

HYDRAULIC MODEL STUDIES OF POWERPLANT APPURTENANCES

by

Gerhard Ziegler

Hydraulische Modellversuche an Nebeneinrichtungen von Wasserkraftwerken.  
Die Wasserwirtschaft, 54 Jahrgang, Heft 1, January 1964

Translator: Henry T. Falvey

BUREAU OF RECLAMATION  
HYDRAULIC LABORATORY

OFFICE  
FILE COPY

1. Introduction

WHEN BORROWED RETURN PROMPTLY

Model laws indicate in which way the model flow is reproduced in the prototype in order to fulfill certain similarity requirements. In the area of the experiments described in this paper, the following similarity requirements play a primary role:

The similarity of the friction relationship with the Reynolds number  $Re$  as the characteristic quantity

The similarity of the formation of a free surface--jets, waves, hydraulic jump--with the Froude number  $Fr$  as the characteristic quantity

The similarity of the cavitation phenomena with the Thoma Cavitation Coefficient  $\sigma$  as the characteristic quantity.

Through the use of these laws, it is frequently shown that adherence of the various similarity requirements in order to fulfill the model characteristics is not possible since they are incompatible when combined. Such contradictions also occur with model representations of flow in canals. In the interest of an exact similarity of the friction in a canal, the velocities in the model are chosen higher than in the prototype. However, the velocities must be chosen smaller to simulate the wave formation.

A model experiment must therefore be constructed for the special case of the most important similarity requirement in order to obtain the correct, or at least sufficient model-prototype correspondence. The failure to fulfill the less important similarity requirements has no influence on the desired results in many cases. Sometimes it is also possible to bridge these discrepancies through correction factors of precautionary measures.

## 2. Conventional Experimental Procedures

The use of model tests with adherence to the Froude law on one side and model tests which reproduce the cavitation relationship on the other side have been introduced and proved satisfactory for the investigation of powerplant appurtenances.

As an example of the "classical" hydraulic model tests, the investigation of the flow relationships on the weir of a river powerplant is chosen. The essential characteristics of such flows are the form of the free surface over the weir, the hydraulic jump, and the waves downstream from the weir. These events are chiefly determined through the combined action of inertial and gravity forces. For the relationship of these forces, the Froude number in the model and that in the prototype is obtained automatically in hydraulic studies with geometrically similar models. The experiment gives good information about the form of the free water surface, the hydraulic jump and the wave formation. In addition, the discharge coefficient and hydraulic forces can be determined. Finally, estimates about the suitable form of the stilling basin and the end sill can be made.

The similarity requirements concerning the friction relationship is not filled according to any formula. However, the viscous forces are in the background as compared to the gravity and inertial forces with the selected flow form. Thus, the rather considerable difference between the Reynolds number in the model and the prototype do not have a significant effect on the experimental results. Also, there is no similarity with respect to the cavitation relationships. The effect of neglecting these similarity requirements is inconsequential as long as the geometry of the flow and the head exclude the formation of cavitation in the prototype. With weirs in river powerplants, this is almost always the case. Transient conditions can be modeled when an appropriate time scale is chosen.

$$\frac{\Delta t_{\text{model}}}{\Delta t_{\text{prototype}}} = \sqrt{\frac{L_{\text{model}}}{L_{\text{prototype}}}}$$

The investigation of the model of a ball valve can be taken as a typical example for the cavitation experiment. The experiment is based on the assumption that the valve in the prototype acts as the regulating valve during the failure of all other safety devices and with a fully opened turbine (Figure 1). The operating conditions of the valve are modeled for the fully opened position and several intermediate positions.

Under these conditions, the appearance of strong cavitation phenomena are the primary considerations. They are dependent upon the cavitation parameter  $\sigma$  with the given discharge and valve opening.  $\sigma$  essentially presents an expression relating the smallest pressure in the valve to the vapor pressure of water. The model tests will be conducted with

$$\sigma_{\text{model}} = \sigma_{\text{prototype}}.$$

The suitable test layout is sketched in Figure 2; water for the model is taken out of a pressure line, and the pressure head differential as well as the pressure level is regulated through the two valves  $S_1$  and  $S_2$ . In addition, it is possible to introduce a suction head which can amount to a maximum  $h_{s \text{ geod}}$ .

The experiments give information about all cavitation phenomena, as well as the occurrence of noise and vibration. Furthermore, the discharge coefficient and the force required to hold the valve in any position can be determined under consideration of the cavitation influence. Finally, the air demand can be studied.

The similarity requirement for the friction relationship is more far reaching than with the previous experiment and is completely fulfilled, although not mathematically satisfied. The similarity according to the Froude law is also not satisfied. These exceptions are unimportant for this case under consideration.

The reduction of the experimental gradient as compared to the prototype gradient requires the use of an equally reduced static pressure in the outlet of the model valve which is for all practical purposes a negative pressure. This negative pressure shown in the sketch, which can be obtained through the partial or complete use of the suction head, cannot be arbitrarily driven to extremes. Otherwise, air separates from water downstream from the model ball valve, which makes correct measurements impossible. For this reason, essentially larger model gradients are required as compared to the Froude experiments. This is apparent from the Table 1. The cavitation phenomena of transients can be systemically reproduced through transient experiments.

$$\frac{\Delta t_{\text{model}}}{\Delta t_{\text{prototype}}} = \frac{L_{\text{model}}}{L_{\text{prototype}}} \sqrt{\frac{H_{\text{prototype}}}{H_{\text{model}}}}$$

In practice it is seldom possible to reproduce the prototype approach and discharge conduits in the model. Further difficulties exist in all cases where the time interval of the transients have the same order of magnitude as the pressure reflection time. For these cases it is only possible to single out expected transients of prototype operating conditions and investigate them as stationary model operating conditions.

### 3. The Combined Fr- $\sigma$ Experiment

Cavitation, the formation of a free water surface and a hydraulic jump, or both, can be expected with the regulating gate in Figure 3, depending upon the position of the gate and the tailwater level with heads differentials  $\geq 50$  m. In such cases, neither the Froude experiment nor the cavitation experiment satisfies all of the actual phenomena. Through the help of the arrangement shown in Figure 4, it is possible to model both the Froude and the cavitation similarity laws. The experimental test equipment is formed into a closed circulating system whose pressure level can be lowered by applying a suction to the air cushion in the downstream reservoir. The mathematical relationships are given in Table 1.

For the extreme case of operation without back pressure,  $H_s \text{ proto} = 0$  (top-sketch in Figure 3), then  $\sigma_{\text{proto}} = 10/H_{\text{proto}}$ . In the model, a suction head in the downstream reservoir equal to

$$H_s = 10 - 10 \frac{H_{\text{model}}}{H_{\text{prototype}}}$$

must be imposed in order to obtain  $\sigma_{\text{model}} = \sigma_{\text{prototype}}$ . This formula gives the largest model suction head  $H_s$ , which, because of the air separation, just barely remains a positive control, with the smallest possible relationship of the experimental head to the prototype head. This head relationship describes the geometric model scale while simultaneously considering the Froude similarity. Figure 5 depicts the primary data of such a model test as a function of the largest controlling suction head. Practically, not only the driving power but also provisions to obtain larger suction heads should be provided. In order to obtain a model scale of 1:10, an experimental operation with  $H_s = 9$  m (water) must be possible.

If only  $H_s = 8$  m is attainable, then the model scale would be 1:50, and a power in the prototype of 50,000 horsepower would make 290 horsepower available in the model. The given values are approximate and were computed according to

$$\frac{P_{atm}}{\gamma_w} - \frac{P_{vapor}}{\gamma_w} = 10m \text{ (water)}$$

They need to be corrected in case the model experiments are applied to a prototype located at high elevations with low air pressures. By application of the corresponding time scale

$$\frac{\Delta t_{model}}{\Delta t_{prototype}} = \sqrt{\frac{L_{model}}{L_{prototype}}}$$

the possibility exists to model the cavitation phenomena of transients. The reservation which relates to this and is discussed under Part 2 is also applicable for the  $\sigma$ -Fr experiments.

For a high head gate similar to Figure 3, the combined  $\sigma$ -Froude experiment gave the cavitation phenomena at the gate and in the tunnel on one hand and the form of the shooting downstream flow on the other while using one and the same model. The strongest vibrations were observed by the combined action of cavitation in the boundary of the jet and the hydraulic jump which approached the gate in sudden blows with a rising back pressure (see Figure 3, middle sketch). This phenomenon can neither be reproduced through the Froude model nor through the cavitation model. Only through the use of the combined  $\sigma$ -Froude similarity can this phenomenon be obtained.

#### 4. Conclusions

The useful ranges of hydraulic model studies with the Froude similarity and cavitation experiment with the  $\sigma$ -similarity are described. Under special relationships the necessity for the simultaneous adherence to both similarities can occur. Experimental installations and modeling laws for these types of experiments are stated.

The author would like to express his appreciation to the Tiroler Wasserkraftwerk Aktiengesellschaft for the understanding encouragement of our knowledge for the first use of a Froude- $\sigma$  model experiment.

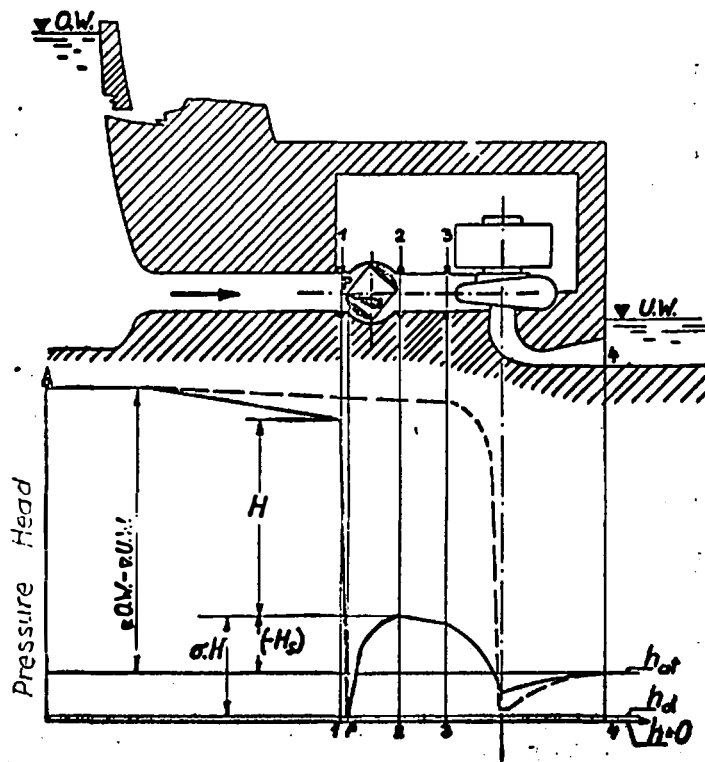


Figure 1. Schematic drawing of a ball valve as the turbine control valve for a closing condition and with fully opened, runaway turbine. (Pressure distribution in normal operation with open valve is drawn in dashed lines for comparison.) All pressures are drawn as pressure heads. Dynamic pressures are ignored.

$h_{at}$  = atmospheric pressure head

$h_d$  = water vapor pressure head

In the valve the head  $H$  is lost, downstream from the valve the pressure head is

$$h_s = h_{at} - (-H_s)$$

where  $H_s$  is the negative suction head or back pressure. If at P the vapor pressure is reached, then

$$h_{at} - (-H_s) - \sigma \cdot H = h_d$$

or

$$\sigma_{proto} = \frac{h_{at} - h_d - (-H_s)}{H}$$

where as a rough approximation

$$proto = \frac{10 - (H_s)}{H}.$$



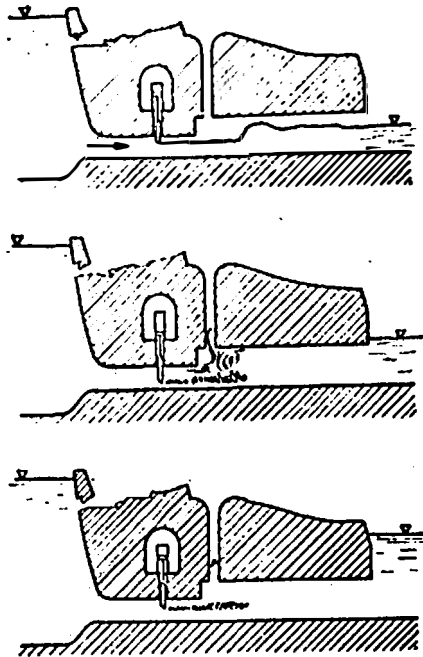


Figure 3. Schematic diagram of a high head gate. The following operating conditions are possible for various gate positions and tailwater elevations.

Top sketch. Free water surface with a hydraulic jump. Aeration through air inlet pipe. (Froude similarity--primary. Cavitation similarity--secondary.)

Middle sketch. Pulsating movement of the hydraulic jump in the immediate vicinity of the gate. Cavitation on the edges of the jet inside the body of water. (Froude similarity and cavitation similarity both important.)

Lower sketch. High back pressure, water level in air inlet pipe, cavitation on the edges of the jet inside the body of water. (Cavitation similarity--primary. Froude similarity--secondary.)



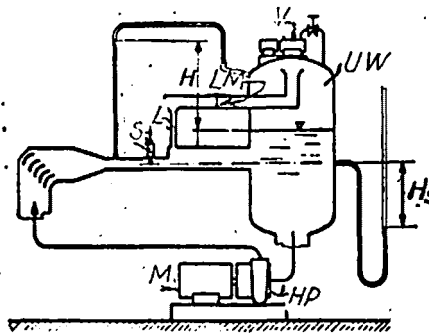


Figure 4. Model setup for a Froude- $\sigma$  experiment which corresponds to a prototype installation like that shown in Figure 3. Closed circulating system with a variable pressure level.

- HP Pump
- M Motor
- S Gate model
- L Model air inlet pipe
- LM Orifice to measure air quantity
- UW Downstream reservoir
- V Vacuum pump to evacuate downstream reservoir

Model suction head  $H_s$  and model head loss  $H$  are determined through use of the appropriate water levels columns.

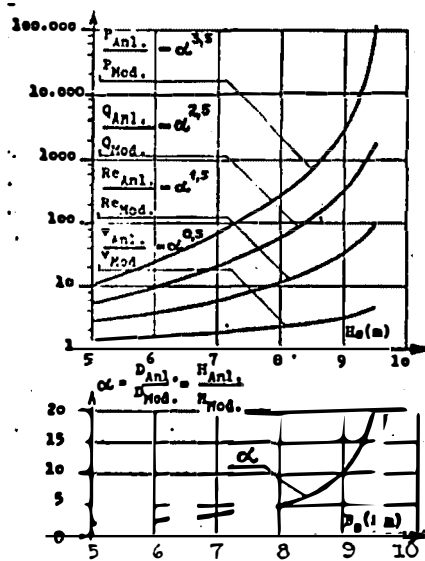
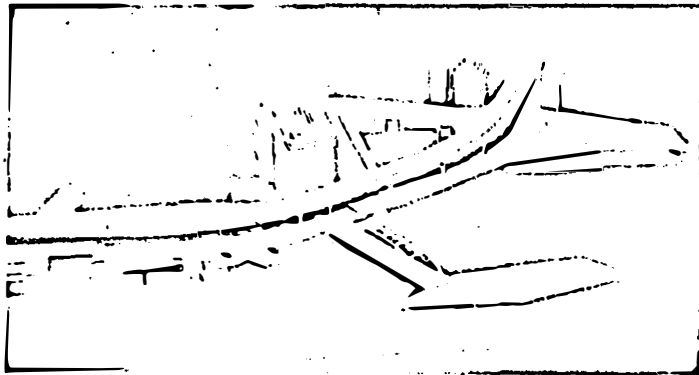


Figure 5. Relation between prototype and model values for a Froude- $\sigma$  experiment which corresponds to a prototype structure like that shown in Figure 3 middle sketch. All values are expressed as functions of the experimental maximum controlling suction head  $H_g$ .

Top diagram: The hydraulic power  $P$ , the Reynolds number  $Re$ , and the velocity  $V$  relationships between the model and prototype

Lower diagram: Geometric scale  $\alpha$  and the corresponding head loss relationship



Durch die Abdämmung der Alten Süderelbe sind umfangreiche Entwässerungsmaßnahmen notwendig. So werden außer dem Ausbau der Vorfluter ein Schöpfwerk von  $1,6 \text{ m}^3/\text{s}$  Leistung und ein Entwässerungssiel in Neuenfelde, ein Schöpfwerk in Hohenwisch mit einer Leistung von  $11,6 \text{ m}^3/\text{s}$ , ein Schöpfwerk in Altenwerder mit  $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$  notwendig. Diese Schöpfwerke fördern ihr Wasser in die Süderelbe. Die abgedämmte Süderelbe dient bei Bedarf als Stauraum und entwässert durch ein großes und ein mittleres Deichsiel bei Ebbe frei in die Elbe.

Der Hochwasserschutz der Innenstadt und der angrenzenden Stadtteile am Nordufer der Elbe zwischen St. Pauli Landungsbrücken und der Billwerder Bucht stellt ganz andere Aufgaben als die anderen Verteidigungslinien. Hier muß weitgehend auf Bausubstanz und Verkehrswege Rücksicht genommen werden. Verkehr, Schifffahrt und städtebauliche Belange müssen beachtet werden. Recht unterschiedliche Baumaßnahmen, wie Erhöhung von Kaimauern, Erstellung von Stützmauern, Aufhöhung von Schleusen, Neubau von Sperrwerken, Schifffahrts- und Entwässerungsschleusen sowie Schöpfwerken sind hier erforderlich, um den Hochwasserschutz zu erreichen und die Binnenentwässerung sicherzustellen.

Gerhard Ziegler

## Hydraulische Modellversuche an Nebeneinrichtungen von Wasserkraftwerken

### 1. Einleitung

Die Modellgesetze geben an, in welcher Weise eine Modellströmung der Großausführung nachzubilden ist, damit bestimmte Ähnlichkeitsforderungen erfüllt werden. Im Rahmen der hier beschriebenen Versuche spielen dabei hauptsächlich

die Ähnlichkeit der Reibungsverhältnisse mit der Reynold'schen Zahl  $Re$  als Kenngröße,

die Ähnlichkeit der Ausbildung freier Oberflächen — Strahlen, Wellen, Wassersprung — mit der Froude'schen Zahl  $Fr$  als Kenngröße,

die Ähnlichkeit der Kavitationserscheinungen mit dem Thoma'schen Kavitationskoeffizienten  $\sigma$  als Kenngröße

eine Rolle. Bei der Anwendung dieser Gesetzmäßigkeiten zeigt sich häufig, daß zur Einhaltung der verschiedenen Ähnlichkeitsforderungen Modelleigenschaften zu erfüllen wären, die untereinander unvereinbar sind. Solche Widersprüche treten schon bei der modellmäßigen Nachbildung einer Kanalströmung auf. Im Interesse einer exakten Ähnlichkeit der Reibungsverhältnisse wären die Geschwindigkeiten der Modellströmung höher als die Anlagegeschwindigkeiten zu wählen, im Interesse der Ähnlichkeit der Wellenbildung jedoch kleiner.

Ein Modellversuch muß daher für die korrekte oder zumindest hinreichende Einhaltung der für den speziellen Fall vordringlichsten Ähnlichkeitsforderung eingerichtet werden. Die Nichterfüllung weiterer, für den einzelnen Fall aber weniger bedeutsamer

Ein Schlüsselbauwerk wird ohne Zweifel die vorher schon geplante neue Alsterschleuse in der Mündung des Admiralitätsstraßenfleets in die Elbe sein. Dort ist eine kombinierte Schifffahrts- und Entwässerungsschleuse vorgesehen, die zusätzlich ein Spitzenschöpfwerk von etwa  $36 \text{ m}^3/\text{s}$  Leistung erhalten soll, das bei lang anhaltendem Hochwasserstand in der Elbe das in solchen Fällen oft zugleich hohe Wasser der Alster in die Elbe fördern kann.

### Abwicklung und Kosten

Die Planung und Durchführung der umfangreichen Bauarbeiten für den Hochwasserschutz werden von der Baubehörde und der Behörde für Wirtschaft und Verkehr — Strom- und Hafenbau — im engsten Einvernehmen wahrgenommen, wobei die Aufgabenteilung ohne Rücksicht auf Zuständigkeiten rein nach praktischen Gesichtspunkten erfolgt. In Gebieten, in denen Hafenbelange im Vordergrund stehen, liegt die Ausführung in den Händen von Strom- und Hafenbau, in den übrigen Gebieten in den Händen der Baubehörde.

Da das technische Personal dieser beiden Behörden naturgemäß nicht ausreicht, um neben den vielen anderen dringlichen Bauaufgaben auch noch diese umfassenden Hochwasserschutzanlagen in angemessener Zeit zusätzlich bewältigen zu können, werden, soweit irgend möglich, private Ingenieurbüros zur Planung und teilweise auch zur Überwachung der Baumaßnahmen herangezogen.

Es ist das Ziel, die beschriebenen Hochwasserschutzmaßnahmen innerhalb von 5 bis 6 Jahren durchzuführen.

Die Gesamtkosten für den Bau der Hochwasserschutzanlagen werden einschließlich Grunderwerb und Entschädigungen 560 Mio DM betragen.

Mit dem Bau der neuen Hochwasserschutzanlagen wurde bereits Anfang März 1962, d.h. nur wenige Tage nach der Sturmflut, begonnen. Im Jahre 1962 wurden hierfür bereits 53 Mio DM ausgegeben. Für das Jahr 1963 ist mit einer Ausgabe von etwa 75 Mio DM zu rechnen.

Anschrift des Verfassers: Erster Baudirektor Prof. Otto Sill, Baubehörde der Freien und Hansestadt Hamburg

Ähnlichkeitsbedingungen ist in vielen Fällen ohne Einfluß auf das gesuchte Ergebnis. Manchmal ist es auch möglich, solche Abweichungen durch Korrekturfaktoren oder Vorkehrungen am Modell zu überbrücken.

### 2. Konventionelle Versuchsmethoden

Für die Untersuchung von Kraftwerksnebeneinrichtungen haben sich bisher der Modellversuch mit Einhaltung des Froude'schen Gesetzes einerseits und der Modellversuche zur Nachbildung der Kavitationsverhältnisse andererseits eingeführt und bewährt.

Als Beispiel für den „klassischen“ wasserbaulichen Modellversuch sei die Untersuchung der Strömungsverhältnisse am Wehr eines Flußkraftwerkes erwähnt. Wesentliche Merkmale einer solchen Strömung sind die Ausbildung der freien Oberfläche über der Wehrkante, des Wassersprunges und der Wellenbildung im Unterwasser. Diese Vorgänge sind hauptsächlich durch das Zusammenwirken von Trägheits- und Schwerkraft bedingt. Für das Verhältnis dieser Kräfte ist die Froude'sche Zahl maßgebend. Beim wasserbaulichen Modellversuch am geometrisch verkleinerten Modell ergibt sich automatisch Gleichheit der Froude'schen Zahlen an Modell und Ausführung. Der Versuch gibt somit gute Auskunft über die Form der freien Oberfläche, den Wassersprung und die Wellenbildung. Ferner können Durchflußbeiwerte und hydraulische Kräfte ermittelt und schließlich Angaben über die zweckmäßige Ausbildung des Tosbeckens und der Gegenschwelle gemacht werden.

Die Ähnlichkeitsbedingung bezüglich der Reibungsverhältnisse ist formelmäßig nicht erfüllt. Bei der erwähnten Strömungsform treten jedoch die Zähigkeitskräfte gegenüber den Schwere- und Trägheitskräften derart in den Hintergrund, daß auch ziemlich beträchtliche Unterschiede zwischen den Reynold'schen Zahlen von Modell und Ausführung ohne merklichen Einfluß auf das Versuchsergebnis bleiben. Auch bezüglich der Kavitationsverhältnisse besteht keine Ähnlichkeit; diese Vernachlässigung ist solange zulässig, als Geometrie und Fallhöhe der Strö-

Zahlentafel

Versuchstyp Beispiel	Wasserbaulicher Modellversuch				Kavitationsversuch				Kombinierter Froude-a-Versuch			
	Wehrfeld eines Flußkraftwerkes				Kugelschieber im Freilauf				Talsperrenschütz ähnlich Bild 3, oberes Bild			
	Anlage	Modell	Relation	Bemerkung	Anlage	Modell	Relation	Bemerkung	Anlage	Modell	Relation	Bemerkung
Kennzeichnende Länge L (m)	Wehrlänge 25	0,5	$\frac{L_A}{L_M} = \alpha = 50$	Maßstab bei kleinen Objekten durch Herstellungsgenauigkeit, bei großen durch Platz bestimmt.	lichter Durchmesser 1,5	0,15	$\frac{L_A}{L_M} = \alpha = 10$	Maßstab durch Herstellungsgenauigkeit und verfügbare Prüfstandsleistung bestimmt.	Schützhöhe 1,5	0,225	$\frac{L_A}{L_M} = \alpha = 6,67$	Der geometrische Maßstab muß wegen Einhaltung der Froude-Ähnlichkeit gleich dem Fallhöhenverhältnis sein und hängt wie dieses von $H_s$ max. ab.
Vernichtete Fallhöhe H (m)	10	0,2	$\frac{H_A}{H_M} = \alpha = 50$		250	100	$\frac{H_A}{H_M} = \beta = 2,5$	Mit $H_{s\max}$ als versuchsmäßig maximal beherrschbarer Saughöhe wird die kleinstmögliche Versuchsfallhöhe $10 - H_{s\max}$ bestimmt. $H_{\min} = \frac{10 - H_{s\max}}{\alpha_{\text{Anlage}}}$	150	22,5	$\frac{H_A}{H_M} = \alpha = 6,67$	Mit $H_{s\max}$ als versuchsmäßig maximal beherrschbarer Saughöhe wird die kleinstmögliche Versuchsfallhöhe $10 - H_{s\max}$ bestimmt. $H_{\min} = \frac{10 - H_{s\max}}{\alpha_{\text{Anlage}}}$
Durchfluß Q (m³/s)	1700	0,097	$\frac{Q_A}{Q_M} = \alpha^{2,5} = 17\,600$		30	0,19	$\frac{Q_A}{Q_M} = \alpha^2 \cdot \beta^{0,5} = 158$		70	0,612	$\frac{Q_A}{Q_M} = \alpha^{2,5} = 115$	
Kennzeichnende Geschwindigkeit $v = \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$ (m/s)	14	1,98	$\frac{v_A}{v_M} = \alpha^{0,5} = 7,07$		70	44,3	$\frac{v_A}{v_M} = \beta^{0,5} = 1,58$		54,5	21,0	$\frac{v_A}{v_M} = \alpha^{0,5} = 2,6$	
vernichtete Leistung $P = 9,81 \cdot Q \cdot H$ (KW)	167 000	0,190	$\frac{P_A}{P_M} = \alpha^{2,5} = 880\,000$		73 500	187	$\frac{P_A}{P_M} = \alpha^2 \cdot \beta^{1,5} = 396$		103 000	135	$\frac{P_A}{P_M} = \alpha^{3,5} = 760$	
Saughöhe $H_s$ (m WS)	Freispiegel $H_s = 0$	Freispiegel $H_s = 0$	$\frac{H_{sA}}{H_{sM}} = 1$		Freispiegel $H_s = +6$ m			Modellversuch erfordert wegen Gefällsreduktion eine Saughöhe	Freispiegel $H_s = 0$	+8,5		Maximal beherrschbare Modellsaughöhe bestimmt kleinstmögliches Versuchsfälle (siehe bei $H_s$ )
Kennwert für Reibungsverhältnisse $Re = \frac{v \cdot L}{\nu}$ (Reynolds)	$350 \cdot 10^6$	$0,99 \cdot 10^6$	$\frac{Re_A}{Re_M} = \alpha^{1,5} = 354$	Ähnlichkeit nicht korrekt, doch hinreichend erfüllt	$105 \cdot 10^6$	$6,7 \cdot 10^6$	$\frac{Re_A}{Re_M} = \alpha \cdot \beta^{0,5} = 15,8$	Ähnlichkeit nicht korrekt, aber hinreichend und weitgehend, als beim Wasserbauversuch eingehalten	$81,7 \cdot 10^6$	$4,7 \cdot 10^6$	$\frac{Re_A}{Re_M} = \alpha^{1,5} = 17,3$	Ähnlichkeit nicht korrekt, doch hinreichend und weitgehend als beim Wasserbauversuch eingehalten
Kennwert für Kavitationsverhalten $\sigma = \frac{10 - H_s}{H}$ (Thoma)	1	50	$\frac{\sigma_A}{\sigma_M} = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{50}$	Modell vielfach sicherer gegen Kavitation, zulässig wenn Ausführung kavitationsfrei	0,04	0,04	$\frac{\sigma_A}{\sigma_M} = 1$	Ähnlichkeit korrekt erfüllt	0,0667	0,0667	$\frac{\sigma_A}{\sigma_M} = 1$	Ähnlichkeit korrekt erfüllt
Kennwert für Ausbildung freier Oberflächen $Fr = \frac{v^2}{L \cdot g}$ (Froude)	0,8	0,8	$\frac{Fr_A}{Fr_M} = 1$	Ähnlichkeit korrekt eingehalten	333	1330	$\frac{Fr_A}{Fr_M} = 0,25$	Ähnlichkeit nicht erfüllt	202	202	$\frac{Fr_A}{Fr_M} = 1$	Ähnlichkeit korrekt erfüllt

mung des Auftretens von Kavitation an der Großausführung ausschließen. Für Werte von Flußkraftwerken wird dies fast immer der Fall sein. Instationäre Vorgänge können modellähnlich nachgebildet werden, wenn ein geeigneter Zeitmaßstab gewählt wird.

$$\left( \frac{H_{\text{Modell}}}{H_{\text{Anlage}}} \right) = \left( \frac{L_{\text{Modell}}}{L_{\text{Anlage}}} \right)$$

Die Untersuchung eines Kugelschiebermodells kann als typisches Beispiel für den Kavitationsversuch angesehen werden. Dem Versuch sei von der Großanlage her die Annahme zugrunde gelegt (Bild 1), daß der Schieber nach Versagen aller anderen Sicherheitseinrichtungen und Durchgehen der voll geöffneten Turbine als Abschlußorgan einspringt. Die Betriebszustände des Schiebers seien für offene Stellung und mehrere Zwischenstellungen modellmäßig nachzubilden.

Unter diesen Umständen sind in erster Linie die auftretenden starken Kavitationserscheinungen maßgebend. Sie sind bei gegebener Durchflußmenge und Stellung des Kugelschiebers vom Kavitationsparameter  $\sigma$  abhängig.  $\sigma$  stellt im wesentlichen eine Aussage über das Verhältnis der kleinsten im Schieber auftretenden Drucke zum Dampfdruck des Wassers dar. Der Modellversuch wird daher so ausgeführt, daß

$$\sigma_{\text{Modell}} = \sigma_{\text{Anlage}}$$

wird. Die entsprechende Versuchsanordnung ist in Bild 2 skizziert: Entnahme des Versuchswassers aus einer Druckrohrleitung, Einregeln von Fallhöhe und Druckniveau durch die beiden Schieber  $S_1$  und  $S_2$ , Möglichkeit zum Aufbringen einer geodätischen Saughöhe, die maximal  $h_{s, \text{geod.}}$  betragen kann.

Bild 1. Schematische Darstellung eines Kugelschiebers als Turbinenabschlußorgan für einen Zustand während des Schließens bei voll geöffneten, durchgehender Turbine (Druckverteilung im Normalbetrieb, bei offenem Schieber, zum Vergleich gestrichelt eingetragen). Alle Drucke als Druckhöhen dargestellt, dynamische Druckhöhen vernachlässigt.

$h_{a1} \dots$  Druckhöhe der Atmosphäre  
 $h_d \dots$  Druckhöhe des Wasserdampfes

Im Schieber wird die Fallhöhe  $H$  vernichtet, hinter dem Schieber herrscht die Druckhöhe  $h_2 = h_{a1} - (-H_2)$ , mit  $H_2$  als negativer Saughöhe bzw. Gegendruck. Wird bei P gerade der Dampfdruck erreicht, so gilt  $h_{a1} - (-H_2) - \sigma \cdot H = h_d$  bzw.

$$\sigma_{\text{Anlage}} = \frac{h_{a1} - h_d - (-H_2)}{H}$$

wofür in Überschlagsrechnungen häufig

$$\sigma_{\text{Anlage}} = \frac{10 - (-H_2)}{H} \text{ eingesetzt wird.}$$

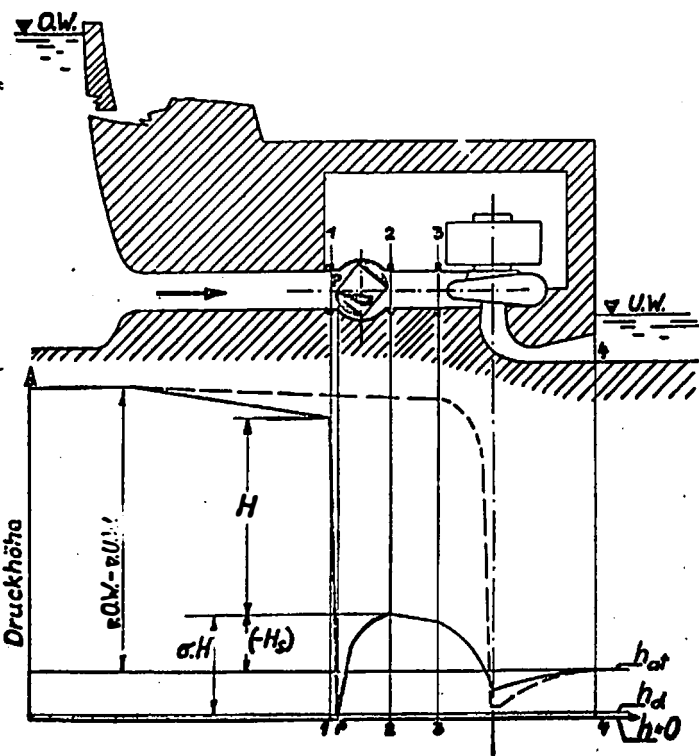
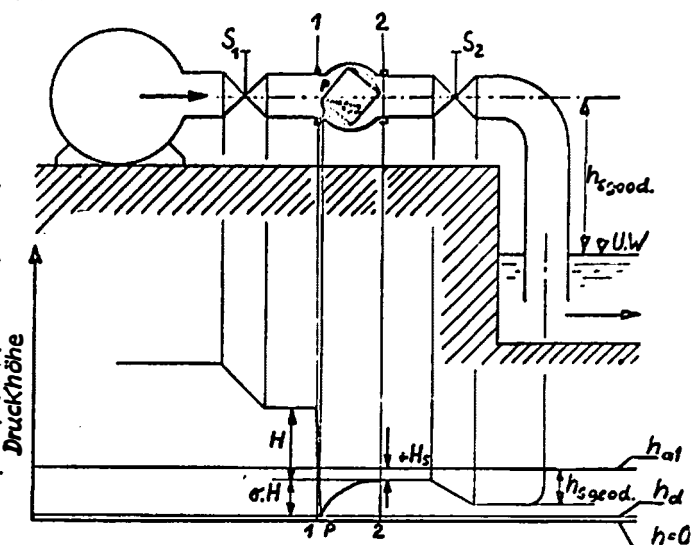


Bild 2. Schema eines Kavitationsmodellversuchs für den Kugelschieber des Bildes 1. Entnahme des Versuchswassers aus einer Druckrohrleitung.  $H$  und  $H_2$  werden zur Einhaltung von „Modell“ „Anlage“ mit Hilfe der Schieber  $S_1$  und  $S_2$  so eingeregelt, daß  $H_{\text{Modell}} \cdot h_{a1} = h_d - H_{\text{Anlage}} \cdot H_{d, \text{Modell}}$  wird. Die Darstellung entspricht etwa einer Reduktion des Versuchsgefälles auf  $1/2$  der Anlagefallhöhe. Anstelle des Gegendruckes ( $-H_2$ ) der Anlage tritt beim Modellversuch infolge der Fallhöhenreduktion eine positive Saughöhe  $+H_2$ , die durch Ausnützen eines Teils der in der Versuchseinrichtung verfügbaren geodätischen Saughöhe  $h_{s, \text{geod.}}$  erreicht wird.



Der Versuch gibt Auskunft über alle Kavitationserscheinungen, sowie über das Auftreten von Lärm und Vibrationen. Weiterhin können die Durchflußbeiwerte und Verstellkräfte unter Berücksichtigung des Kavitationseinflusses ermittelt und schließlich Belüftungsmaßnahmen studiert werden.

Die Ähnlichkeitsbedingung für die Reibungsverhältnisse ist weitgehender als beim vorher beschriebenen Versuch und durchaus hinreichend, jedoch nicht formelmäßig erfüllt. Auch Ähnlichkeit nach Froude besteht nicht. Diese Vernachlässigung ist für den betrachteten Fall belanglos.

Die Reduktion des Versuchsgefälles gegenüber der Anlagefallhöhe bedingt die Anwendung eines ebenfalls reduzierten statischen Druckes im Ablauf des Modellschiebers, praktisch meist eines Unterdruckes. Dieser Unterdruck, der bei der skizzierten Modellversuchsanordnung durch ganze oder teilweise Ausnützung der geodätischen Saughöhe erreicht wird, kann nicht beliebig weit getrieben werden. Es kommt sonst hinter dem Kugelschiebermodell zur Ausscheidung von Luft aus dem Versuchswasser, womit korrekte Messungen unmöglich werden. Aus diesem Grunde ergeben sich, wie aus der Zahlentafel ersichtlich, gegenüber dem Froude-Versuch wesentlich größere Modellfallhöhen. Die Kavitationserscheinungen instationärer Vorgänge können grundsätzlich durch instationäre Versuche reproduziert werden.

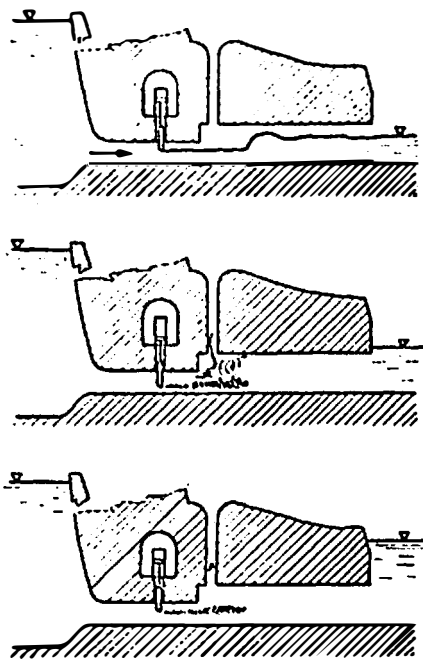
$$\frac{\Delta t_{\text{Modell}}}{\Delta t_{\text{Anlage}}} = \frac{L_{\text{Modell}} \sqrt{H_{\text{Anlage}}}}{L_{\text{Anlage}} \sqrt{H_{\text{Modell}}}}$$

Praktisch wird es aber nur selten möglich sein, z. B. die Zu- und Ablauflängen der Großausführung im Modell korrekt nachzubilden. Weitere Schwierigkeiten entstehen in allen Fällen, wo die Zeitdauer der instationären Vorgänge die Größenordnung der Druckwellen-Reflexionszeit hat. Es ist dann nur möglich, einzelne Zustände des an der Anlage zu erwartenden instationären Vorganges herauszugreifen und als stationäre Modellbetriebszustände zu untersuchen.

### 3. Der kombinierte Fr- $\sigma$ -Versuch

Der Talsperrenschieber nach Bild 3 — Fallhöhe in der Größenordnung von  $\geq 50$  m — läßt je nach der Stellung des Schützen und der Höhenlage des Unterwasserspiegels sowohl Kavitation als auch Freistrahlbildung und Wassersprung, zum Teil ineinander übergreifend, erwarten. In einem solchen Fall können weder der Froude'sche Versuch, noch der Kavitationsversuch allen tatsächlich eintretenden Vorgängen gerecht werden. Mit Hilfe einer Anordnung ent-

Bild 3. Schematische Darstellung eines Talsperrentiefschützens. Je nach Stellung des Schützens und Lage des Unterwasserspiegels sind folgende Betriebszustände möglich:



Oberes Bild: Freispielfahrt mit Wassersprung. Belüftung durch den Belüftungsschacht. (Froude-Ähnlichkeit primär, Kavitationsähnlichkeit sekundär)

Mittleres Bild: Pulsierende Bewegung des Wassersprungs in unmittelbarer Nähe des Schützens, Kavitation am Strahlrand im Inneren des Wasserkörpers. (Froude-Ähnlichkeit und Kavitationsähnlichkeit von gleicher Wichtigkeit)

Unteres Bild: Hohes Gegendruck, Wasserspiegel im Belüftungsschacht, Kavitation am Strahlrand im Inneren des Wasserkörpers. (Kavitationsähnlichkeit primär, Froude-Ähnlichkeit sekundär)

Bild 4. Modellversuchseinrichtungen für einen „Froude- $\sigma$ -Versuch zur Anlage entsprechend Bild 3. Geschlossener Kreislauf mit veränderlichem Druckniveau.

- HP Hauptpumpe
- M Antriebsmotor
- S Schützmodell
- L Modell Belüftungsschacht
- LM Meßblende zur Messung der Belüftungsmenge
- UW Unterwasserkessel
- V Vakuumpumpe zum Evakuieren des Unterwasserkessels

Modellsaughöhe  $H_s$  und Modellfallhöhe  $H$  sind durch entsprechende Wassersäulen angedeutet.

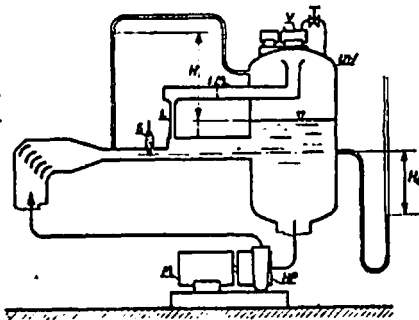
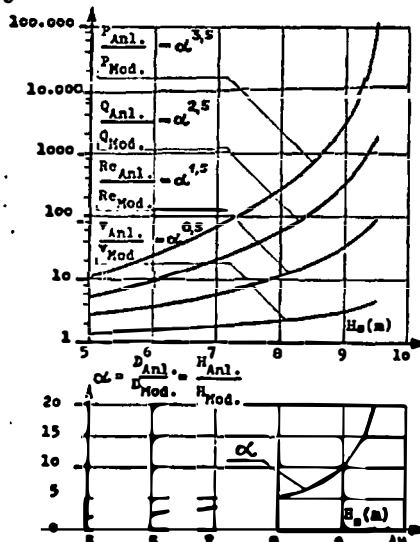


Bild 5. Relationen zwischen Anlage und Modellwerten für einen „Froude- $\sigma$ -Versuch zu einer Großausführung entsprechend Bild 3, oberes Bild. Alle Werte sind als Funktion der versuchsmäßig maximal beherrschbaren Saughöhe  $H_s$  dargestellt.



Unteres Diagramm: Geometrischer Maßstab  $\alpha$ , gleichzeitig Gefällsverhältnis

Oberes Diagramm: Verhältnis der hydraulischen Leistungen  $P$ , der Reynoldszahlen  $Re$  und der Geschwindigkeiten  $V$  an Modell und Anlage

sprechend Bild 4 ist es möglich, gleichzeitig sowohl Kavitation ähnlich, als auch Froude'sche Ähnlichkeit herzustellen. Die Versuchseinrichtung ist als geschlossener Kreislauf ausgebildet, dessen Druckniveau durch Absaugen des im Unterwasserkessel befindlichen Luftpolsters abgesenkt werden kann. Die rechnerischen Zusammenhänge sind in der Zahlentafel angegeben.

Für den Extremfall, nämlich Betrieb ohne Gegendruck  $H_s \text{ Anlage} = 0$  (Bild 3, oberes Bild, Freispielfahrt),  $\sigma_{\text{Anlage}} = 10/H_{\text{Anlage}}$ . Im Modellversuch muß im Unterwasserkessel eine Saughöhe

$$H_s = 10 - 10 \frac{H_{\text{Modell}}}{H_{\text{Anlage}}}$$

aufgegeben werden, um  $\sigma_{\text{Modell}} = \sigma_{\text{Anlage}}$  zu erreichen. Zu den größten Modellsaughöhen  $H_s$ , die wegen der Luftausscheidung versuchsmäßig gerade noch sicher beherrschbar ist, ergibt sich aus der obigen Formel das kleinstmögliche Verhältnis Versuchsaughöhe zu Fallhöhe der Ausführung. Dieses Fallhöhenverhältnis stellt mit Rücksicht auf die Froude'sche Ähnlichkeit gleichzeitig auch den geometrischen Modellmaßstab  $\alpha$  dar. In Bild 5 sind die Hauptdaten eines solchen Modellversuches in Abhängigkeit von der größten beherrschbaren Saughöhe dargestellt. Praktisch sind sowohl beträchtliche Antriebsleistungen als auch Vorkehrungen zum Beherrschen großer Saughöhen vorzusehen. Um einen Modellmaßstab 1:10 erreichen zu können, muß ein Versuchsbetrieb mit  $H_s = 9$  mWS möglich sein. Ist nur  $H_s = 8$  m erreichbar, so wird der Modellmaßstab 1:5, wobei z. B. entsprechend einer Verlustleistung an der Großausführung von 50 000 P am Modell 290 PS zur Verfügung zu stellen sind. Die angegebenen Werte sind überschlägig mit

$$\frac{P_{\text{at}}}{\gamma_{\text{Wasser}}} - \frac{P_{\text{d}}}{\gamma_{\text{Wasser}}} = 10 \text{ m WS}$$

errechnet und bedürfen der Korrektur, falls sich der Modellversuch auf eine hochgelegene Anlage mit geringerem Luftdruck bezieht. Bei Anwendung des entsprechenden Zeitmaßstabes

$$\frac{\Delta t_{\text{Modell}}}{\Delta t_{\text{Anlage}}} = \sqrt{\frac{L_{\text{Modell}}}{L_{\text{Anlage}}}}$$

besteht die Möglichkeit, die Kavitationserscheinungen instationärer Vorgänge modellähnlich nachzubilden. Die unter 2. erwähnten diesbezüglichen Vorbehalte gelten jedoch auch für den  $\sigma$ -Fr-Versuch.

Ein für einen Talsperren-Tiefschützens ähnlich Bild 3 durchgeführter kombinierter  $\sigma$ -Froude-Versuch hat die Kavitationserscheinungen am Schützen und im Stollen einerseits und die Ausbildung des schießenden Unterwassers andererseits an ein und demselben Modelle wiedergegeben. Die heftigsten Vibrationen wurden beim Zusammenwirken des sich mit steigendem Gegendruck dem Schützen stoßweise nähernden Wassersprungs mit der in der Randschicht des Strahls auftretenden Kavitation beobachtet (siehe Bild 3, mittleres Bild). Gerade dieser Vorgang ist weder durch den Froudeversuch, noch durch den Kavitationsversuch allein reproduzierbar und kann nur durch die Anwendung der kombinierten  $\sigma$ -Fr-Ähnlichkeit modellmäßig erfaßt werden.

#### 4. Zusammenfassung

Es wurden die Anwendungsbereiche des herkömmlichen wasserbaulichen Modellversuches mit Froudescher Ähnlichkeit und des Kavitationsversuches mit  $\sigma$ -Ähnlichkeit beschrieben. Unter speziellen Verhältnissen kann die Notwendigkeit zum gleichzeitigen Einhalten beider Ähnlichkeitsforderungen auftreten. Versuchsanordnungen und Gesetzmäßigkeiten für derartige Versuche wurden angegeben.

Der Verfasser erlaubt sich, der Tiroler Wasserkraftwerke Aktiengesellschaft seinen Dank für die verständnisvolle Förderung der unseres Wissens erstmaligen Anwendung eines „Froude- $\sigma$ -Modellversuches auszusprechen.



Table 1

Type of experiment Example	Hydraulic model experiment				Cavitation experiment				Combination Froude- $\sigma$ experiment			
	Weir field of a river powerplant				Ball valve discharging into atmosphere				High head gate similar to Figure 3, top sketch			
	Prototype	Model	Relation	Remarks	Prototype	Model	Relation	Remarks	Prototype	Model	Relation	Remarks
Characteristic length $L$ (m)	Weir length	0.5	$\frac{L_p}{L_m} = \alpha = 50$	Model scale determined by (1) smallest object that can be reproduced (2) by room available	Inside diameter 1.5	0.15	$\frac{L_p}{L_m} = \alpha = 10$	Model scale determined (1) by accuracy of reproduction (2) available power of test stand	Gate height 1.5	0.225	$\frac{L_p}{L_m} = \alpha = 6.67$	The geometric scale must be - the head because the Froude similarity law is modeled. Dependent upon $H_s$ max
Head lost $H$ (m)	10	0.2	$\frac{H_p}{H_m} = \alpha = 50$		250	100	$\frac{H_p}{H_m} = \beta = 2.5$	With $H_s$ max as the maximum controlling section head, the smallest possible experimental head is $H_{min} = \frac{10 - H_s \text{ max}}{\sigma_{proto}}$	150	22.5	$\frac{H_p}{H_m} = \alpha = 6.67$	With $H_s$ max as the maximum controlling section head, the smallest possible experimental head is $H_{min} = \frac{10 - H_s \text{ max}}{\sigma_{proto}}$
Discharge $Q$ (m <sup>3</sup> /s)	1,700	0.097	$\frac{Q_p}{Q_m} = \alpha^{5/2} = 17.600$		30	0.19	$\frac{Q_p}{Q_m} = \alpha^2 \beta^{1/2}$		70	0.612	$\frac{Q_p}{Q_m} = \alpha^{5/2} = 115$	
Characteristic velocity $V = \sqrt{2gH}$ (M/S)	14	1.98	$\frac{V_p}{V_m} = \alpha^{1/2} = 7.07$		70	44.3	$\frac{V_p}{V_m} = \beta^{1/2} = 1.58$		54.5	21.0	$\frac{V_p}{V_m} = \alpha^{1/2} = 2.6$	
Power lost $p = 9.81 Q \cdot H$ (kw)	167,000	0.19	$\frac{P_p}{P_m} = \alpha^{7/2} = 880,000$		73,500	187	$\frac{P_p}{P_m} = \alpha^2 \beta^{3/2} = 396$		103,000	135	$\frac{P_p}{P_m} = \alpha^{7/2} = 760$	
Suction head $H_s$ (m water)	Free surface $H_s = 0$	Free surface	$\frac{H_{sp}}{H_{sm}} = 1$		Free surface $H_s = 0$	$H_s = +6$		Model test necessary because head reduction of a suction head	Free surface $H_s = 0$	+8.5	+8.5	Maximum controlling model section head determines the smallest possible head (see H)
Characteristic friction relationship (Reynolds) $R_e = \frac{VL}{V}$	$3.5 \times 10^8$	$9.9 \times 10^5$	$\frac{R_{ep}}{R_{em}} = \alpha^{3/2} = 354$	Similarity not correct but fulfilled sufficiently	$1.0 \times 10^8$	$6.7 \times 10^6$	$\frac{R_{ep}}{R_{em}} = \alpha \beta^{1/2} = 15.8$	Similarity not correct, but fulfilled sufficiently and better than in hydraulic model	$8.1 \times 10^8$	$4.7 \times 10^6$	$\frac{R_{ep}}{R_{em}} = \alpha^{3/2} = 17.3$	Similarity not correct but fulfilled sufficiently and better than in hydraulic model
Characteristic for cavitation relationship $\sigma = \frac{10 - H_s}{H}$ (Thoma)	1	50	$\frac{\sigma_p}{\sigma_m} = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{50}$	Model many times safer against cavitation Negligible when prototype is free from cavitation	0.4	0.4	$\frac{\sigma_p}{\sigma_m} = 1$	Similarity fulfilled	0.0667	0.0667	$\frac{\sigma_p}{\sigma_m} = 1$	Similarity fulfilled
Characteristic for formation of free water surface $Fr = v^2/Lg$ (Froude)	0.8	0.8	$\frac{F_{rp}}{F_{rm}}$	Similarity held correct	333	1,330	$\frac{F_{rp}}{F_{rm}} = 1$	Similarity not fulfilled	202	202	$\frac{F_{rp}}{F_{rm}} = 1$	Similarity fulfilled