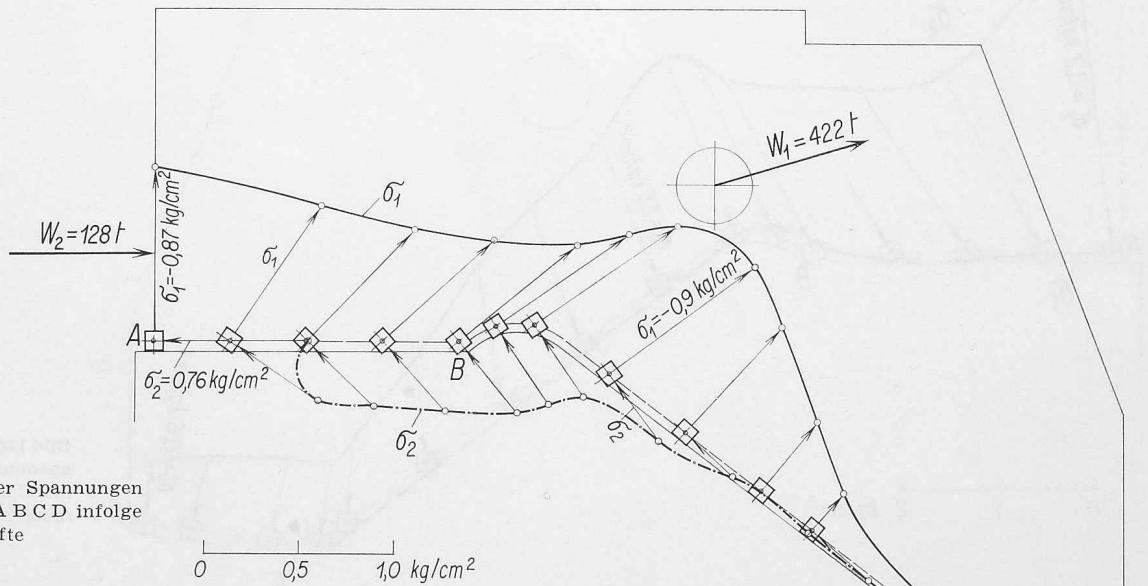


Bild 11b. Verlauf der Spannungen  
 $\sigma_n$ ,  $\sigma_t$  und  $\tau_{nt}$  längs A B C D infolge  
der Wasserdruckkräfte  
 $W = W_1 + W_2$

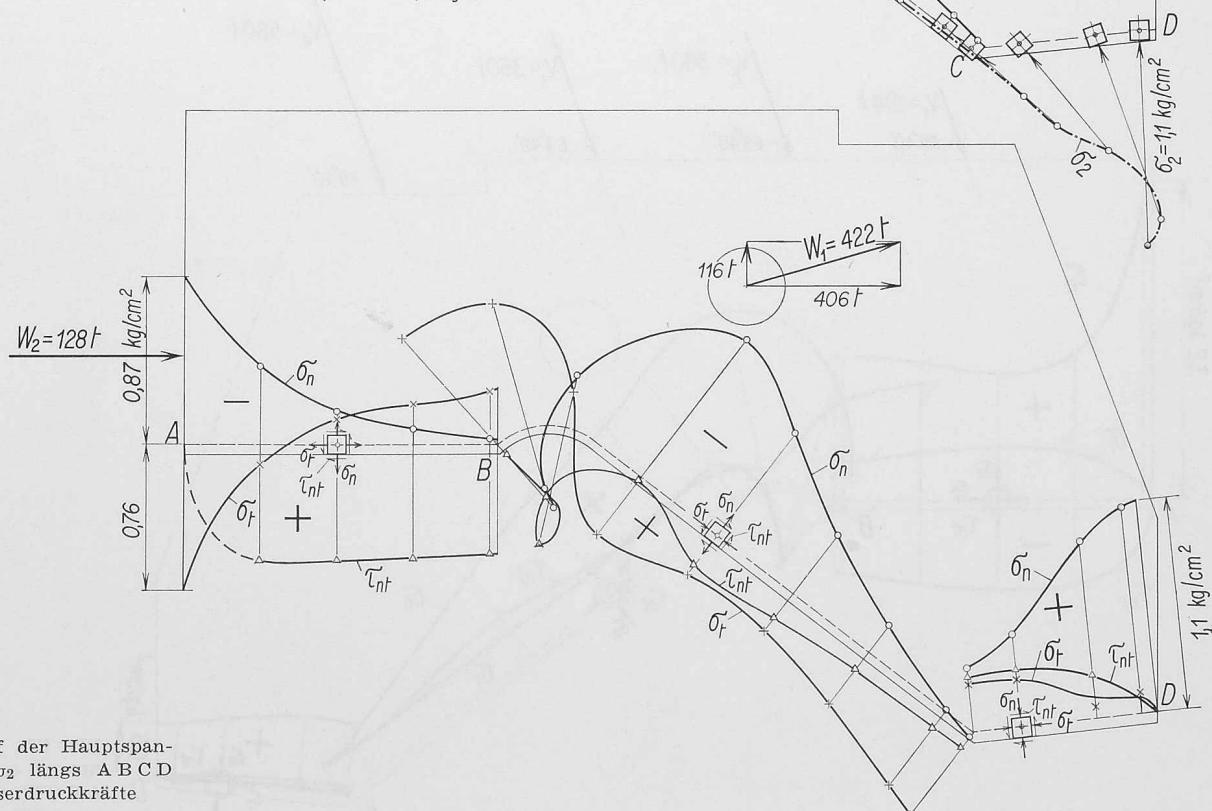


Bild 11a. Verlauf der Hauptspannungen  
 $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  längs A B C D  
infolge der Wasserdruckkräfte  
 $W = W_1 + W_2$

12c die Naviersche Verteilung der Spannungen  $\sigma'$  entsprechend dem ideellen Schnitte AD des Pfeilerschaftes, neben den Komponenten der gemessenen Werte der Spannungen längs ABCD senkrecht zum Schnitte AD aufgetragen<sup>13)</sup>. Die maximale Abweichung der Resultate tritt im Punkte A auf und beträgt 31%. Wie vorher wurden die Messungen mit Hilfe der Gleichgewichtsbedingungen in der Ebene kontrolliert, Bild 12 d und Tabelle 3.

#### Superposition der gemessenen Fälle

Wichtig ist bei dieser ersten Untersuchung, den Einfluss der Vorspannung längs der Linie ABCD zu erkennen. In Bild 13

ist der Verlauf der wichtigsten Spannungen, nämlich die  $\sigma_n$ , entsprechend den Belastungen durch Eigengewicht + Auflasten, Wasserdruck mit und ohne Vorspannung, dargestellt. Die günstige Wirkung der Vorspannung kommt besonders auf der Strecke AC zur Geltung, wo die  $\sigma_n$  infolge  $G_{tot}$  klein bleiben und durch  $W$  noch weiter verringert sind. Wir werden später beim unsymmetrischen Wasserdruck den günstigen Einfluss der Vorspannung noch deutlicher erkennen.

#### β. Heterogenes Modell

Die Messungen haben eindeutig gezeigt, dass zwischen den beiden Modellen kein wesentlicher Unterschied im Cha-

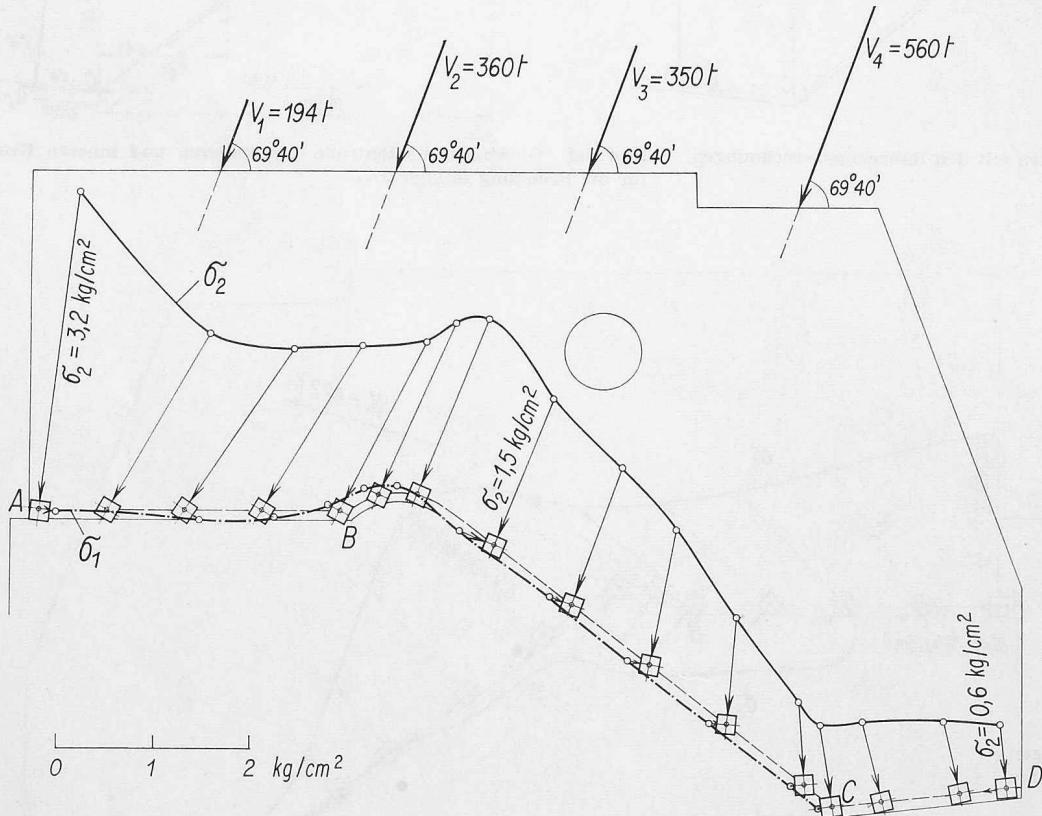


Bild 12a. Verlauf der Hauptspannungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  längs A B C D infolge der Vorspannung  $\Sigma V = 1464$  t

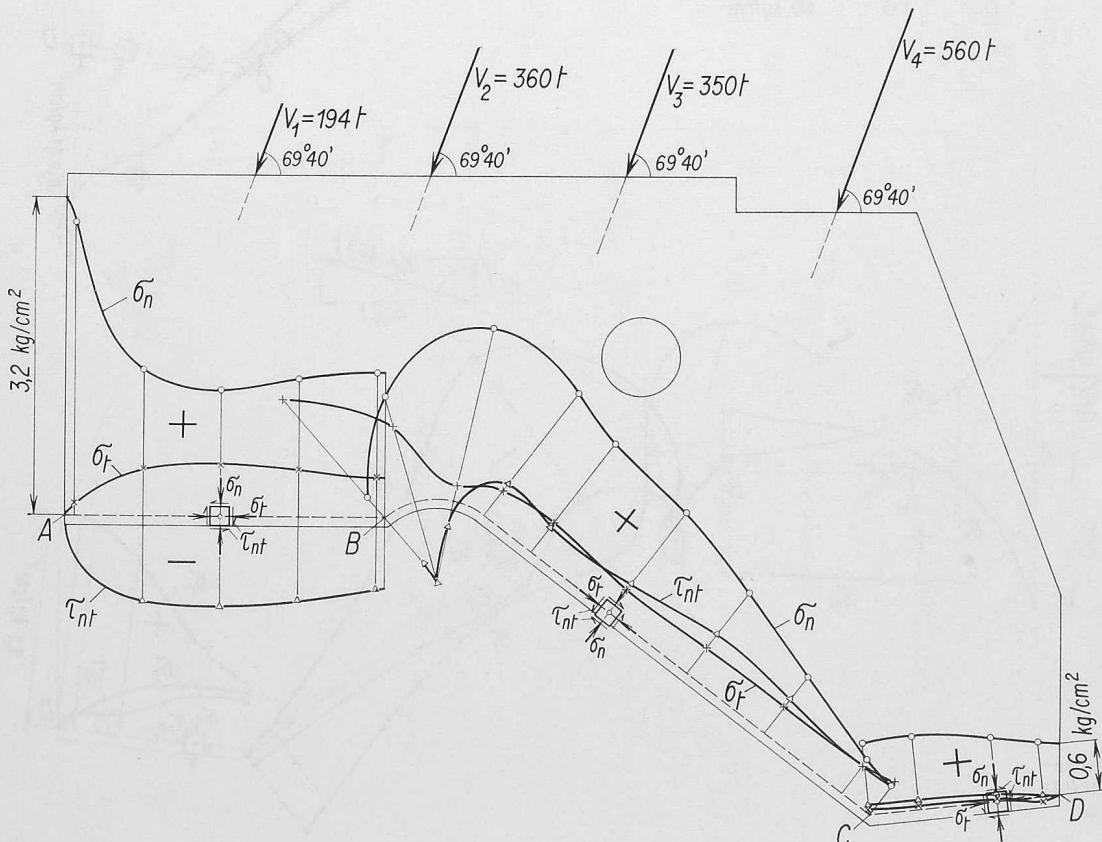


Bild 12b. Verlauf der Spannungen  $\sigma_n$ ,  $\sigma_t$  und  $\tau_{nt}$  längs A B C D infolge der Vorspannung  $\Sigma V = 1464$  t

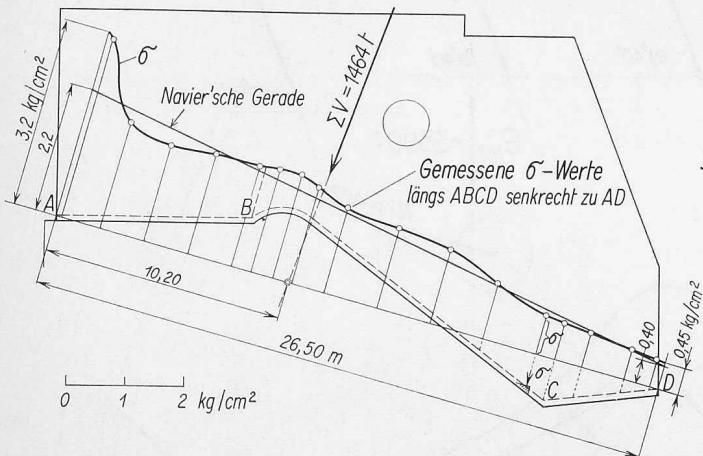


Bild 12c. Vergleich der Messungen mit den Näherungsberechnungen. Spannungen  $\sigma$  infolge der Vorspannung  $\Sigma V = 1464$  t

rakter der Spannungsverteilung vorhanden war. Wir beschränken uns darauf, in Bild 14 a die Diagramme von  $\sigma_n$ ,  $\bar{\sigma}_t$  und  $\tau_{nt}$  infolge  $G_{tot}$ ,  $W$  und  $\Sigma V$  darzustellen. Die Messungen wurden wieder mit Hilfe der drei Gleichgewichtsbedingungen am Pfeilerschaft kontrolliert, Bild 14 b und Tabelle 3. Die Kontrollresultate sind sehr befriedigend.

#### γ. Der Einfluss der Elastizität des Baugrundes auf die Spannungsverteilung längs A B C D

Um den Einfluss der Elastizität des Felsens zu erkennen, sind in Bild 15 die wichtigsten Spannungen  $\sigma_n$  ( $E_B/E_F = 1$ ) und  $\bar{\sigma}_t$  ( $E_B/E_F = 5$ ) nebeneinander gezeichnet. Für den homogenen Fall sieht der Verlauf der  $\sigma_n$  längs A B C D, wie zu erwarten war, gleichmässiger aus; der Quotient aus maximalem und min. Spannungswert gibt  $(\sigma_n)_{max}/(\sigma_n)_{min} = 3,8$  und  $(\bar{\sigma}_t)_{max}/(\bar{\sigma}_t)_{min} = 4,9$ . Der weiche Boden verursacht in den Punkten A und D eine Zunahme der Normalspannungen um rund 18% bzw. 14% und dafür eine Ab-

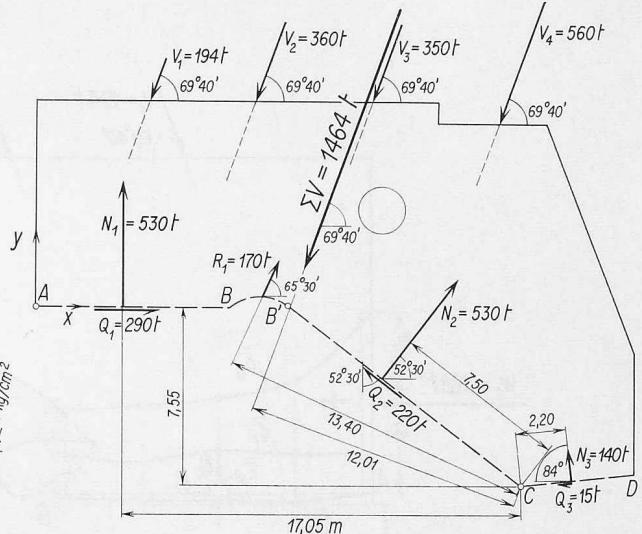


Bild 12d. Gleichgewichtskontrolle der äussern und inneren Kräfte infolge  $\Sigma V = 1464$  t

Tabelle 3

|                      |  |  | Sollwerte                     | graphisch ermittelte Werte    |
|----------------------|--|--|-------------------------------|-------------------------------|
| Homo- genes Modell   | Eigen- gewicht + Auflasten $= G_{tot}$ | $\Sigma X$<br>$\Sigma Y$<br>$\Sigma M_c$ | 0<br>2 590 t<br>14 064 tm     | 74 t<br>2 660 t<br>14 900 tm  |
|                      | Vorspan- nung : $\Sigma V$             | $\Sigma X$<br>$\Sigma Y$<br>$\Sigma M_c$ | 509 t<br>1 373 t<br>17 583 tm | 480 t<br>1 380 t<br>17 170 tm |
|                      | $G_{tot} + W + \Sigma V = G_{tot}$     | $\Sigma X$<br>$\Sigma Y$<br>$\Sigma M_A$ | 25 t<br>3 847 t<br>54 830 tm  | 41 t<br>3 850 t<br>55 860 tm  |
| Hetero- genes Modell | $G_{tot} + W + \Sigma V = G_{tot}$     | $\Sigma X$<br>$\Sigma Y$<br>$\Sigma M_A$ | 25 t<br>3 847 t<br>54 830 tm  | 41 t<br>3 850 t<br>55 860 tm  |

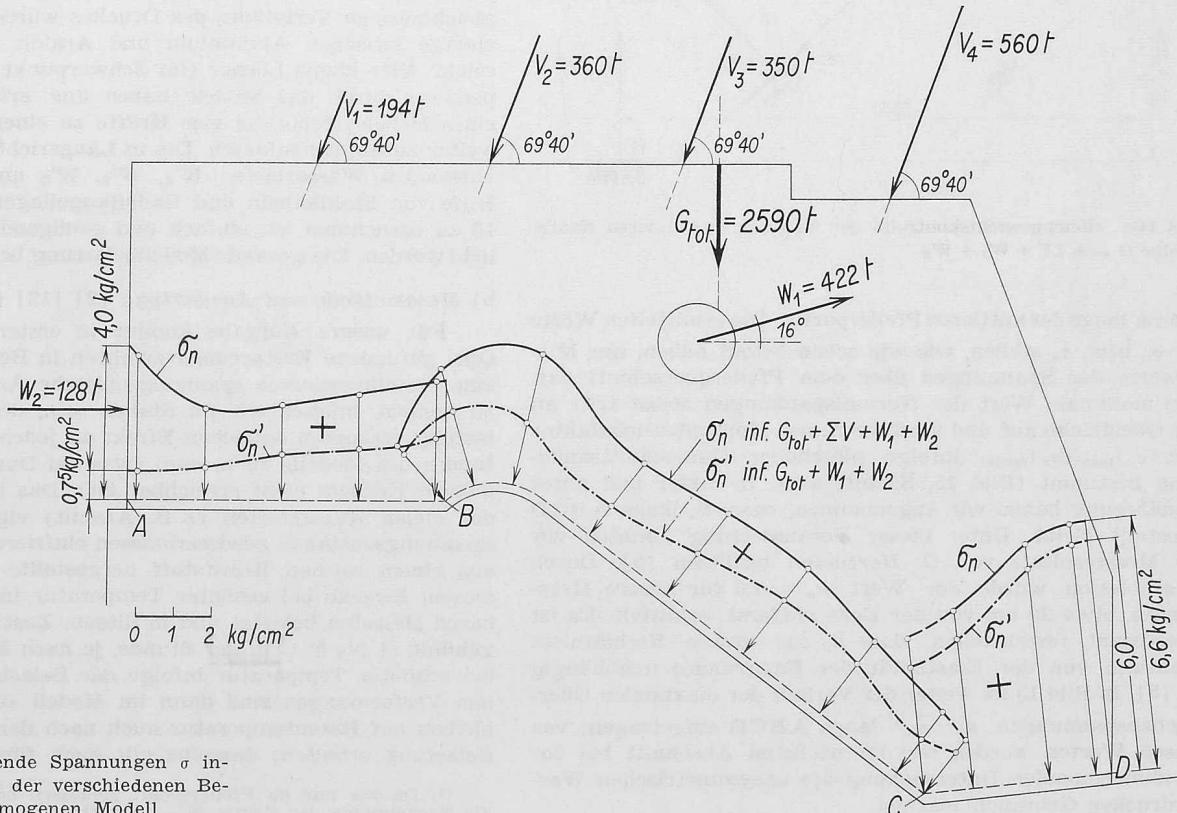


Bild 13. Resultierende Spannungen  $\sigma$  infolge Superposition der verschiedenen Belastungen beim homogenen Modell

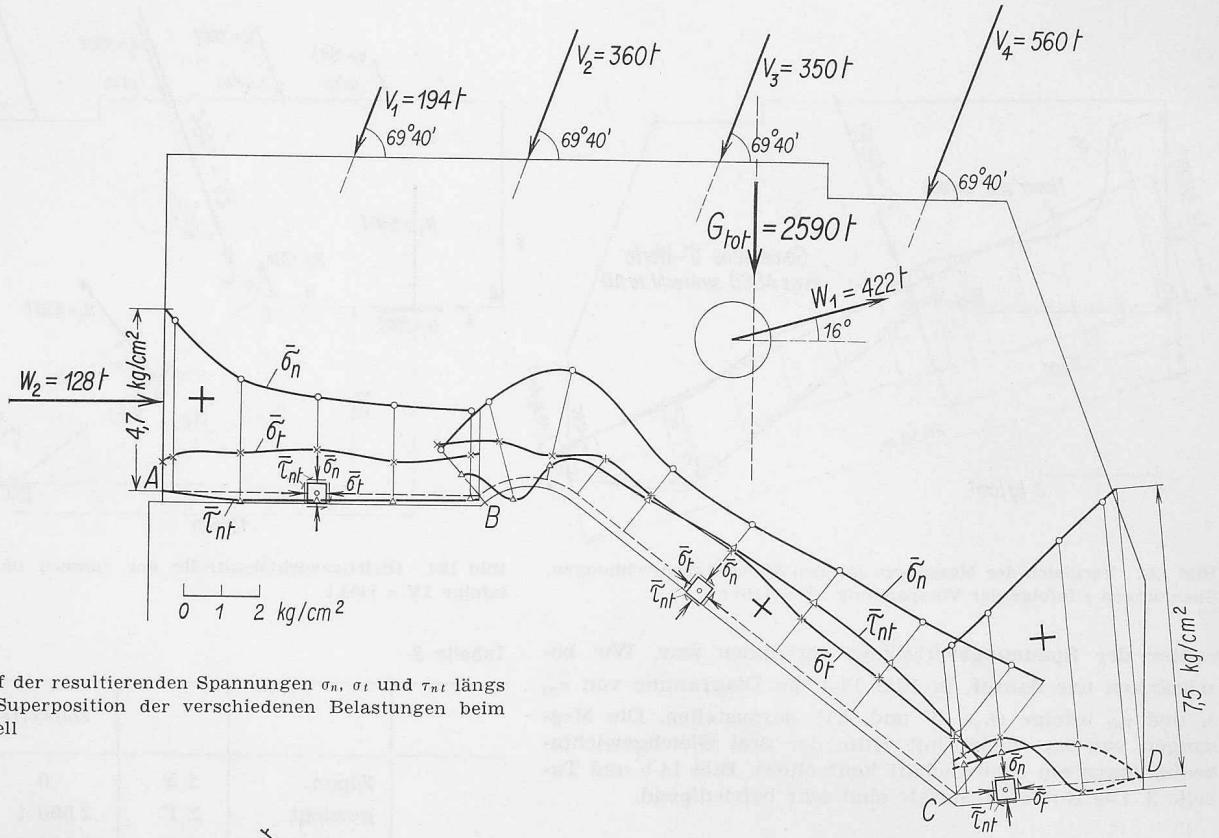


Bild 14a. Verlauf der resultierenden Spannungen  $\sigma_n$ ,  $\sigma_t$  und  $\tau_{nt}$  längs ABCD infolge Superposition der verschiedenen Belastungen beim heterogenen Modell

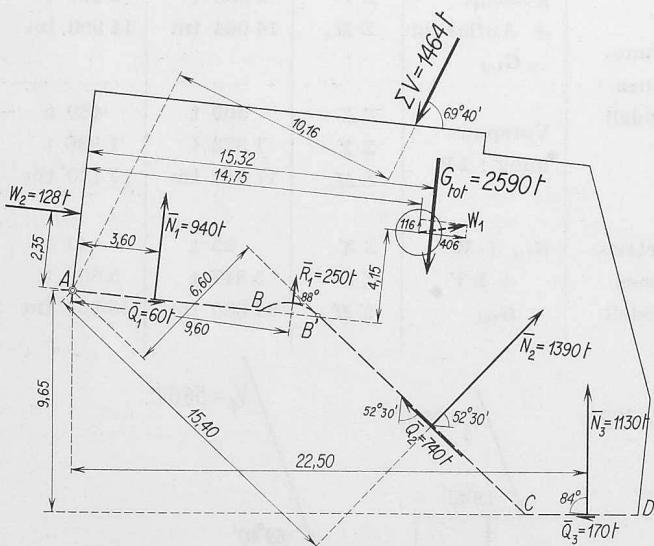


Bild 14b. Gleichgewichtskontrolle der äusseren und inneren Kräfte infolge  $G_{tot} + \Sigma V + W_1 + W_2$

nahme längs der mittleren Pfeilerpartie. Die ermittelten Werte für  $\sigma_n$  bzw.  $\bar{\sigma}_n$  stellen, wie wir schon betont haben, nur Mittelwerte der Spannungen über dem Pfeilerquerschnitt dar. Der maximale Wert der Normalspannungen selbst tritt an der Oberfläche auf und wird durch den Konzentrationsfaktor  $k_\sigma = (\sigma_n)_{\max}/(\sigma_n)_{\text{mitt}}$  infolge plötzlicher Querschnittsänderung bestimmt (Bild 15, Schnitt a-a). In erster und guter Annäherung haben wir angenommen, dass  $k_\sigma$  längs ABCD konstant bleibt. Unter dieser Voraussetzung konnten wir die Messresultate von G. Herrmann benützen [5]. Durch Interpolation wurde der Wert  $k_\sigma = 1,6$  für unsere Messpunkte, etwa 20 cm von der Ecke entfernt, ermittelt. Es ist interessant festzustellen, dass  $k_\sigma$  für unsere Verhältnisse praktisch von der Elastizität des Baugrundes unabhängig ist [5]. In Bild 15 ist weiter der Verlauf der maximalen Oberflächenspannungen  $\sigma_n^*$ ,  $\bar{\sigma}_n^*$  längs ABCD eingetragen; von diesen Werten werden wir im nächsten Abschnitt bei der dreidimensionalen Untersuchung des unsymmetrischen Was serdruckes Gebrauch machen.

## 2. Die dreidimensionale Untersuchung der Zone I

### a) Modelle, Belastung

Wir haben ein Modell aus Araldit B im Maßstab 1:200 hergestellt. Auch hier wurde, wie bei der zweidimensionalen Untersuchung, eine vereinfachte Pfeilerform angenommen (Bild 16). Die komplizierte Art der Belastung ist in Bild 5 dargestellt. In Querrichtung hat man nur die seitliche Wass last  $W'_H1$  nachgeahmt<sup>14)</sup>. Um ein möglichst einfaches Belastungssystem zu erhalten, wurde das Modell im Belastungsrahmen horizontal gelegt, Bild 16. Der flächenweise wirkende Druck  $W'_H1$  ist zuerst mit Hilfe von Aluminiumplatten zu vier Einzelkräften zusammengefasst worden. Eine gleichmässige Verteilung des Druckes wurde mit einer Filzeinlage zwischen Aluminium und Araldit befriedigend erreicht. Vier kleine Löcher (im Schwerpunkt der Aluminiumplatten) durch das Modell haben uns erlaubt, mit Hilfe eines Hebelsystems die vier Kräfte zu einer einzigen Kraft weiter zusammenzufassen. Die in Längsrichtung des Pfeilers wirkenden Wasserlasten  $W'_1$ ,  $W'_2$ ,  $W'_3$  und  $W'_4$  sind mit Hilfe von Stahlkabeln und Radialkugellagern, wie aus Bild 16 zu entnehmen ist, einfach und genügend genau verwirklicht worden. Die gesamte Modellbelastung betrug rund 41 kg.

### b) Messmethode und Auswertung [2] [12] [13] [14]

Für unsere Aufgabe kommt in erster Linie das von Opel gefundene Erstarrungsverfahren in Betracht [11]. Um eine dreidimensionale spannungsoptische Analyse ausführen zu können, müssen wir im Stande sein, den durch die Belastung erzeugten optischen Effekt an jedem Punkt auch im Innern des Modells zu messen (was bei Durchleuchtung des ganzen Körpers nicht erreichbar ist). Das ist möglich dank der vielen Kunststoffen (z. B. Araldit) eigenen Fähigkeit, Spannungszustände gewissermassen einfrieren zu lassen. Das aus einem solchen Kunststoff hergestellte Modell wird zu diesem Zwecke bei erhöhter Temperatur in einem regulierbaren Heizofen belastet und in diesem Zustand langsam abgekühlt (1 bis 5°C in der Stunde, je nach Modelldicke). Die bei erhöhter Temperatur infolge der Belastung eingetretenen Verformungen sind dann im Modell «eingefroren» und bleiben auf Raumtemperatur auch nach der Entfernung der Belastung erhalten; dasselbe gilt auch für den als direkte

<sup>14)</sup> Da wir nur im Pfeilerschaft gemessen haben, hat man auf die Nachahmung der Kräfte  $W'_H2$  verzichtet.

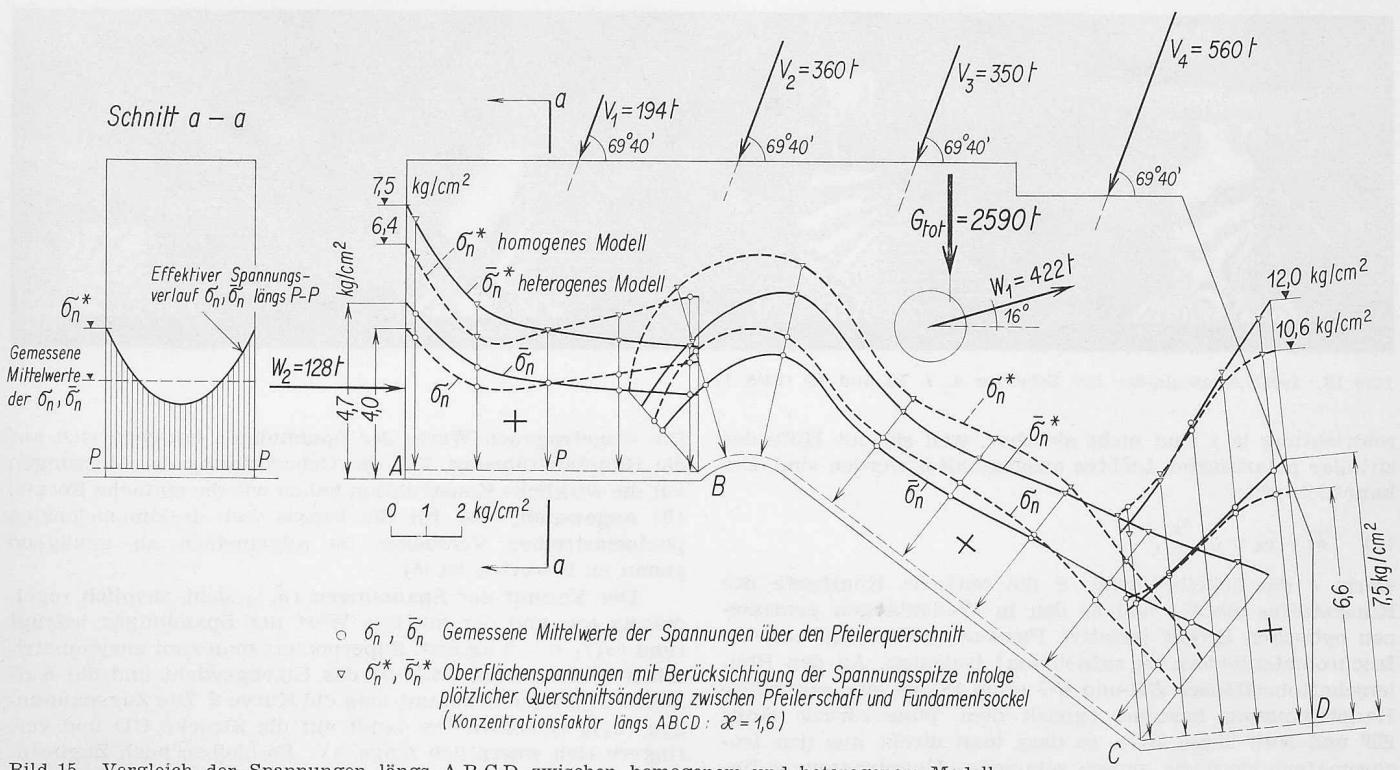


Bild 15. Vergleich der Spannungen längs A B C D zwischen homogenem und heterogenem Modell

Folge der Verformungen entstandenen optischen Effekt. Infolgedessen kann man das verformte Modell vorsichtig in dünne Scheiben zerschneiden und jedes Stück mit den bekannten Verfahren der zweidimensionalen Photoelastizität untersuchen. Das wichtigste an der räumlichen Auswertung ist die Festlegung der Lage und der Dicke der Schnitte im Modell. Man bemüht sich, die Schnitte möglichst parallel zur wichtigeren Hauptrichtung an der Modelloberfläche zu legen. Die Dicke kann je nach dem Charakter des untersuchten Spannungszustandes und der erforderlichen Genauigkeit zwischen 1 mm und 10 mm variieren. Die eben skizzierte Methode sei am Beispiel unserer Untersuchung näher erläutert.

Das im Belastungsrahmen eingebaute Modell, Bild 16, wurde zuerst in einem elektrischen Heizofen während 12 Stunden einer Temperatur von 160°C ausgesetzt; dann folgten die Belastung und eine langsame Abkühlung von 2°C pro Stunde. Bei Raumtemperatur wurden die Lasten entfernt und das Modell in 14 Scheiben senkrecht zur Linie ABCD mit einer Bandsäge vorsichtig zerschnitten, Bild 17.

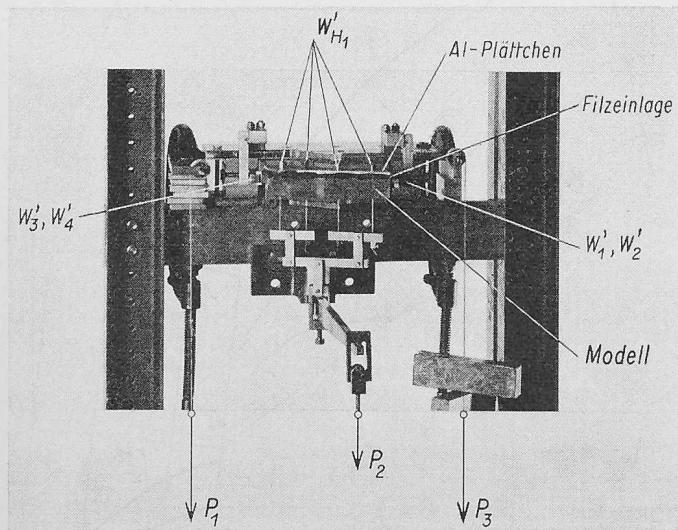


Bild 16. Versuchsanordnung für den seitlich unsymmetrischen Wasserdruck

Die maximale Scheibendicke betrug zuerst rd. 10 mm, in einer zweiten Bearbeitungsstufe wurde die Dicke auf etwa 3 mm verringert, um die Spannungsspitze längs ABCD genügend genau zu erfassen. Bild 18 zeigt die Spannungsfürmen der senkrecht zur Schnittebene mit monochromatischem gelbem Licht  $\lambda = 0,589 \mu$  durchgestrahlten Scheiben Nr. 4, 7, 10 und 13. Die sichtbaren dunklen Linien sind die Isochromaten, das heißt die Orte konstanter Differenz der sekundären Hauptspannungen  $\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_2$ <sup>15)</sup> oder der Spannung

$$\bar{\tau}_{\max} = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_2)$$

in der betrachteten Schnittebene. Die Isoklinen (Orte der Punkte, deren Hauptspannungsrichtung parallel zur Pola-

<sup>15)</sup> Die «sekundären Hauptspannungen» sind diejenigen Hauptspannungen, die aus den in der betrachteten Schnittebene liegenden Komponenten  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  und  $\tau_{xy}$  resultieren.

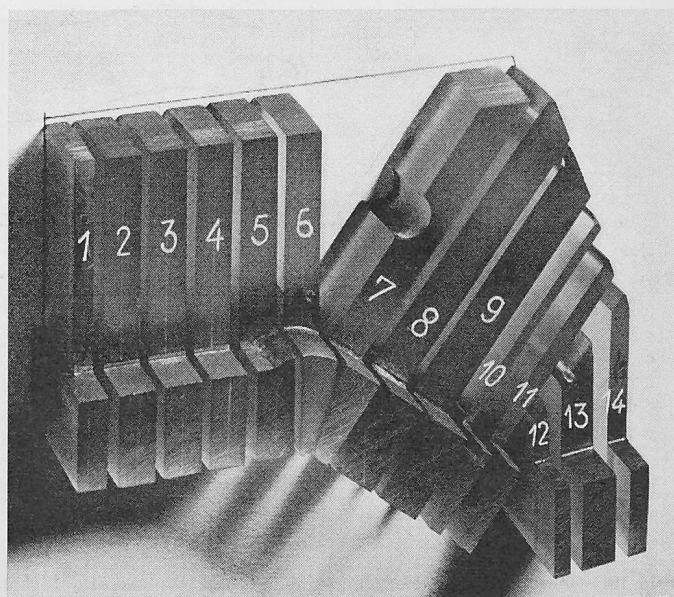


Bild 17. Anordnung der Schnitte am Modell zu Bild 16 für die Spannungsuntersuchung nach dem Erstarrungsverfahren

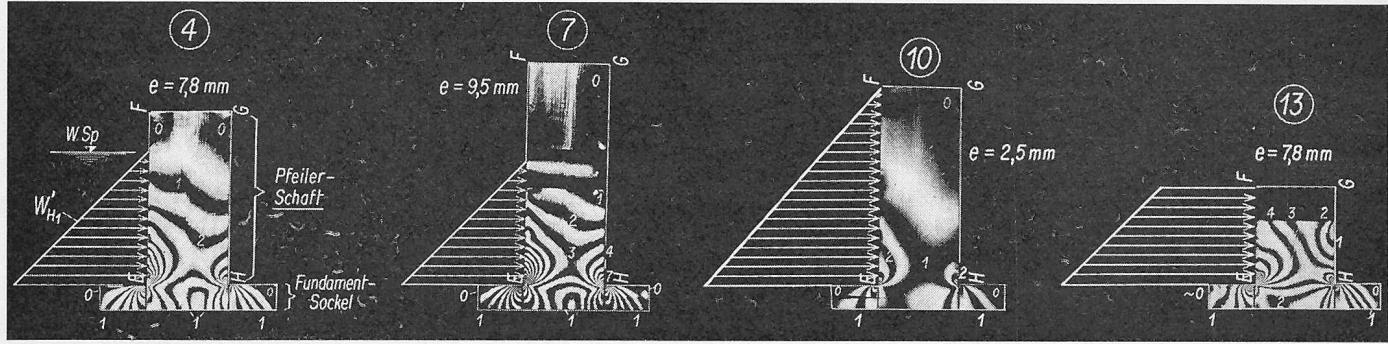


Bild 18. Isochromatenbilder der Scheiben 4, 7, 10 und 13 (Bild 17)

roldrichtung ist) sind nicht sichtbar, weil sie mit Hilfe des zirkular polarisierten Lichtes ausgeschaltet worden sind. Bekanntlich gilt:

$$(4) \quad \overline{\sigma}_1 - \overline{\sigma}_2 = S \frac{\delta_3}{e},$$

worin  $e$  die Scheibendicke,  $S$  die optische Konstante des Kunststoffes sind<sup>17)</sup> und  $\delta_3$  den in Wellenlängen gemessenen optischen Effekt (relative Phasenverschiebung, aus den Isochromatenbildern zu entnehmen) bedeuten. An den Pfeilerschaftoberflächen EF und HG (Bild 18) ist eine sekundäre Hauptspannung bekannt (gleich dem Wasserdruck längs EF und Null längs HG), so dass man direkt aus den Isochromatenbildern die andere sekundäre Hauptspannung finden kann, sobald die Konstante  $S$  bekannt ist. Ein auf reiner Biegung beanspruchter rechteckiger Balken, gleichzeitig mit dem Modell thermisch behandelt, lieferte das Diagramm 1 in Bild 19.

### c) Versuchsergebnisse

Zu bestimmen war der Verlauf der Zugspannungen  $(\sigma_n)_1$  an der Pfeileroberfläche, senkrecht zum Schnitte ABCD. Aus diesem Grunde wurde das Modell senkrecht zur Linie ABCD zerschnitten, Bild 17. Die Auswertung der Isochromatenbilder (Zugseite EF des Pfeilers) lieferte das Diagramm 1 in Bild 19.

<sup>16)</sup> Siehe Anhang, Abschnitt 1.

<sup>17)</sup> Es ist üblich, in der dreidimensionalen Photoelastizität statt mit der Konstante  $c$  (s. [1]) mit  $S = -1/c$  zu rechnen.

Die eingetragenen Werte der Spannungen beziehen sich auf die Hauptausrührung. Für die Uebertragung der Messungen auf die wirkliche Konstruktion haben wir die einfache Formel (3) angewandt, die für die Praxis bei dreidimensionalen photoelastischen Versuchen im allgemeinen als genügend genau zu bewerten ist<sup>18)</sup>.

Der Verlauf der Spannungen  $(\sigma_n)_2$  sieht ziemlich regelmässig aus und der mittlere Wert der Spannungen beträgt rund  $(\sigma_n)_1 = -5 \text{ kg/cm}^2$ . Superponiert man zum unsymmetrischen Wasserdruck (Bild 5) das Eigengewicht und die Auflasten  $G_{tot}$ , dann bekommt man die Kurve 2. Die Zugspannungen  $(\sigma_n)_2$  verschwinden damit auf die Strecke CD und verringern sich wesentlich längs AC. Es bleiben noch Zugbeanspruchungen, die längs AB, wo die Wirkung des Eigengewichts klein ist, den maximalen Wert rund  $-3 \text{ kg/cm}^2$  erreichen. Als zusätzliche stabilisierende äussere Kraft auf den Pfeiler wirkt nun die Vorspannung (Diagramm 3). Wir bemerken, dass die Spannungen  $(\sigma_n)_3$  in der mittleren Pfeilervariete zwischen BC grösstenteils verschwunden sind; es bleiben nur noch lokale Zugspannungen, deren maximaler Wert rund  $-1 \text{ kg/cm}^2$  beträgt. Wir erkennen hier deutlich die günstige Wirkung, die eine richtig angebrachte Vorspannung auf den Spannungszustand ausüben kann.

Fortsetzung folgt

<sup>18)</sup> Ein sogenannter «Masstabfehler» ist wegen den verschiedenen Poissonschen Zahlen zwischen Modell und Ausführung vorhanden.

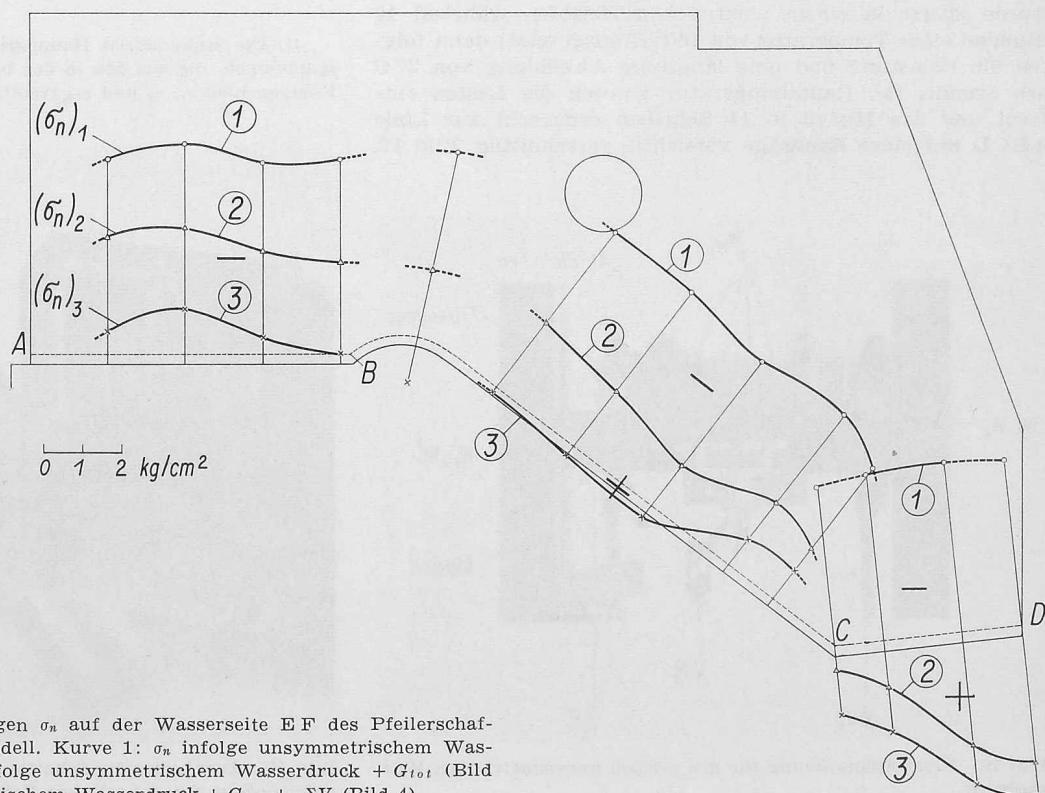


Bild 19. Oberflächen-Zugspannungen  $\sigma_n$  auf der Wasserveite EF des Pfeilerschaftes (Bild 18) beim homogenen Modell. Kurve 1:  $\sigma_n$  infolge unsymmetrischem Wasserdruck (Bild 5); Kurve 2:  $\sigma_n$  infolge unsymmetrischem Wasserdruck +  $G_{tot}$  (Bild 19); Kurve 3:  $\sigma_n$  infolge unsymmetrischem Wasserdruck +  $G_{tot}$  +  $\Sigma V$  (Bild 4)