

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 127/128 (1946)
Heft: 18

Artikel: Spannungsoptische Modelluntersuchung des Stauwehrpfeilers des Kraftwerkes Ruppenswil-Auenstein
Autor: Baud, R.V.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-83928>

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: 15.01.2026

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

Spannungsoptische Modelluntersuchung des Stauwehrpfeilers des Kraftwerks Ruppertswil-Auenstein

Von Ing. Dr. R. V. BAUD, EMPA, Zürich

I. Einleitung

Bei den neueren Stauwehren der grossen Niederdruckwerke wurden bis jetzt in der Regel Doppelschützen angewendet, die vertikal auf Rollen oder Rädern laufen und von mehreren, auf einer Windwerkbrücke befindlichen Windwerken gehoben bzw. gesenkt werden. Beim Kraftwerk Ruppertswil, das grosse Wehröffnungen und gleichzeitig eine verhältnismässig grosse maximale Stauhöhe aufweist, ist zum ersten Mal ein zweiteiliges Segmentwehr angewendet worden, das leicht und rasch bewegt werden kann (s. SBZ Bd. 123, S. 275*, 1944).

Die Drehlager der beiden Schützen sind auf kleinen Konsolen angebracht, die in die Pfeiler und Widerlager eingespannt sind. Sie befinden sich oberhalb des an dieser Stelle möglichen höchsten Wasserspiegels, Bild 1, sodass sie mühelos kontrolliert und unterhalten werden können. Andererseits hat aber diese Anordnung zur Folge, dass der gesamte Wasserdruck auf die Schützen als eine einzelne, konzentrierte Last auf die Pfeiler übertragen wird, was zu hohen Beanspruchungen führt, deren genügend genaue Berechnung erhebliche Schwierigkeiten bietet. Daher sah sich die Bauleitung veranlasst, spannungsoptische Modelluntersuchungen des Stauwehrpfeilers durchzuführen zu lassen.

Der Auftrag für die Durchführung der Untersuchungen konnte erst während des Absenkens der Fundamentcaissons erteilt werden. Trotzdem gelang es, die gewünschten Ergebnisse innert nützlicher Frist der Bauleitung zur Verfügung zu stellen. Hieraus erkennt man die grosse Leistungsfähigkeit der angewandten Methode. Sie hat weiter den Vorteil, dass Formgebungsmängel unmittelbar feststellbar sind; so konnten auch im vorliegenden Fall Verbesserungsvorschläge gemacht werden.

Die dreidimensionale Photoelastizität ist gegenwärtig noch nicht derart entwickelt, dass mit ihr komplizierte räumliche Spannungsprobleme rasch gelöst werden könnten. Da die Zeit drängte, musste das vorliegende Problem zweidimensional behandelt werden, was eine Reihe von Vereinfachungen hinsichtlich Gestalt und Belastung bedingte; so musste unter anderem von der Nachahmung der Abrundung des Pfeilers vorn und hinten, sowie der Dammbalkennuten und gewissen unsymmetrischen Belastungsfällen Umgang genommen werden.

Durch die Versuche waren folgende Daten zu ermitteln:

1. Hauptspannungsrichtungen im ganzen Pfeiler
 2. Randspannungen, auch die in der Queröffnung Q (s. Bild 1 u. 2)
 3. Spannungen in unmittelbarer Nähe des Einspannquerschnittes I—I des Pfeilers entsprechend Kote 351,60 m (s. Bild 1 und 15)
 4. Spannungen in einem Vertikalschnitt in der Nähe des Ueberganges B—E vom dicken zum dünnen Teil (s. Bild 15).
- In der Folge wurden folgende Modellschnitte gewählt:
Schnitt H—H, 2 mm oberhalb von I—I (s. Bild 15)
Schnitt V—V, 2 mm rechts von B—E (s. Bild 15).

II. Das Modell

Die Eisenbeton- und Betonbauten des Stauwehrs bestehen aus den beiden Pfeilern, den Endwiderlagern, den Pfeilerfundamenten und den Schwellen zwischen den Pfeilern (s. Bild 1). In statischer Hinsicht sind die Pfeiler als vollständig in ihre Fundamente eingespannte Konsolen zu betrachten. Diese Fundamente hat man daher als massive Betonblöcke von grossen Dimensionen ausgebildet. Beim Modell des Pfeilers wählte man sinngemäss als Einspannquerschnitt die Oberkante des Fundamentes (Kote 351,60 m). Die Pfeiler selbst weisen hauptsächlich zwei Breiten auf, nämlich flussaufwärts $t_1 = 5,40$ m und flussabwärts $t_2 = 3,10$ m, sodass $t_1/t_2 = 1,74$ ist.

Beim Entwurf Bau des Modells, Bild 2, galt es, die oben geschilderten Verhältnisse (Gestalt, Breiten und Einspannung) möglichst naturgetreu nachzuahmen.

Unserer Anregung gemäss wurden am Modell an den einspringenden Ecken, Koten 359,20 m und 356,30 m, kreisförmige Abrundungen mit Radien von 4 bzw. 2 mm angeordnet, entsprechend 40 bzw. 20 cm in Wirklichkeit. Die Queröffnung Q , die im ursprünglichen Entwurf eine sechseckige Form hatte, wurde zunächst im Modell und später dann auch in Wirklichkeit — gemäss unserer Anregung — in Form eines Schlitzes mit zwei halbkreisförmigen Enden ausgeführt; dies primär weil die ursprünglich vorgesehenen scharfen Ecken schwer messbare Spannungskonzentrationen ergeben hätten, deren Ermittlung beim Modellversuch zu Schwierigkeiten geführt hätte.

Hinsichtlich des untern Teils des Modells wurde das Fundament in der Flussrichtung, nicht aber in der vertikalen Richtung nachgeahmt. Man begnügte sich mit einer «Fundamenthöhe» von 80 mm (entsprechend 8,00 m in Wirklichkeit, statt 18,60 m). Da das Modell ohnehin schon im Schnitt I—I fest eingespannt ist (Bild 2), ist diese Abweichung von der Wirklichkeit praktisch belanglos.

Um die Einspannung nachzuahmen, wurde das Modell unterhalb des Schnittes I—I verstärkt, sodass es drei Dicken aufweist. Davon sind aber nur zwei von eigentlicher Bedeutung, nämlich: $t_{1M} = 7,55$ mm und $t_{2M} = 4,23$ mm; das Dickenverhältnis beträgt also beim Modell 1,78, statt 1,74 in Wirklichkeit. Diese Abweichung ist unwesentlich. Es wäre naheliegend gewesen, das Modell aus einem Stück herauszuarbeiten. Beim Fräsen eines Probemodells ergaben sich aber auf diese Art der Bearbeitung an der Oberfläche «Eigen»-Spannungen, weshalb auf die Herstellung des endgültigen Modells in dieser Weise verzichtet

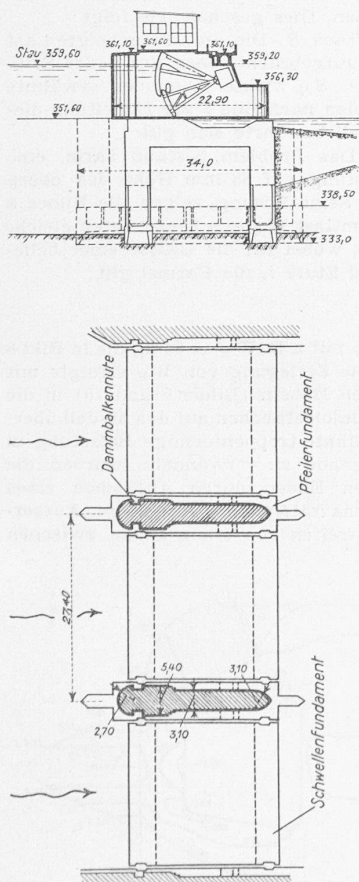


Bild 1. Anordnung des Stauwehrs, Masstab 1:1000

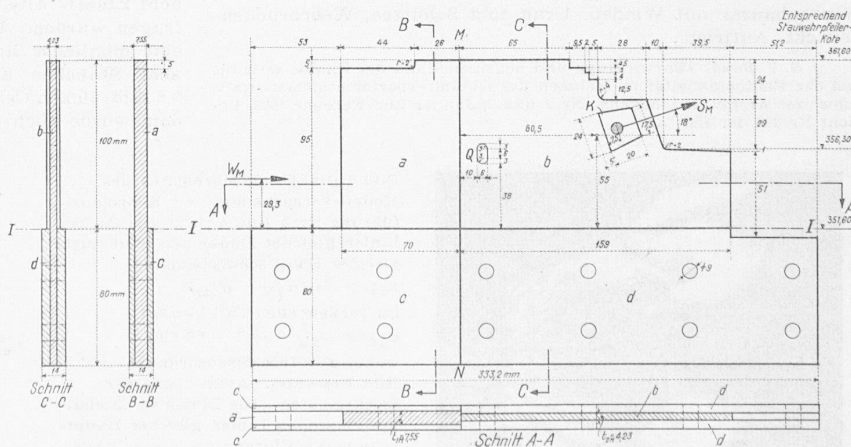


Bild 2. Modell des Wehrpfeilers, Modellmasstab gegenüber Wirklichkeit in «Längsrichtung» 1:100. Befestigung der beiden Konsolen «K» nach Bild 4. Reihenfolge des Modellaufbaues: a an b, zweimal c an a und zweimal d an b «geklebt»

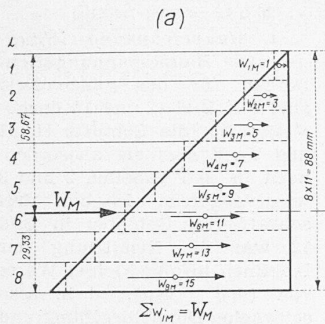


Bild 8. Nachahmung des linear ansteigenden Druckes; Zerlegung der Gesamtkraft W_M in acht Einzelkräfte

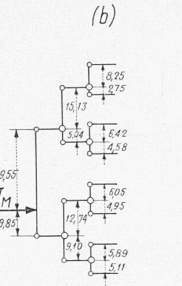


Bild 9. Schema des Hebelsystems

Belastungsvorrichtung und Modell einschieben, der auch ausgleichend wirkte insbesondere hinsichtlich lokaler Störungen infolge nie zu vermeidender Herstellungsgenauigkeiten. Wegen Zeitmangel konnte ein Eichversuch mit dieser Vorrichtung nicht durchgeführt werden. Bei den Versuchen am Pfeilermodell zeigte sich indessen keine sprunghafte, sondern eine gleichmässig ansteigende Verteilung der Kraft W_M , sodass bei der Auswertung der Messergebnisse angenommen werden konnte, dass sie in Wirklichkeit genügend genau dreieckförmig war.

3. Gesamtanordnung. Bild 11 zeigt das Modell und seine Belastungsvorrichtung. Das Modell ist zwischen Stahlplatten eingespannt, die durch mässig angezogene Schrauben zusammengehalten sind. Die kaum vermeidbaren Vorspannungen in Querrichtung bleiben so vernachlässigbar klein. Der Durchmesser der Schrauben war 3 mm kleiner als die entsprechenden Löcher im Modell, sodass die auf das Modell wirkenden Kräfte S_M und W_M effektiv durch Reibung an den Stahlplatten aufgenommen und von diesen auf den Rahmen übertragen wurden.

4. Modellbelastung. Bei den Versuchen wurden nacheinander zwei Laststufen gewählt:

1. Stufe: $S_M = 93,0$ kg, $W_M = 20,2$ kg, $S_M/W_M = 4,59$

2. Stufe: $S_M = 193,0$ kg, $W_M = 42,0$ kg, $S_M/W_M = 4,59$

Bei der ersten Stufe wurden die Randspannungen im meistbeanspruchten Teil des Modells, d. h. in der Umgebung des Angriffspunktes von S_M , gemessen. Diese verhältnismässig nied-

Tabelle 1. Spannungen am lastfreien Aussenrand und in der Queröffnung in kg/cm^2

Punkt	σ_{1M}	Punkt	σ_{1M}	Punkt	σ_{2M}	Punkt	σ_{2M}
8	5,2	14 a	263,6	18	— 76,8	26	— 34,2
9	8,3	15	217,9	18 a	— 267,7	27	— 42,8
10	11,0	16	128,7	19	— 74,7	M_2	— 43,4
11	9,2	16 a	282,2	20	— 18,7	M_4	— 37,3
12	6,1	17	217,9	21	0		
13	0	17 a	0	23	0		
13 b	178,5	M_1	78,9	24	— 6,7		
14	203,4	M_3	86,2	25	— 19,0		

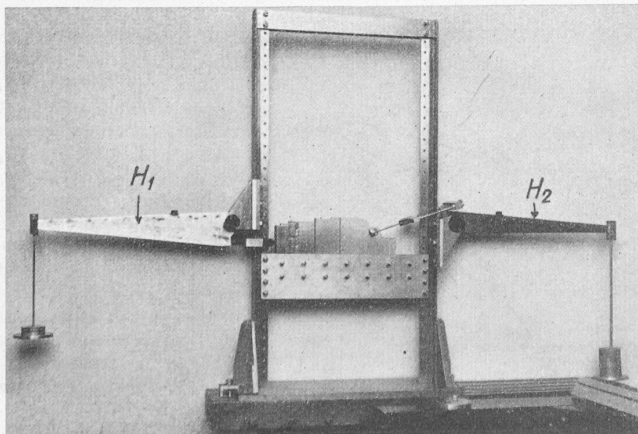


Bild 11. Versuchsanordnung. H_1 Hebel für die Horizontalkraft W_M , H_2 Hebel für die schräge Kraft S_M

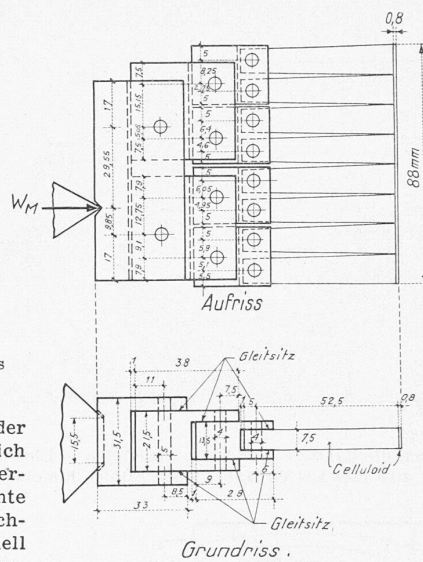


Bild 10. Tatsächlich ausgeführte Belastungsvorrichtung

rige Belastung war notwendig, um die betreffenden Spannungen innerhalb der Proportionalitätsgrenze des Materials zu halten. Die zweite Stufe wählte man so, dass die Spannungen in den weniger stark beanspruchten Gebieten gut messbar waren und gleichzeitig die durch die Vorversuche ermittelte Lastgrenze für S_M nicht überschritten wurde.

IV. Messmethoden

1. Hauptspannungsrichtungen.

Die Isoklinen wurden flächenhaft nach Methode A2²⁾ ermittelt. Aus ihnen lassen sich die Trajektorien auf graphischem Weg mit grosser Zuverlässigkeit und verhältnismässig rasch konstruieren³⁾.

2. Spannungsgrössen. a) Spannungen an lastfreien Rändern. Hier

²⁾ Loc. cit., siehe S. 7.

³⁾ Es handelt sich tatsächlich um eine graphische Integration, vergl. R. V. Baud, «Techn. Methoden photoelastischer Forschung», SBZ Bd. 100, S. 1*, 15* (Juli 1932).

Tabelle 2. Spannungsverteilung im Schnitt H-H in kg/cm^2

Punkt	Gemessene Werte			Aus den Messungen berechn. Werte				
	α	$\sigma_{1M} - \sigma_{2M}$	$\sigma_{1M} + \sigma_{2M}$	σ_{1M}	σ_{2M}	σ_{xM}	σ_{yM}	τ_{xyM}
27	0	42,8		0	— 42,8	0	— 42,8	0
28	65	39,1						15,0
29	52	35,5	— 58,1	— 11,3	— 46,8	— 23,6	— 34,5	16,9
30	45 1/2	35,5						17,7
31	43	30,6	— 42,2	— 5,8	— 36,4	— 22,2	— 20,0	15,2
32	43	31,2						15,5
33	38	36,1	22,9	29,5	— 6,6	7,1	15,8	17,5
34	35	44,0						20,7
35	34 1/2	52,6	35,8	44,2	— 8,4	8,5	27,3	24,5
36	36 1/4	54,4						25,9
37	35	49,2	28,1	38,6	— 10,5	5,6	22,5	23,1
38	40	48,3						23,8
39	45	46,5	33,6	40,0	— 6,4	16,8	16,8	23,2
40	42 1/2	46,5						23,1
41	45	44,6	20,8	32,7	— 11,9	10,4	10,4	22,3
42	48	45,3						22,5
42 a	49 1/2	42,6	15,9	30,2	— 14,3	11,8	4,1	22,0
43 a	50	27,2	10,3	18,8	— 8,5	7,7	2,6	13,4
44	50 1/2	25,5						12,5
45	44 1/2	26,5	9,0	17,8	— 8,8	4,3	4,7	13,3
46	40 1/2	27,2						13,4
47	37 1/2	28,9	16,8	22,8	— 6,0	4,7	12,1	14,0
48	35	27,2						12,8
49	34	33,7	21,4	27,5	— 6,1	4,4	17,0	15,6
50 b	26	57,7						22,7
50	0	48,8		36,5	— 12,3	— 12,3	— 36,5	0

Tabelle 3. Spannungsverteilung im Schnitt V-V

Punkt	Gemessene Werte			Aus den Messungen berechn. Werte				
	α	$\sigma_{1M} - \sigma_{2M}$	$\sigma_{1M} + \sigma_{2M}$	σ_{1M}	σ_{2M}	σ_{xM}	σ_{yM}	τ_{xyM}
7 a	0	1,2	1,2	1,2	0	1,2	0	0
56	72	4,9						1,4
57	70	9,8	6,1	8,0	— 1,9	6,8	— 0,7	3,1
58	58	15,3						6,9
59	59 1/2	21,4	12,8	17,1	— 4,3	11,6	1,2	9,4
60	55	31,2						14,6
61	37 1/2	26,3	20,8	23,6	— 2,8	7,0	13,8	12,7
62	49 1/2	33,6						16,6
63	50	39,1	33,6	36,4	— 2,8	20,2	13,4	19,3
64	50	41,0						20,2
42 a	49 1/2	44,6	15,9	30,2	— 14,3	11,8	4,1	22,0

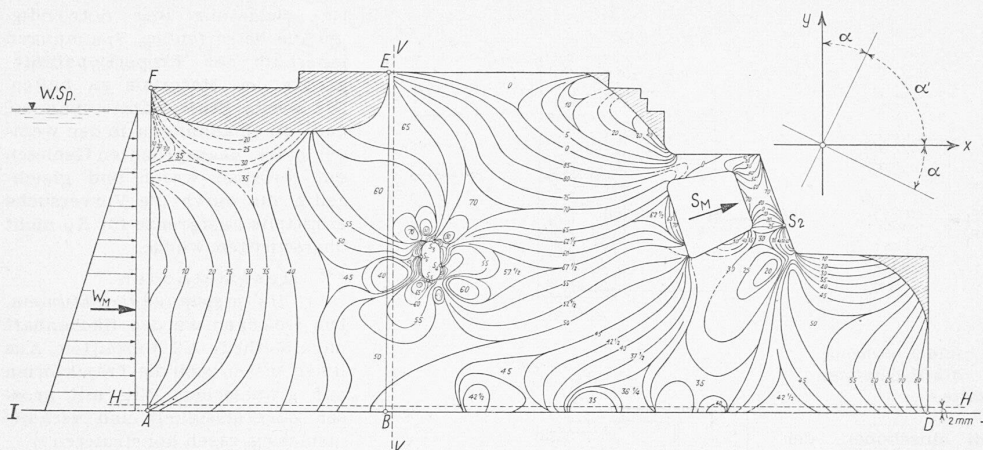


Bild 12. Isoklinen für die Belastung durch die Kräfte S_M und W_M (Isoklinen = Linien gleicher Neigung der Hauptspannungsrichtungen, also gleicher Winkel α , siehe Bild rechts oben)

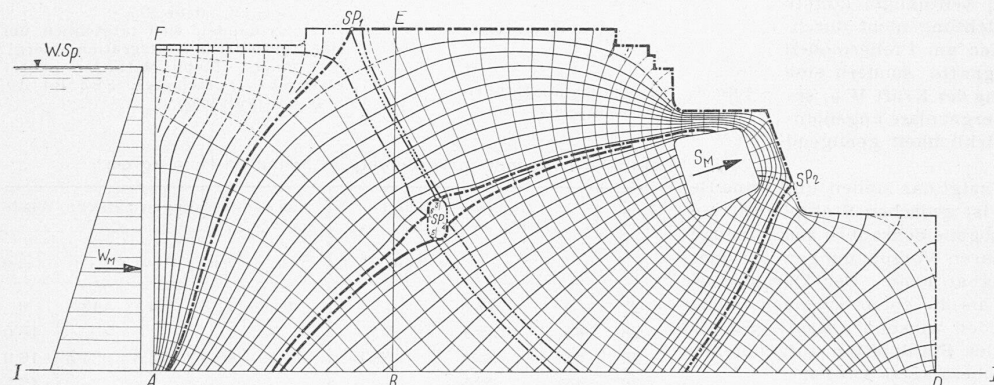


Bild 13. Hauptspannungstrajektorien für die Belastung durch die Kräfte S_M und W_M . Mittelstark ausgezogen: Hauptspannungsrichtung s_1 ; schwach ausgezogen: Hauptspannungsrichtung s_2 ; — Grenztrajektorien S_1 , — Grenztrajektorien S_2

ist eine der beiden Hauptspannungen gleich Null und die andere direkt nach der Methode B 3²⁾ punktweise ermittelbar.

b) *Spannungen im Innern.* Hierfür wurden folgende Grössen punktweise ermittelt: Die *Hauptspannungsdifferenzen* ($\sigma_{1M} - \sigma_{2M}$) = $2\tau_{M \max}$, nach Methode B 3, und die *Hauptspannungssummen* ($\sigma_{1M} + \sigma_{2M}$) nach der Lochmethode E1²⁾ unter Zuhilfenahme der Methode B 3. Die Genauigkeit der Summenmessungen ist etwa halb so gross wie die der Differenzmessungen.

c) *Spannungen an belasteten Rändern.* Im Prinzip müssen solche Ränder wie unter b) behandelt werden. In gewissen Fällen kann man jedoch auf die Summenmessung verzichten, wenn keine Tangentialspannung (Reibung) vorhanden und eine der beiden Hauptspannungen von vornherein bekannt ist. Auf diese Art wurde in der vorliegenden Untersuchung die längs der Vorderkante A—F wirkende Spannung σ_{1M} bestimmt (vgl. Abschnitt V/2c).

²⁾ Loc. cit., s. S. 7.

Die Bezeichnung der beiden Hauptspannungen hat mangels fester Regeln von Fall zu Fall zu erfolgen. Hierbei hat sich folgendes Verfahren des Verfassers bewährt: Man bezeichnet diejenige Richtung s_1 , in der sich die bedeutsamste der äusseren Kräfte ins Innere des Körpers fortsetzt, als die von s_1 . Es ergibt sich so meist ein engeres Bündel (B_1) von ähnlich gerichteten Trajektorien, das also die Richtung von σ_1 angibt. Jedes andere Bündel von Trajektorien (B_2), das das Erste senkrecht kreuzt, gibt die Richtung von s_2 an. Weitere Bündel, die ihrerseits dasjenige von B_2 senkrecht durchsetzen, sind dann wieder solche von s_1 -Trajektorien. Im vorliegenden Fall ist die Kraft S_M die weitaus bedeutsamere der beiden wirkenden Kräfte und es lag deshalb auf der Hand, die mittelstark gezogenen Trajektorien, die, wie aus Bild 13 ersichtlich, den Angriffspunkt der Kraft S_M umschlingen, als s_1 -Richtung zu wählen. Die Spannungsmessungen in den Schnitten H—H und V—V zeigten denn auch, dass hier $\sigma_{1M} > \sigma_{2M}$ ist, was mit den oben gemachten Bemerkungen über die zweckmässigste Bezeichnung sinngemäss übereinstimmt.

Für den Rand und die Queröffnung ergab sich so folgende Bezeichnung (Bild 13 u. 14): Von A bis F, SP_1 bis SP_2 , SP_4 bis SP_5 , SP_6 bis SP_3 ist die Randspannung gleich σ_{1M} ; von F bis SP_1 , SP_2 bis D, SP_3 bis SP_4 , SP_5 bis SP_6 ist die Randspannung gleich σ_{2M} . Dieser Wechsel der Randspannungsbezeichnung wird im vorliegenden Fall dadurch verursacht, dass das Trajektorienbild eine Reihe von Grenztrajektorien S (strichpunktierte Linien in Bild 13) aufweist. Es sind dies Trajektorien mit örtlichen Unstetigkeitsstellen der

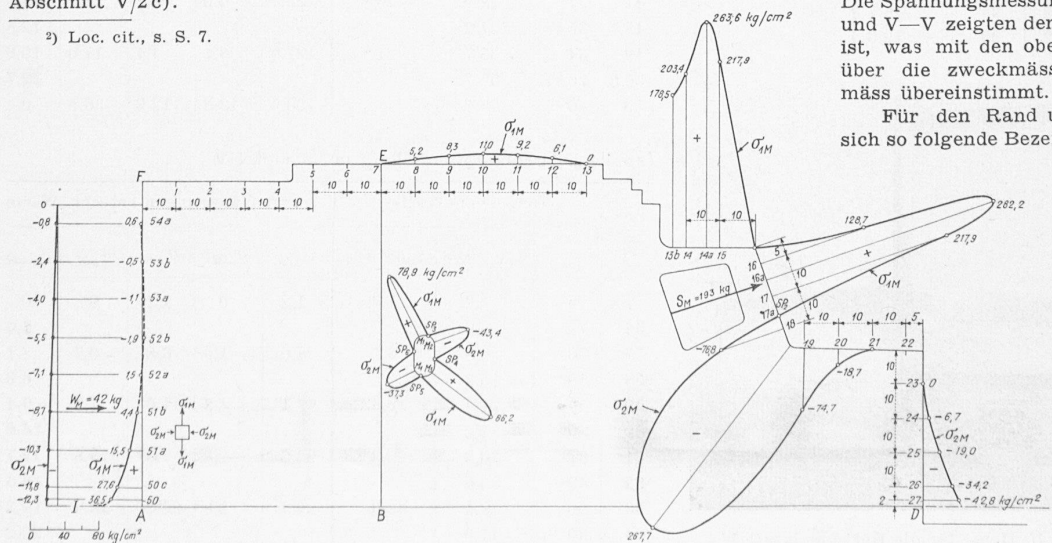


Bild 14. Randspannungen

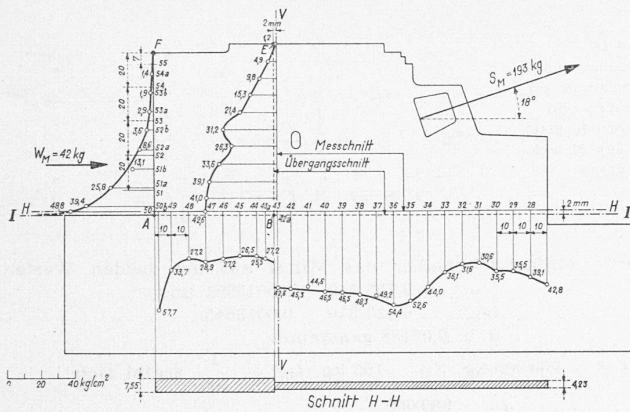


Bild 15. Hauptspannungsdifferenzen $\sigma_{1M} - \sigma_{2M}$ für den Rand A-F und die Schnitte H-H und V-V

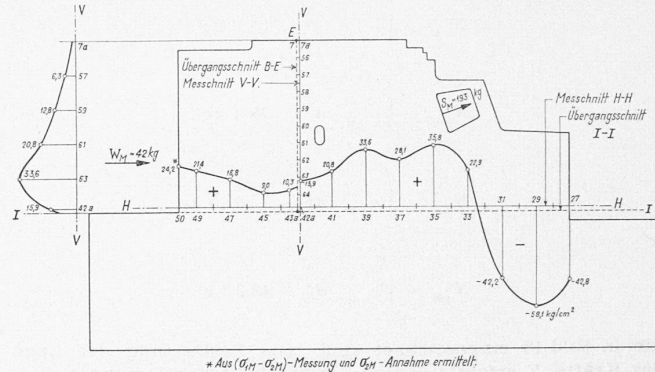


Bild 16. Hauptspannungssummen $\sigma_{1M} + \sigma_{2M}$ für die Schnitte H-H und V-V

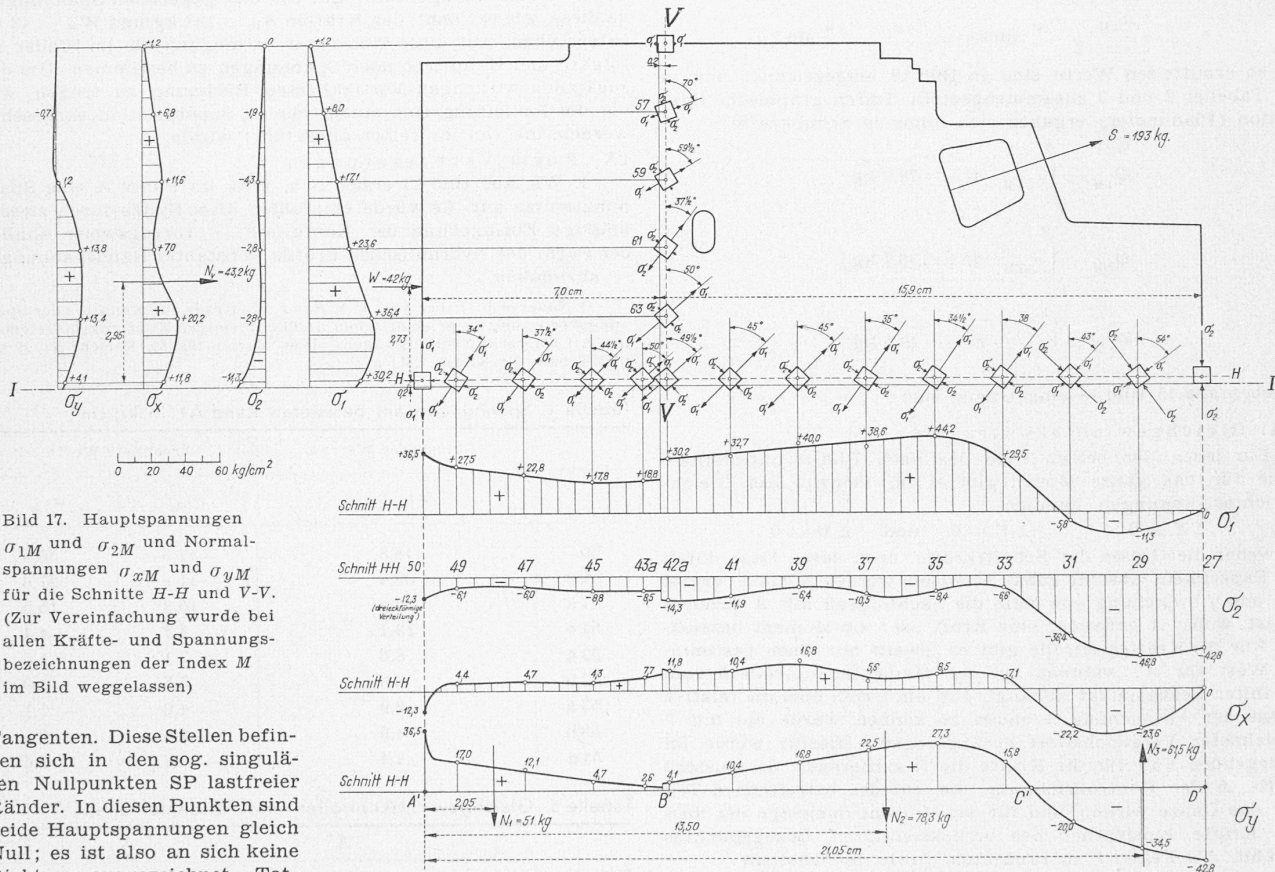


Bild 17. Hauptspannungen σ_{1M} und σ_{2M} und Normalspannungen σ_{xM} und σ_{yM} für die Schnitte H-H und V-V. (Zur Vereinfachung wurde bei allen Kräfte- und Spannungsbezeichnungen der Index M im Bild weggelassen)

Tangenten. Diese Stellen befinden sich in den sog. singulären Nullpunkten SP lastfreier Ränder. In diesen Punkten sind beide Hauptspannungen gleich Null; es ist also an sich keine Richtung ausgezeichnet. Tatsächlich sind jedoch «Grenz»-Richtungen vorhanden, in denen die Grenztrajektorien unter einem bestimmten, von 90° abweichenden Winkel vom Rand ins Innere abbiegen.

2. Spannungsgrößen. a) Spannungen am lastfreien Aussenrand und an der Queröffnung. Die Randspannungen σ_{1M} und σ_{2M} sind in Bild 14 eingezeichnet und in Tabelle 1 zusammengestellt. Gewisse Messungen, so die in den Punkten 13b bis 21, wurden, wie bereits in Abschnitt III erwähnt, mit der unteren Laststufe ausgeführt. Um die so ermittelten Werte mit den übrigen direkt verglichen zu können, wurden sie auf die obere, für alle übrigen Spannungsmessungen zutreffende Laststufe $S_M = 193 \text{ kg}$, $W_M = 42 \text{ kg}$ umgerechnet.

b) Spannungen im Inneren. Die Hauptspannungsdifferenzen für die Schnitte H-H und V-V zeigen Bild 15, sowie Tabellen 2 und 3, die Hauptspannungssummen Bild 16 und Tabellen 2 und 3.

c) Spannungen am belasteten Rand A-F. Die Spannung σ_{1M} in Richtung A-F wurde, wie bereits angedeutet, aus dem gemessenen Wert ($\sigma_{1M} - \sigma_{2M}$) dadurch ermittelt, dass man σ_{2M} als bekannt voraussetzte; hierbei wurde die Annahme, W_M sei genau dreieckförmig verteilt, gemacht. Die gemessenen und daraus auf oben angegebene Weise berechneten Werte sind in Tabelle 4 angegeben.

VI. Auswertung der Messergebnisse

1. Trennung der Hauptspannungen. Aus den für die Schnitte H-H und V-V gemessenen Differenzen und Summen der Hauptspannungen lassen sich σ_{1M} und σ_{2M} getrennt bestimmen, mit den für diese Schnitte in Bild 17 aufgetragenen und in den Tabellen 2 und 3 zusammengestellten Ergebnissen. Damit ist der Spannungszustand in den beiden ausgemessenen Schnitten eindeutig festgelegt, da ja die Winkel α nicht nur für diese Schnitte, sondern gemäss Bild 12 und 13 für das ganze Feld bekannt sind.

2. Ermittlung der Normalspannungen und Normalkräfte senkrecht zu den betrachteten Schnitten. Aus den Hauptspannungsrichtungen $\alpha = 90^\circ - \alpha'$ (Bild 12, rechts oben), den Differenzen ($\sigma_{1M} - \sigma_{2M}$) und den Summen ($\sigma_{1M} + \sigma_{2M}$) ergibt sich unmittelbar:

$$\sigma_{xM} = \frac{\sigma_{1M} + \sigma_{2M}}{2} + \frac{\sigma_{1M} - \sigma_{2M}}{2} \cos 2\alpha' = (\sigma_{1M} + \sigma_{2M}) - \sigma_{yM}$$

$$\sigma_{yM} = \frac{\sigma_{1M} + \sigma_{2M}}{2} - \frac{\sigma_{1M} - \sigma_{2M}}{2} \cos 2\alpha' = (\sigma_{1M} + \sigma_{2M}) - \sigma_{xM}$$

Die so ermittelten Werte sind in Bild 17 aufgetragen und in den Tabellen 2 und 3 zusammengestellt. Durch graphische Integration — Planimetrieren — ergaben sich folgende Normalkräfte:

$$N_{1M} = \int_{A'}^{B'} \sigma_{yM} \cdot df = 51,0 \text{ kg}$$

$$N_{2M} = \int_{B'}^{C'} \sigma_{yM} \cdot df = 78,3 \text{ kg}$$

$$N_{3M} = \int_{C'}^{D'} \sigma_{yM} \cdot df = -61,5 \text{ kg}$$

$$N_{4M} = \int_{D'}^E \sigma_{xM} \cdot df = 43,2 \text{ kg}$$

die in Bild 18 eingezeichnet sind. Die Festsetzung der Lage der Kräfte N erfolgte analog Schwerpunktsbestimmungen.

3. *Ermittlung der Schubspannungen und Schubkräfte in Richtung der betrachteten Schnitte.* Aus den gemessenen Hauptspannungsneigungen $\alpha = 90^\circ - \alpha'$ und den Differenzen ($\sigma_{1M} - \sigma_{2M}$) erhält man ferner:

$$\tau_{xyM} = \frac{\sigma_{1M} - \sigma_{2M}}{2} \sin 2\alpha' = \frac{\sigma_{1M} - \sigma_{2M}}{2} \sin 2\alpha$$

Die so ermittelten Werte sind in Bild 19 eingezeichnet und in den Tabellen 2 und 3 zusammengestellt. Durch graphische Integration (Planimeter) ergaben sich folgende Schubkräfte:

$$Q_{1M} = \int_{A'}^{B'} \tau_{yxM} \cdot df = 79,3 \text{ kg}$$

$$Q_{2M} = \int_{B'}^{D'} \tau_{yxM} \cdot df = 136,7 \text{ kg}$$

$$Q_{3M} = \int_{D'}^E \tau_{xyM} \cdot df = 49,5 \text{ kg}$$

die ebenfalls in Bild 18 eingetragen sind.

VII. Gleichgewichtskontrollen

Für jeden der beiden Teile des nach Bild 18 unterteilten, sowie für das ganze Modell gibt es im Prinzip drei Gleichgewichtsbedingungen, nämlich:

$$\Sigma X = 0 \quad \Sigma Y = 0 \quad \text{und} \quad \Sigma M = 0$$

Da weder die Grösse der Schnittkräfte, noch deren Lage durch das Experiment absolut genau ermittelt werden können, ergibt sich eine Abweichung von Null, die nachfolgend mit A bezeichnet ist, wobei A entweder eine Kraft oder ein Moment bezeichnet. Für die Kräftekontrolle gibt es jeweils nur einen bestimmten Wert für A , während bei der Momentenkontrolle A vom gewählten Bezugspunkt abhängt. Um ein Urteil über die relative Grösse der Abweichung A bilden zu können, wurde ein mit V bezeichneter Vergleichswert herangezogen. Hierfür wurde im vorliegenden Fall für die Kräfte die Resultierende der äusseren Kräfte in der Kontrollrichtung, die auf den betreffenden Teil oder das Ganze wirken, und für das Moment dasjenige der äusseren Kräfte hinsichtlich des berücksichtigten Bezugspunktes gewählt. Als Fehler F in Prozenten wurde der Quotient:

$$F = \frac{A \cdot 100}{V}$$

bezeichnet. Die so für die in Bild 18 angegebenen Kräfte ermittelten Werte A , V und F zeigt Tabelle 5. Wie ersichtlich, ist der mittlere Fehler etwa 8 %, was in Anbetracht des Umstandes, dass erhebliche, durch die Problemstellung bedingte Schwierigkeiten vorhanden waren und die Untersuchung sehr rasch durchgeführt werden musste, als durchaus angemessen zu betrachten ist.

VIII. Uebertragung der Ergebnisse des Modellversuchs auf die wirkliche Konstruktion

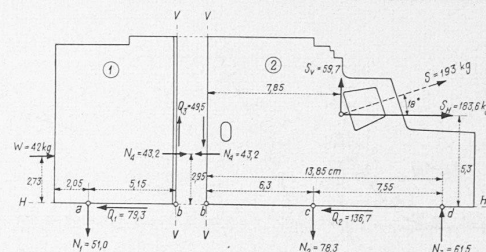
Da die vorliegende Aufgabe als zweidimensionales Spannungsproblem behandelt wurde, kann die Uebertragung auf übliche Weise, d. h. auf Grund der nachfolgenden Formel erfolgen:

$$\frac{\sigma}{\sigma_M} = \frac{S}{S_M} \cdot \frac{l_M}{l} \cdot \frac{t_M}{t}$$

in der σ , S , l und t die Spannung, Kraft, Länge und Breite des Bauwerks, σ_M , S_M , l_M und t_M die entsprechenden Modellgrössen bedeuten.

Wie aus Abschnitt II hervorgeht, beträgt das Breitenverhältnis t_1/t_2 in der Wirklichkeit 1,74 gegenüber $t_{1M}/t_{2M} = 1,78$ im Modell. Für das in obiger Formel auftretende Verhältnis t_M/t

Bild 18.
Gleichgewichtskontrollen der äusseren und inneren Kräfte.
(Index M weggelassen)



wurde einfachheitshalber das Mittel aus den beiden Werten

$$t_{1M}/t_1 = 0,755/540 = 0,0013981 \text{ und}$$

$$t_{2M}/t_2 = 0,423/310 = 0,0013645$$

d. h. 0,00138 genommen.

Mit $S = 960\,000 \text{ kg}$, $S_M = 193 \text{ kg}$, $l_M/l = \frac{1}{100}$ ergibt sich:

$$\frac{\sigma}{\sigma_M} = \frac{960\,000}{193} \cdot \frac{1}{100} \cdot 0,00138 = 0,0687$$

Dieser Umrechnungsfaktor gilt für alle gegebenen Spannungen, da diese, wie erwähnt, den Kräften $S_M = 193 \text{ kg}$ und $W_M = 42 \text{ kg}$ entsprechen. Auf diese Weise war es möglich, die im Pfeiler infolge S und W auftretenden Spannungen zu bestimmen. Um den zusätzlich wirkenden Vertikallasten Rechnung zu tragen, war von der Bauleitung eine entsprechende Superposition vorgesehen worden, die von ihr selber ausgeführt wurde.

IX. Form-Verbesserungen

1. Wie aus Bild 15 ersichtlich, tritt im Punkt A eine Spannungsspitze auf. Es wurde empfohlen, diese Spitze durch zweckmässige Formgebung der Kante AF — vorzugsweise ähnlich der Form des hydraulischen Profils konstanter Randspannung⁴⁾ — abzubauen.

⁴⁾ Näheres hierüber vgl. R. V. Baud: «Beiträge zur Kenntnis der Spannungsverteilung in prismatischen und keilförmigen Konstruktionselementen mit Querschnittübergängen», Diss. Zürich 1933/34, Bericht Nr. 29 des SVMT bzw. Nr. 83 der EMPA.

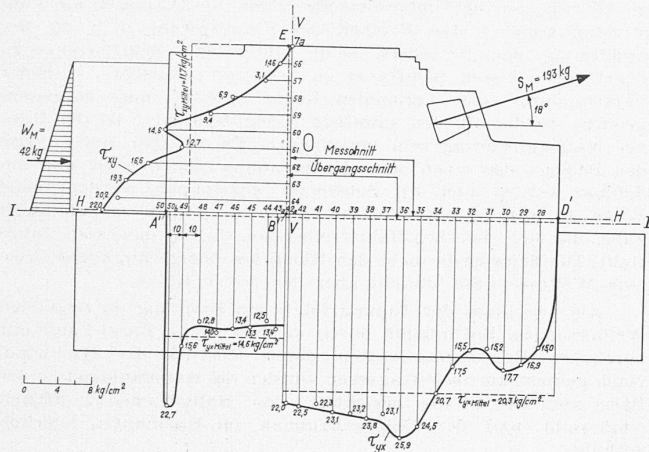
Tabelle 4. Spannungen am belasteten Rand AF in kg/cm²

Punkt	Gemessene Werte	Berechnete Werte	
	$2\tau_{\max}$	σ_{2M}	σ_{1M}
50	48,8	-12,3	36,5
50 c	39,4	-11,8	27,6
51 a	25,8	-10,3	15,5
51 b	13,1	-8,7	4,4
52 a	8,6	-7,1	1,5
52 b	3,6	-5,5	-1,9
53 a	2,9	-4,0	-1,1
53 b	1,9	-2,4	-0,5
51 a	1,4	-0,8	0,6

Tabelle 5. Gleichgewichtskontrollen und Absolutfehler in %

Kontrollen	Teil	A				V	F
		ΣX_M	ΣY_M	ΣM_M		Vergleichskraft bzw. Moment	Absolutfehler
		kg	kg	Bezugs-Punkt	Moment cmkg	kg, cmkg	%
1	(1)	5,9				42	14,0
2	"		1,5				
3	"			a	-12,8	114,7	11,1
4	"			b	-20,5	114,7	17,8
5	(2)	3,7				183,6	2,0
6	"		6,6			59,7	11,0
7	"			b	18,6	504,5	3,7
8	"			c	-22,9	880,6	2,6
9	"			d	-72,8	1331,1	5,5
10	(1) + (2)	9,6				225,6	4,2
11	"		8,1			59,7	13,5
12	"			a	39,7	311,7	12,7
13	"			b	-1,9	619,2	0,4
14	"			c	-53,0	995,3	5,3
15	"			d	-114,2	1446,0	7,9

(+) bedeutet Moment im Uhrzeigersinn.

Bild 19. Schubspannungen $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ in den Schnitten H-H und V-V

2. Auf die Bedeutung der Abrundung der einspringenden Ecke des Wehrbrückenaufagers und des darunter liegenden Absatzes (Koten 359,20 m und 356,30 m, Bild 1) wurde bereits in Abschnitt II dieses Berichtes hingewiesen. Durch die Anordnung eines Radius von 4 mm (40 cm in Wirklichkeit) an der erstgenannten Stelle wurde ohne Zweifel die Spannungsspitze, die man bei den Vorversuchen dort feststellte, weitgehend abgebaut. Die Abrundung $r = 2$ mm (20 cm in Wirklichkeit) entsprechend Kote 356,30 m dagegen ist noch klein, indem dort immer noch eine erhebliche Spannungsspitze (allerdings Druck) auftritt, vgl. Bild 14.

3. Obschon die Queröffnung des Modells mit zwei grossen Rundungen ausgeführt ist — statt sechs Ecken wie auf dem ursprünglichen Bauprojekt — sind dort immer noch zwei Zugspannungsspitzen (und nebenbei bemerkt zwei Druckspannungsspitzen) vorhanden, denen bei der Armierung Rechnung zu tragen war.

4. Was die Formgebung der Konsolen — Schützenwiderlager — anbelangt, sei auf die Bemerkungen in Abschnitt II hingewiesen.

X. Schlussbemerkung

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass auf Grund der spannungsoptischen Untersuchung

1. die Armierung des Pfeilers zweckmässiger als nach der Rechnung allein dem Spannungsverlauf angepasst und dadurch an Armierungsgewicht gespart werden konnte, was bei den damaligen Materialbeschaffungsverhältnissen von grosser Bedeutung war.

2. die Formgebung an verschiedenen Stellen des Bauwerks verbessert werden konnte.

Damit war einmal mehr erwiesen, welche Bedeutung der Spannungsoptik überall in der Technik, wo Spannungsprobleme zu lösen sind, zukommt.

Der Kraftwerk Ruppertswil-Auenstein A.-G. sei an dieser Stelle für die Erlaubnis, die spannungsoptischen Versuche und ihre Ergebnisse in Form der vorliegenden Veröffentlichung und einer spätern Ergänzung einem grösseren Leserkreis zur Kenntnis bringen zu dürfen, bestens gedankt.

Internationale Schifffahrtstagung Basel 1946

Die internationale Schifffahrtstagung in Basel, am 11. und 12. Oktober 1946 abgehalten, erwies sich als eine eindrucksvolle Manifestation des Anteils, den die Schweiz und besonders die so aktive Handels- und Verkehrsstadt Basel am Rhein als Schifffahrtsstrasse und als Zugang zum offenen Meere nimmt.

Im Namen des Organisationskomitee begrüsst der Kongress-Präsident, Nationalrat Dr. N. Jaquet, Präsident der Basler Vereinigung für Schweizerische Schifffahrt, die im Grossratssaal versammelten 250 Kongressteilnehmer: Botschafter A. Thierry, Paris, Präsident der Rhein-Zentral-Kommission (RZK); Charbonnier, Brüssel, Belgischer Vertreter der RZK, Leemans, Direktor des Hafens von Antwerpen; Bonet-Maury, Strassburg, Pelletier, Paris, Verhey, Strassburg, Mc Clure, Paris, die Vertreter Frankreichs der RZK, R. Graff, Direktor des Hafens von Strassburg, R. Martin, Paris, directeur de l'Office National de la Navigation, Dr. Walther, Strassburg, Generalsekretär der RZK; die Brigade-Generäle Mance, London, und Walter, Duisburg, die Vertreter Englands in der RZK; Boogerd, Amsterdam, directeur des ports maritime et aérien, Kiewiet de Jonge, Rotterdam, und Schaepman, den Haag, die Vertreter Hollands in

der RZK, Koomans, Direktor des Hafens von Rotterdam; als Vertreter der Besetzungsmächte, Brigadegeneral Walls (brit. Zone-, Col. Neff und Lt.-Col. Boyd (amerik. Zone) und Noël-Mayer (franz. Zone); die Vertreter des Rhine Interim Working Committee, Duisburg. Die Basler Behörden bekundeten das Gewicht der Tagung durch die Uebernahme des Ehrenpräsidiums durch Ständerat Regierungsrat G. Wenk, Vorsteher der Schifffahrtsdirektion, und die Anwesenheit des Regierungspräsidenten Dr. Peter und der Regierungsräte Brechbühl, Dr. Ebi, Dr. Milville, Dr. Zschokke und Dr. Zweifel, sowie des Direktors des Rheinschiffahrtsamtes, Dr. A. Schaller. Basel-Land vertrat seine Hafeninteressen durch die Regierungsräte Leupin und Dr. Gschwind. Die Eidg. Behörden waren vertreten durch Nationalratspräsident Grimm, Legationsrat Dr. P. Hohl vom EPD, Dr. J. Hotz, Direktor der Handelsabteilung des EVD, Dr. C. Mutzner, Direktor des Eidg. Amtes für Wasserwirtschaft, R. Furrer, Oberzolldirektor, Bern. Leitende Vertreter von Schifffahrtsinteressen waren anwesend aus England, U. S. A., Holland, Belgien, Frankreich, Italien und der Schweiz.

Die Reihe der Vorträge eröffnete Charbonnier, Brüssel, mit einem Bericht über «Die belgische Binnenschifffahrt». Die Schifffahrt in Belgien war bis 1940 für alle Nationen völlig frei. 1939 besass Belgien 7000 Kanalkähne mit 2,5 Mio t; infolge Zerstörung und Abtransport waren bei der Befreiung noch 3500 vorhanden. Nach dem Krieg begann auf 50 Werften die Reparatur; Schiffe wurden gehoben; durch verschiedene Missionen wurden die bis Norwegen und Russland verschleppten Kähne zurückgeholt. Heute sind 5300 Kanalschiffe mit 1,9 Mio t vorhanden. Die Frachtpreise sind auf das dreifache von 1939 gestiegen. Es hat sich als notwendig erwiesen, die Frachtverteilung durch eine besondere Verwaltungsorganisation zu regeln, da mehr Schiffsraum als Fracht vorhanden ist. Zur Fahrt bis Strassburg und Basel benötigt Belgien Selbstfahrer mit stärkeren Motoren.

Anschliessend sprach R. Graff, Directeur du Port Autonome de Strasbourg, über «Die französische Rheinschifffahrt seit dem Kriege». 1938 betrug der Hafenverkehr in Strassburg 5,5 Mio t, 1939 umfasste die französische Rheinflotte 0,37 Mio t, entsprechend 5 % der gesamten Rheinflotte, von der 45 % unter holländischer, 33 % unter deutscher Flagge fuhr. Heute ist ein Viertel des früheren Bestandes vorhanden. An einem grossen Schiffbau-Programm wird gearbeitet; Schlepper und Selbstfahrer (von 480 PS) werden vor allem benötigt.

An diese Vorträge schloss sich ein Empfang der Kongress-Teilnehmer im Stadt-Casino durch die Regierung von Basel. In seinen mit Wärme vorgetragenen Begrüßungsworten wandte sich Regierungsrat G. Wenk an den französischen Präsidenten der RZK: Dies Präsidium in den Händen Frankreichs bedeute ein Symbol: das der Freiheit des Rheines; der Garantie, dass die Schweiz auf diesem Strome ungehindert und frei fahren könne; es bedeute ein Symbol einer Staatsidee, derzufolge auf dem Rhein nicht die Macht, sondern das Recht entscheiden soll. Es komme nicht oft vor, dass Kantone dem Bund danken; aber hier sei Gelegenheit, den Instanzen zu danken, die geholfen haben, die Welt für Basel wieder zu öffnen. Besonderer Dank der Basler Regierung gebühre Direktor Mutzner für seine grosse Initiative zur Wiedererschliessung des Rheinverkehrs.

Das anschliessende gemeinsame Nachtessen mit 250 Gedecken bot Gelegenheit zu persönlichem Kontakt der Teilnehmer. Die bei gehobener Stimmung dargebotenen gediegenen Unterhaltungen — Trommler und Pfeifer der «Läli-Cligue», Jodlergruppe — erfreuten und beeindruckten ausländische und Schweizer Gäste.

Am Samstag wurden die Vorträge im Grossratssaal fortgesetzt. Der Rotterdamer Hafendirektor Koomans sprach über «Die Wiederaufrichtung der holländischen Binnenschifffahrt». Die niederländische Binnenschifffahrt ist unter zwei verschiedenen Gesichtspunkten zu betrachten: einerseits nationale Schifffahrt im internen Netz, andererseits internationale, d. h. Rheinschifffahrt. In der nationalen Binnenschifffahrt wurde der Frachtenmarkt durch die Krise von 1933 aus den Fugen gerissen; Ordnung musste damals durch eine Frachtenkommission geschaffen werden. Diese trennte die Rheinschifffahrt klar ab. Das Binnenschifffahrtsnetz war zweimal so gross wie das Eisenbahnnetz, die Frachtenmenge vielmals so gross wie die Eisenbahnfrachten. 20 000 Kähne von 250 t mittlerer Grösse standen zur Verfügung. Dies Angebot von Frachtraum überstieg den Bedarf. Nach der Befreiung stand man zunächst vor drei Aufgaben: Freilegen der Fahrwege, Aussuchen der verfügbaren Boote, Bestimmung des Frachtangebotes. Die Schiffswege waren durch Wracks gesperrt, durch Zerstörungen unterbrochen, durch Barrikaden, teils mit Minen, verlegt. Von den grossen Schiffsverwerfen waren die grossen Werkzeuge weggeführt und die Lager