Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 95/96 (1930)

Heft: 18: Zur Feier des 75jährigen Bestehens der Eidg. Technischen Hochschule

Artikel: Modellversuche zur Ermittlung des günstigsten Längenprofils im Unterwasserkanal einer Niederdruckanlage, ausgeführt in der Versuchsanstalt für Wasserbau an der E.T.H.

Autor: Meyer-Peter, E. / Favre, H. / Ackeret, J.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-44079

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: 22.07.2025

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

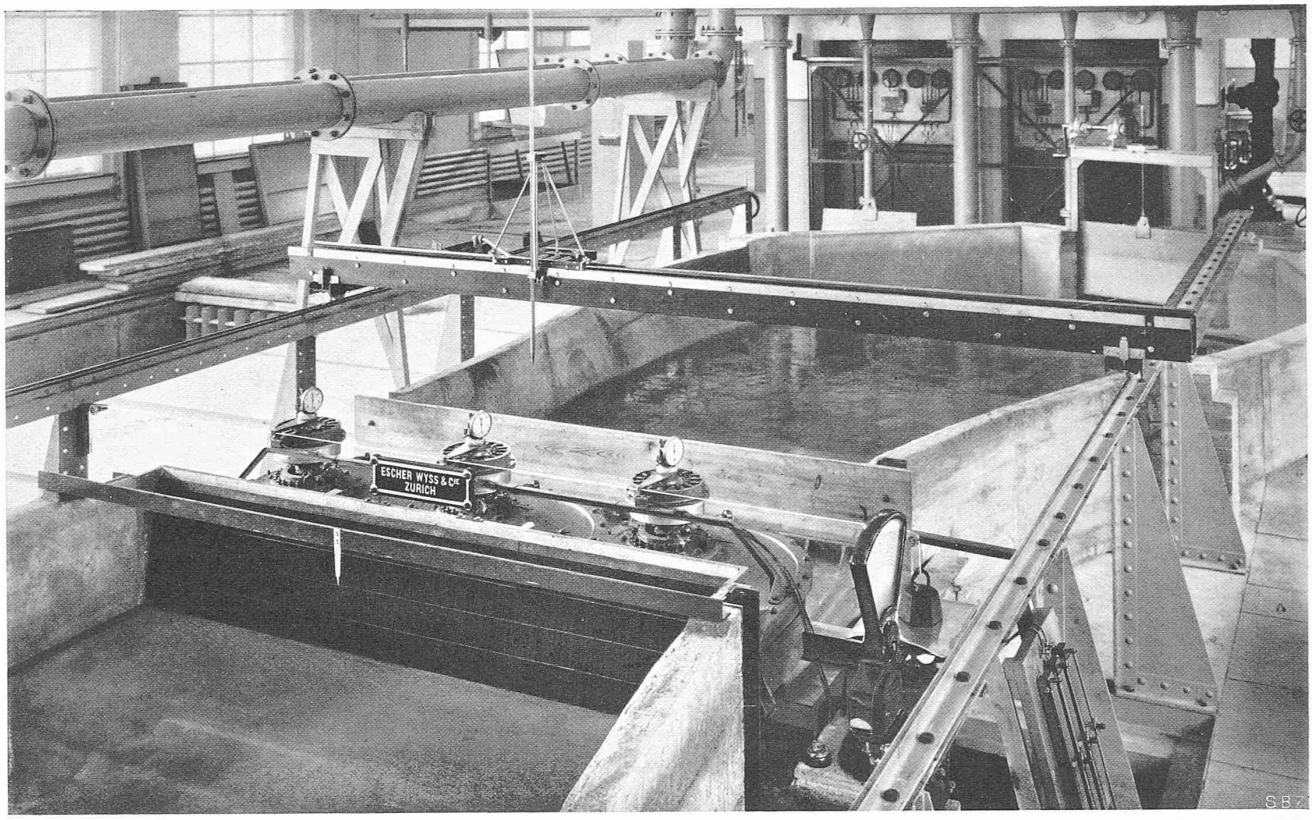

Abb. 3. Gesamtansicht des Modells einer Niederdruck-Wasserkraftanlage mit drei Kaplanturbinen, von der Oberwasserseite gesehen.

Modellversuche zur Ermittlung des günstigsten Längenprofils im Unterwasserkanal einer Niederdruckanlage, ausgeführt in der Versuchanstalt für Wasserbau an der E. T. H.

Von Prof. E. MEYER-PETER, unter Mitwirkung der Ingenieure Dr. H. FAVRE und Dr. J. ACKERET (E. W. C.).

Nachdem die Versuchanstalt für Wasserbau an der E. T. H.[1]) am 26. April 1930 ihren Betrieb aufgenommen, konnten neben den notwendigen Eichungsarbeiten an den Messinstrumenten auch schon Versuche im Auftrage der Praxis in Angriff genommen werden, so vor allem über die Formgebung des Stauwehres des Limmatkraftwerkes Wettingen der Stadt Zürich und über das günstigste Längenprofil des Unterwasserkanals einer Niederdruckanlage. Da letztgenannte Versuche zurzeit noch nicht zu Ende geführt sind, sollen hier nur die wichtigsten *Aufgaben* und die *Methoden* der Versuche kurz besprochen werden.

Unter Annahme einer gegebenen Form der Turbinensaugkrümmer lassen sich verschiedene Längsprofile der Unterwasserkanalsohle denken. Bei der zur Erreichung günstiger Wirkungsgrade der Turbinen erforderlichen tiefen Lage der Saugkrümmer ergibt sich bei den modernen Ausführungen in unmittelbarer Nähe der Zentrale fast immer ein in Richtung der Strömung ansteigendes Sohlengefälle des Unterwasserkanals. Der Hauptzweck der vorliegenden Untersuchungen besteht darin, die wirtschaftlichste Kanalform festzustellen. Vor Inangriffnahme der Versuche kann nicht vorausgesehen werden, ob ein Unterwasserkanal, dessen Sohle von der gegebenen Höhe der Saugkrümmer aus sanft ansteigt, kleinere Energieverluste ergeben wird, als ein Kanal mit rasch ansteigender Sohle. Jedenfalls aber ist klar, dass die erste Lösung wegen des grössern Ausmasses an Kanalaushub und wegen grösserer Gründungstiefen der Seitenmauern höhere Baukosten verursachen wird, als die zweite Lösung. Es erscheint demnach als gegeben, auf Grund von Modellversuchen bei verschiedenen Sohlenformen die Gefällsverluste zu untersuchen und so das wirtschaftlichste Längenprofil des Unterwasserkanals zu bestimmen.

[1]) Eingehend beschrieben in Bd. 95, S. 205 (April 1930).

In der Versuchanstalt für Wasserbau an der E. T. H. ist gegenwärtig ein Modell in Betrieb, das eine Zentrale mit drei Kaplanturbinen samt dem Einlaufrechen und je einem Stück des Ober- und Unterwasserkanals darstellt (Abb. 1 bis 5). Bei einem gewählten Modellmasstab von $1 : M$ ergibt sich das Verhältnis der Geschwindigkeit zu $1 : \sqrt{M}$, das der Wassermengen zu $1 : M^{5/2}$ und das der Leistungen zu $1 : M^{7/2}$. Die Drehzahl der Modellturbinen steht zu jener in der Wirklichkeit im Verhältnis von $\sqrt{M} : 1$. Die Herstellung der Kanalstücke erfolgte in der Versuchanstalt mittels Eisenbetonkasten, in denen die Form von Kanalböschungen und Sohle mittels Zementüberzug modelliert wurde, wobei sich eine Genauigkeit von etwa $\pm$ 1 mm ergab.

Ursprünglich dachte man daran, das Wasser einfach aus sechs Ausflussmündungen, entsprechend den drei Turbinen, in den Unterwasserkanal strömen zu lassen. Es ergab sich aber bei näherer Ueberlegung die Notwendigkeit, das Wasser mit jener unregelmässigen Geschwindigkeitsverteilung in den Unterwasserkanal austreten zu lassen, wie sie auch in Wirklichkeit vorhanden ist. So war es gegeben, auch die Turbinen im Modell auszubilden und für diese eine genaue Modellähnlichkeit, mindestens der Laufräder und Saugrohre, zu wahren. Aus dem selben Grund wurde beschlossen, die Turbinen mit regulierbaren Leit- und Laufrädern auszustatten. Diese Massnahme erwies sich bei den Versuchen als ausserordentlich wichtig, da gerade die ungleichmässige Geschwindigkeitsverteilung beim Austritt des Wassers in den Unterwasserkanal erst die beobachteten Erscheinungen erklärlich macht. Diese Modell-Turbinen hat die A.-G. der Maschinenfabriken Escher Wyss & Cie. in Zürich ausgeführt. Die drei Maschinen besitzen Spiral- und Saugrohre aus Aluminiumguss; die Leitapparate sind im Betrieb durch Zahnkränze von aussen verstellbar, die Laufradschaufeln können gleichfalls von

Abb. 4. Turbinen, Saugkrümmer und Ausläufe. Im Vordergrund die Waage und die Regulierwiderstände der Wirbelstrombremsen.

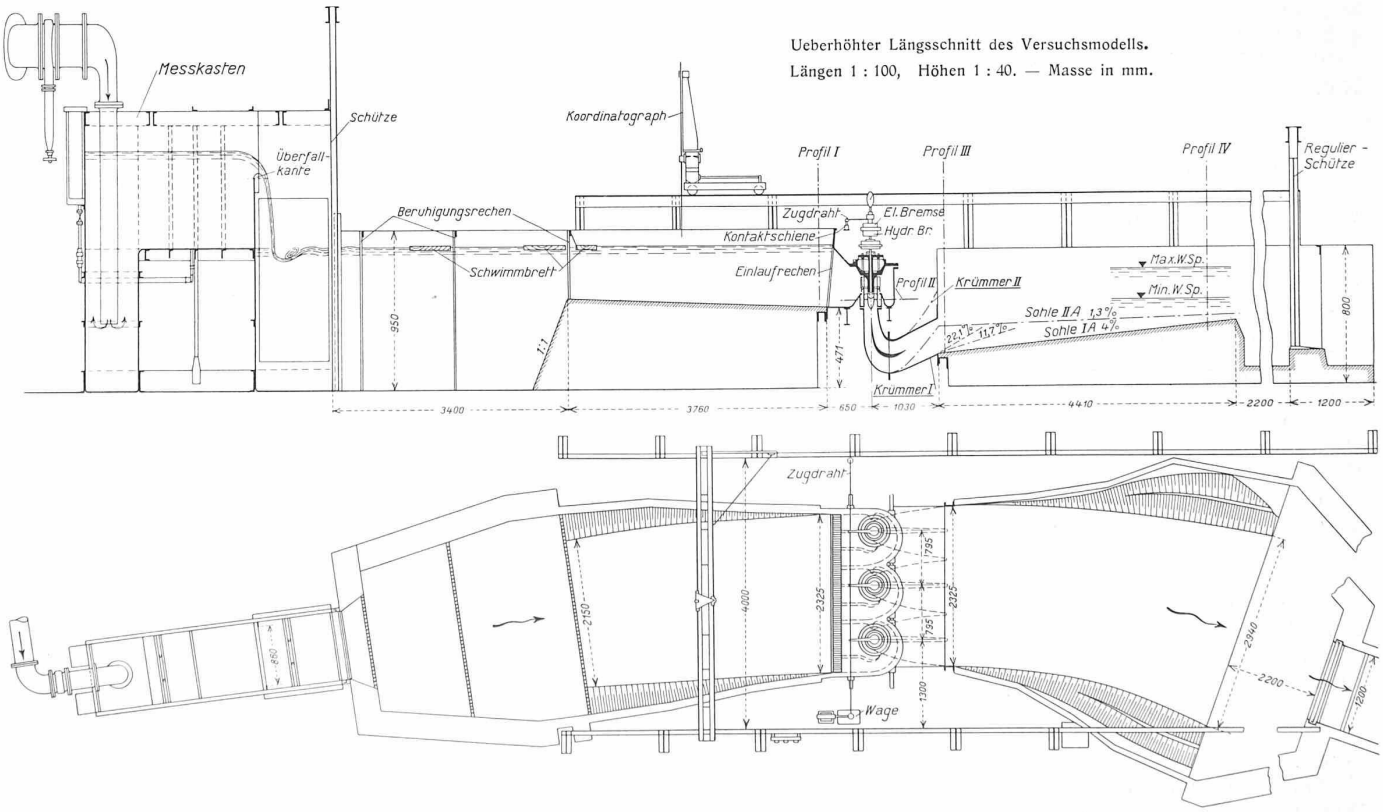

Abb. 1 und 2. Modell eines Niederdruck-Kraftwerks mit drei Turbinen in der Versuchsanstalt für Wasserbau der E. T. H. — Grundriss 1 : 100.

aussen betätigt werden. Die Saugrohre besitzen Einbauten zur besseren Umlenkung der Strömung. Auch der Einlaufrechen ist modellähnlich hergestellt (Abb. 3), wobei allerdings zu erwarten ist, dass bei den geringen Reynold'schen Zahlen die Rechenverluste relativ zu hoch ausfallen.

Im übrigen besteht die Gesamtinstallation noch aus folgenden wichtigen Teilen: Messkasten für die Bestimmung der Wassermenge mittels geeichtem Ueberfall mit Querkontraktion; das Versuchwasser gelangt vom Mitteldruckbehälter der Versuchanstalt durch eine Rohrleitung in diesen Messapparat. Beruhigungskammer, die zwischen dem Messkasten und dem Oberwasserkanal eingebaut ist, mit einer Anzahl von vertikalen Rechen und Schwimmbalken. Auslaufbecken mit Abschlusschütze für die Regulierung des Unterwasserspiegels. Koordinatograph für die Wasserspiegelaufnahme, der auf zwei parallelen Schienen von 4,00 m Abstand läuft. Einrichtung zur Messung der Wassergeschwindigkeit, bestehend aus einem Staurohr nach Prof. Prandtl, Göttingen, mit angeschlossenem Differenz-Manometer. Tachometer zur Messung der Drehzahl der Turbinen.

Zur Vernichtung der von den drei Maschinen geleisteten mechanischen Arbeit sind geeignete Bremsvorrichtungen eingebaut. Der gewöhnlich verwendete Prony'sche Zaum kam hier kaum in Betracht, da es sich darum handelt, die Drehzahl der Maschinen über mehrere Stunden, ohne wesentliche Bedienung, konstant zu halten. Die Aufgabe wurde mit einer kombinierten elektrisch-hydraulischen Bremse in sehr befriedigender Weise gelöst. Wirbelstrombremsen haben im allgemeinen bei grösseren Drehzahlen einen ungünstigen Verlauf der Bremsmomente, der zu unstabilem Gang Anlass geben kann. Zur Sicherheit wurden daher die Wasserbremsen eingeführt, wobei der Betrieb so durchgeführt wird, dass die Wasserbremse eine bestimmte Grundlast aufnimmt und die kleineren Schwankungen auf elektrischem Wege ausreguliert werden. Das Fehlen jeder Abnützung und der Wegfall von Schmierung, Nachregulierung usw. ist ein angenehmer Vorteil dieser neuen Bremskonstruktion. Die Messung des Bremsmomentes erfolgt mittels einer Toledowaage; dabei sind die drei Bremshebel der vorhin erwähnten Bremsen durch einen gemeinsamen Stahldraht miteinander verbunden. Die Spannung des Drahtes erfolgt durch beidseitig angehängte Gewichte, wobei auf der Seite der Waage ein Uebergewicht von 2 kg angehängt ist. Die Bremskraft an den drei Hebeln ergibt sich als Differenz zwischen der Ablesung an der Waage im Ruhezustand und während des Betriebes.

VERSUCHSMETHODEN.

Für den Vergleich der verschiedenen in Frage kommenden Längsprofile des Unterwasserkanals werden zwei voneinander ganz unabhängige Methoden verwendet. Für beide sind die Regeln der Inbetriebsetzung die gleichen.

Gemäss Abb. 2 werden im nachstehenden folgende Hauptprofile betrachtet:

Profil I direkt oberhalb des Turbinenrechens,
Profil II am Austritt aus dem Laufrad der Turbinen,
Profil III am Austritt aus den Saugkrümmern,
Profil IV bei der Wasserrückgabe an den Fluss.

Der Wasserspiegel liegt im Profil I auf konstanter Höhe, unabhängig von der Wasserführung des Flusses. Der Unterwasserspiegel bei der Wasserrückgabe (Profil IV) ist naturgemäss eine Funktion der Flusswasserführung. Für eine bestimmte Betriebswassermenge, die man durch Regulierung des Schiebers der Zulaufleitung zum Messkasten einstellt und durch Beobachtung der Ueberfallhöhe kontrolliert, wird eine gewünschte Lage des Unterwasserspiegels im Profil IV festgesetzt, also ein bestimmtes Gefälle zwischen den Profilen I und IV hergestellt. Der Grundbedingung einer gegebenen Wassermenge entspricht, auf Grund der Voruntersuchung der Firma Escher Wyss & Cie., ein ganz bestimmtes Verhältnis der Oeffnung der Leit- und Laufradschaufeln, das so gewählt ist, dass der Wirkungsgrad ein Optimum ist für ein mittleres Gefälle. Das gewünschte Durchflussregime wird sodann unter gleichzeitiger Regulierung der elektrischen Bremswiderstände der Turbinen und der Auslaufschütze am Ende des Unterwasserkanals erhalten und ist dadurch charakterisiert, dass bei normaler Staukote im Profil I die normale Drehzahl der Turbine erhalten wird. Dabei ist allerdings die zuerst gestellte Bedingung eines ganz bestimmten Unterwasserspiegels im Profil IV nicht mehr absolut genau erhältlich, aber das gewonnene Regime entspricht doch einem bestimmten und genau definierten Betriebszustand. Damit kann für eine bestimmte Betriebswassermenge der, nach Einstellung des Regimes, gemessene Unterwasserspiegel im Profil IV als unabhängige Variable aufgefasst werden.

Erste Auswertungsmethode. Mittels des Koordinatographen wird die Niveaudifferenz in den Profilen I und IV gemessen. Addiert man zu ihr den Ausdruck $\frac{v_{m\,\mathrm{I}}^2 - v_{m\,\mathrm{IV}}^2}{2g}$ so erhält man bei gegebener Betriebswassermenge die Bruttoleistung der Installation zwischen den Profilen I und IV. Dabei bedeuten $v_{m\,\mathrm{I}}$ und $v_{m\,\mathrm{IV}}$ die mittleren Geschwindigkeiten des Wassers in den beiden Profilen.

Mittels der Waage wird hierauf das Drehmoment der drei Turbinen bestimmt, wodurch bei bekannter Drehzahl die Nettoleistung an der Turbinenwelle ermittelt wird. Der Quotient Nettoleistung/Bruttoleistung ergibt den Wirkungsgrad der gesamten Installation zwischen den Profilen I und IV, unter Einschluss des Rechenverlustes, des eigentlichen Turbinenwirkungsgrades, eingeschlossen auch die Verluste in den Saugkrümmern und im Unterwasserkanal.

Dieser Wirkungsgrad ist selbstverständlich nicht identisch mit dem der auszuführenden Turbinen. Infolge des Einflusses der Viskosität des Wassers, die im Modell wie in der Natur die gleiche ist, ist bekanntlich der Wirkungsgrad einer Modellturbine stets kleiner als jener der wirklichen Turbinen. Ausserdem sind, wie bereits gesagt, in dem im Modell gemessenen Wirkungsgrad auch die Rechenverluste und die Reibungsverluste im Unterwasserkanal enthalten. Die gefundenen Werte sind also nur als Vergleichswerte unter sich aufzufassen.

Zeichnet man die gefundenen Wirkungsgrade in Funktion der Unterwasserstände in Profil IV auf, und zwar für verschiedene Formen des Unterwasserkanals, so können Differenzen in den gefundenen Wirkungsgraden nur den Einfluss der Form des Unterwasserkanals darstellen. Man kann anhand der Dauerkurve der Wasserführungen des Flusses aus der Differenz der Wirkungsgrade bei verschiedenen Kanalformen die entsprechenden Unterschiede in der jährlichen Energieproduktion berechnen, wodurch die Grundlage für die eingangs erwähnte Wirtschaftlichkeitsberechnung geschaffen ist.

Zweite Methode, begründet auf der Bestimmung der Höhenlage der Energielinie im Unterwasserkanal. Ein Vergleich der verschiedenen Lagen der Sohle des Unterwasserkanals lässt sich auch durch die Bestimmung der Lage des Unterwasserspiegels in den Profilen III und IV und des Energieliniengefälles zwischen den Profilen III und IV durchführen. Mit Rücksicht auf die eingangs erwähnte ungleiche Geschwindigkeitsverteilung beim Austritt des Wassers aus den Saugkrümmern zeigt sich nun aber, dass die übliche Methode zur Bestimmung der Höhenlage der Energielinie, die darauf beruht, dass vom Wasserspiegel aus die Geschwindigkeitshöhe $v_m^2/2g$ aufgetragen wird, nicht ausreichend ist. Es stellt sich vielmehr als nötig heraus, unmittelbar am Austritt des Wassers aus den Saugkrümmern Geschwindigkeitsmessungen vorzunehmen und die ungleichförmige Geschwindigkeitsverteilung rechnerisch zu berücksichtigen.

Bekanntlich ergibt sich die richtige Lage der Energielinie über dem Wasserspiegel aus der Gleichung

$$H_e = \frac{\int\int v^3\, df}{2g\, Q} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

Zur Bestimmung der Geschwindigkeiten in einzelnen Punkten des Stromes ist dort die Ermittlung der Instrumenten-Konstanten des Pitot-Rohres erforderlich. Für solche Stauröhren, nach Prof. Prandtl, ergibt sich bei wenig turbulenter Strömung und einer Strömungsrichtung genau in der Axe

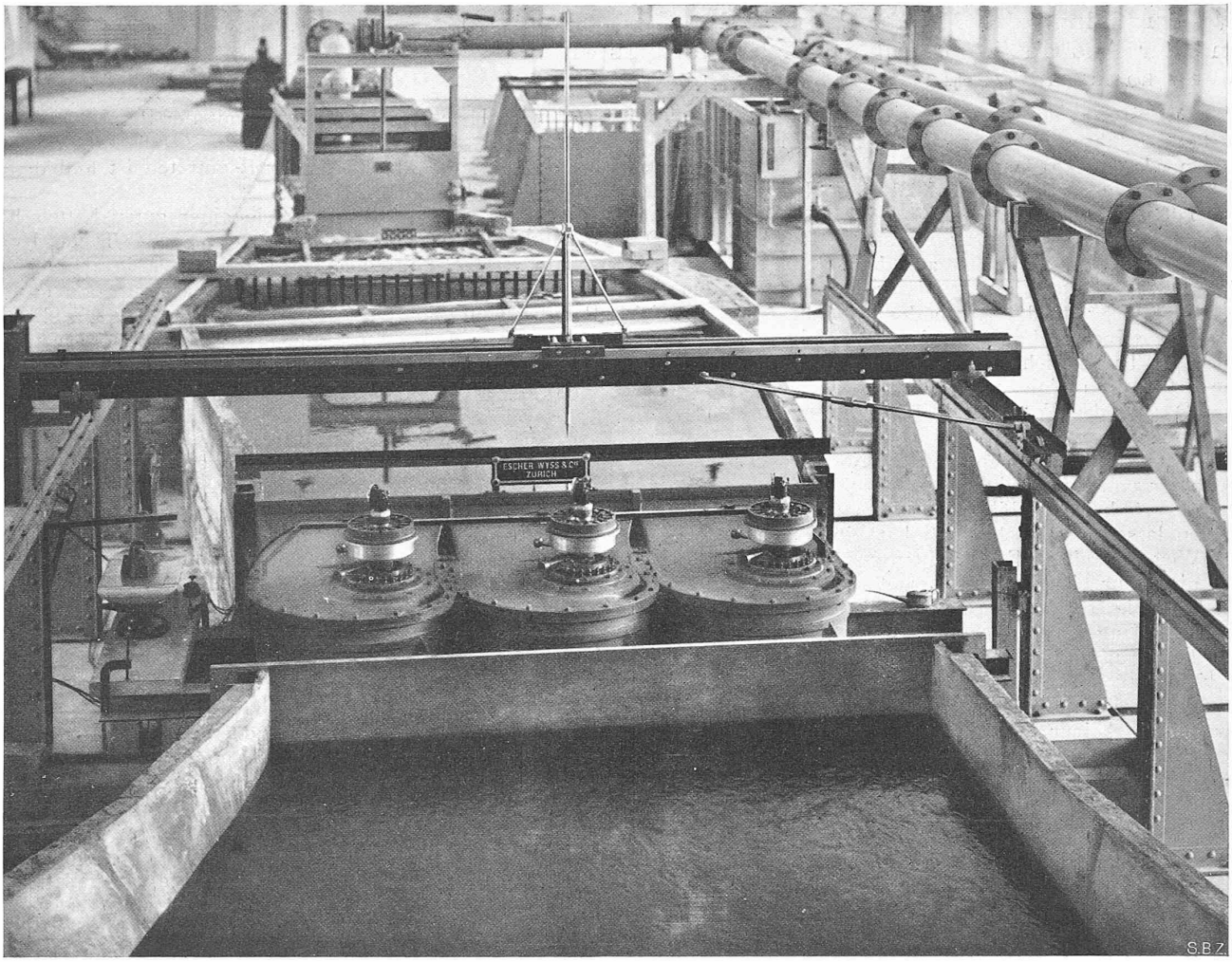

Abb. 5. Gesamtansicht des Modells von der Unterwasserseite gesehen, im Hintergrund Messkasten und Beruhigungsrechen.

des Staurohres der Beiwert $\xi = 1$. Jedoch haben anderweitige Versuche in unserer Versuchsanstalt gezeigt, dass je nach dem Grad der Turbulenz und der Abweichung der Strömungsrichtung der Instrumentenbeiwert sehr veränderlich sein kann. Im vorliegenden Falle bleibt nichts anderes übrig, als einen Mittelwert des Koeffizienten ξ_m zu bestimmen durch den Vergleich der im Messüberfall gemessenen und der auf Grund der Staurohrmessung ermittelten Wassermenge. Der Koeffizient ergibt sich darnach aus

$$\xi_m = \frac{\int\int v' \, df}{Q} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

wobei v' die auf Grund des Ausdruckes

$$v' = \sqrt{2g \, \Delta h} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

bestimmt ist, und Δh die Spiegeldifferenz im Differenzmanometer darstellt. Die Gleichung (1) kann wegen der Unmöglichkeit, für jeden einzelnen Messpunkt den bezüglichen Wert von ξ individuell zu bestimmen, nur in der Form

$$H_e = \xi_m^3 \frac{\int\int v'^3 \, df}{2g \, Q} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1a)$$

geschrieben werden, womit natürlich eine gewisse Ungenauigkeit im Endergebnis verknüpft ist.

Bekanntlich wird der Ausdruck für die Höhenlage der Energielinie für den Wasserspiegel auch in der Form angeschrieben

$$H_e = \alpha \frac{v_m^2}{2g},$$

wonach sich berechnet $\alpha = \xi_m^3 \frac{\int\int v'^3 \, df}{v_m^3 \, F} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$

Trägt man die nach Gleichung (1a) berechneten Werte von H_e über den eingemessenen Wasserspiegeln auf, so erhält man die wirkliche Lage der Energielinien in den Profilen III und IV und damit die nur von der Form des Unterwasserkanals abhängigen Energieverluste.

Die erste der erwähnten Auswertungsmethoden besitzt den Vorteil, dass sie auf den Messungen in den zwei Profilen I und IV beruht, in denen die Strömungsverhältnisse absolut regelmässig und übersichtlich sind, wodurch sehr genaue Messungen ermöglicht werden. Es kann ihr aber offenbar entgegengehalten werden, dass die Messergebnisse nicht nur die Energieverluste im Unterwasserkanal, sondern die des Gesamtsystems umfassen, sodass man bei der Schlussfolgerung genötigt ist, die Verluste im Rechen und in der Turbine für ein bestimmtes Regime, aber für verschiedene Kanalformen als konstant vorauszusetzen.

Demgegenüber erfasst die zweite Auswertungsmethode den Energieumsatz im Unterwasserkanal für sich allein und gewährt überdies einen viel besseren Einblick in die Mechanik des Vorganges. Ihr sind auch die bisherigen, zum Teil unerwarteten Versuchsresultate zu verdanken. Anderseits ist bei dieser zweiten Methode mit erheblichen Messschwierigkeiten zu rechnen, die einmal in der exakten Ermittlung des Wasserspiegels direkt beim Auslauf der Saugkrümmer, nderseits in der Erfassung des Instrumentenkoeffizienten des Staurohrs zu suchen sind.

Die sehr interessanten und zum Teil überraschenden Aufschlüsse, die die Versuche bis heute ergeben haben, bilden einen Beweis dafür, dass schwierige Probleme des praktischen Wasserbaues durch Modellversuche wirksam gefördert werden können. Die Tatsache, dass es möglich wurde, solche umfangreichen und kostspieligen Versuche im Auftrage der Praxis durchzuführen, legt beredtes Zeugnis ab für den Weitblick der Auftraggeber.